

## **DUREZA EN ACEROS AISI 304 LAMINADOS EN TIBIO Y EN CALIENTE**

*Verónica Di Graci<sup>1\*</sup>, Mary Torres<sup>1</sup>, Omar Zurita<sup>1</sup>, Elí Saúl Puchi<sup>2</sup>*

- ✓ Este artículo forma parte del “Volumen Suplemento” **S1** de la *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales (RLMM)*. Los suplementos de la RLMM son números especiales de la revista dedicados a publicar memorias de congresos.
- ✓ Este suplemento constituye las memorias del congreso “*X Iberoamericano de Metalurgia y Materiales (X IBEROMET)*” celebrado en Cartagena, Colombia, del 13 al 17 de Octubre de 2008.
- ✓ La selección y arbitraje de los trabajos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*, quien nombró una comisión *ad-hoc* para este fin (véase editorial de este suplemento).
- ✓ La *RLMM* no sometió estos artículos al proceso regular de arbitraje que utiliza la revista para los números regulares de la misma.
- ✓ Se recomendó el uso de las “Instrucciones para Autores” establecidas por la *RLMM* para la elaboración de los artículos. No obstante, la revisión principal del formato de los artículos que aparecen en este suplemento fue responsabilidad del Comité Organizador del *X IBEROMET*.



## DUREZA EN ACEROS AISI 304 LAMINADOS EN TIBIO Y EN CALIENTE

Verónica Di Graci<sup>1\*</sup>, Mary Torres<sup>1</sup>, Omar Zurita<sup>1</sup>, Elí Saúl Puchi<sup>2</sup>

1: Dpto. de Mecánica, Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela

2: Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela

\* E-mail: [vdigraci@usb.ve](mailto:vdigraci@usb.ve)

Trabajos presentados en el X CONGRESO IBEROAMERICANO DE METALURGIA Y MATERIALES IBEROMET

Cartagena de Indias (Colombia), 13 al 17 de Octubre de 2008

*Selección de trabajos a cargo de los organizadores del evento*

Publicado On-Line el 20-Jul-2009

Disponible en: [www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html](http://www.polimeros.labb.usb.ve/RLMM/home.html)

---

### Resumen

Conocer las propiedades mecánicas de productos intermedios, permite identificar las condiciones idóneas de estas primeras etapas de conformado, para posteriormente continuar con éxito la manufactura. En este trabajo se determina la dureza del acero inoxidable AISI 304 laminado entre 300 y 1200 °C, a deformaciones efectivas de 0,17, 0,25, 0,32 y 0,39 y tasas de deformación entre 0,70 y 1,0 s<sup>-1</sup>. La dureza se mantiene aproximadamente constante entre 300 y 700 °C (trabajo en tibio), mientras que entre 700 y 1200 °C (trabajo en caliente) disminuye para las cuatro deformaciones, en correspondencia con los procesos dinámicos de recuperación y recristalización, respectivamente. A medida que incrementa el grado de deformación aumenta la dureza, obteniéndose una diferencia máxima del 17% para 300 °C. Durante el trabajo en tibio, no existe diferencia en laminar a cualquier temperatura, para una misma deformación, debido a que la dureza no varía significativamente. En la laminación en caliente se obtienen las mejores propiedades que conllevan a un mejor comportamiento mecánico posterior del acero, donde las condiciones óptimas de laminación que favorecen procesos posteriores de manufactura, se encuentran a 1200 °C.

**Palabras Claves:** *Laminación en Tibio, Laminación en Caliente, Dureza, AISI 304.*

### Abstract

Knowing the mechanical properties of intermediate products, allows to identify the suitable conditions of early stages of forming, and then continue successfully manufacturing. This study determines the hardness of an AISI 304 stainless steel rolled between 300 and 1200 °C, strains of 0.17, 0.25, 0.32 and 0.39 and strain rates between 0.70 and 1.0 s<sup>-1</sup>. The hardness stays roughly constant between 300 and 700 °C (warm work), while between 700 and 1200 °C (hot work) hardness decreases for the four strains, in correspondence with dynamic recovery and dynamic recrystallization processes, respectively. As the strain increases also does the hardness, obtaining a maximum difference of 17% at 300 °C. During warm work, there is no difference in rolling at any temperature, for the same strain, because the hardness does not vary significantly. In hot rolling the best properties are obtained that lead to a better later mechanical behavior of the steel, where the optimal conditions of rolling, that favors subsequent manufacturing processes, are located at 1200 °C.

**Keywords:** *Warm Rolling, Hot Rolling, Hardness, AISI 304.*

---

## 1 INTRODUCCIÓN

Dentro de las aleaciones metálicas, los aceros inoxidables son utilizados en un amplio número de aplicaciones debido a su conocida resistencia a una gran diversidad de medios corrosivos, y porque conservan su aspecto brillante e inalterable en la mayoría de las condiciones normales de su servicio. De ellos, los aceros inoxidables austeníticos son los más populares, ya que además de su excelente resistencia a la corrosión, son relativamente fáciles de conformar, presentan buena ductilidad y una

estabilidad estructural de la austenita en un intervalo amplio de temperaturas, razones por las cuales son empleados para propósitos criogénicos en contenedores de gas líquido, equipos a altas temperaturas como intercambiadores de calor, componentes estructurales de reactores nucleares y otros sistemas en condiciones de servicio a temperaturas elevadas, por largos períodos de tiempo [1].

El acero inoxidable AISI 304 es a su vez el más usado dentro de los austeníticos, debido a su

capacidad para el conformado plástico, mediante procesos de deformación volumétrica, los cuales contribuyen a añadir un valor comercial al producto permitiendo refinar sus formas originales, obtener geometrías específicas y mejorar las propiedades mecánicas.

Los procesos de conformado plástico por deformación volumétrica son comúnmente realizados en frío o caliente, y entre ellos destaca la laminación como uno de los procesos más utilizados. Durante la laminación, la cantidad de deformación plástica, la temperatura y la tasa de deformación, no sólo determinan las dimensiones de los productos obtenidos, sino también la estructura y las propiedades mecánicas del metal.

Para conformar plásticamente con éxito a un metal es importante que éste cumpla con las siguientes propiedades: una relativa baja resistencia a la fluencia, para reducir los requerimientos de fuerza y potencia de los equipos, y una ductilidad lo suficientemente alta como para evitar la fractura durante la deformación. Una manera de reducir la resistencia y aumentar la ductilidad de los materiales metálicos es calentarlos, con anterioridad al conformado, a una temperatura por debajo de su temperatura de fusión, ya que ambas propiedades son afectadas por este parámetro. El intervalo de temperaturas a la cual se deforma el metal es lo que conduce a la diferenciación entre trabajo en frío, aquel conformado que ocurre a temperaturas inferiores a  $0,3T_m$  ( $T_m$  es la temperatura absoluta de fusión del material), trabajo en tibio al que ocurre entre  $0,3$  y  $0,5T_m$ , y trabajo en caliente, por encima de  $0,5T_m$  [2]. En el acero inoxidable AISI 304, la temperatura de fusión es de aproximadamente  $1723,15$  K; por consiguiente, se puede esperar que para calentamientos superiores a los  $244$  °C, la deformación se encuentre por encima del intervalo de trabajo en frío, mientras que para temperaturas por encima de los  $588$  °C se podría considerar conformado en caliente [2].

En las condiciones de conformado plástico a altas temperaturas, los mecanismos de evolución de la estructura son de gran importancia práctica debido a la estrecha relación entre las propiedades del material después de ser conformado y su microestructura. Estos mecanismos están gobernados en parte por la temperatura, el grado de deformación, la tasa de deformación y la tasa de enfriamiento después de la deformación; además de

las características del material como la energía de falla de apilamiento y el tamaño, distribución y coherencia de segundas fases [3].

En la deformación a altas temperaturas, a diferencia del trabajo en frío, ocurren simultáneamente dos procesos competitivos: el endurecimiento por deformación, el cual se debe al incremento en la densidad de dislocaciones; y la restauración, la cual consiste en una disminución y redistribución de dislocaciones en configuraciones más estables. Los dos mecanismos básicos de restauración son la recuperación y la recristalización dinámica. La extensión y proporción relativa de estos procesos, durante los tratamientos termomecánicos, determinarán la evolución de la microestructura.

La recuperación dinámica es un proceso en el cual las dislocaciones se arreglan en una configuración energética más favorable, usualmente en una estructura celular o estructura de subgranos, mediante el ascenso y descenso de dislocaciones y el deslizamiento cruzado. Estos subgranos se caracterizan por ser gruesos, con gran densidad de dislocaciones en sus bordes y, generalmente, con una orientación similar a la de los granos de la matriz. La diferencia en orientación de los subgranos tiende a aumentar con el incremento de la tasa de deformación o la disminución de la temperatura [4]. Wahabi [5] define al proceso de recuperación dinámico no como un proceso microestructural único, sino como una serie de micromecanismos que actúan en conjunto y de manera simultánea con la deformación para conseguir la restauración del material. Entre estos micromecanismos él enumera: la generación de dislocaciones, la formación de “celdas” en los granos deformados, la aniquilación de dislocaciones dentro de las “celdas”, la formación de subgranos y su crecimiento.

Especialmente en metales con baja energía de falla de apilamiento, el mecanismo de recuperación dinámica, en determinadas ocasiones, puede verse interrumpido por la formación de maclas de deformación. El maclaje contribuye de manera importante en la deformación plástica de este tipo de aleaciones. Estos procesos han sido observados en trabajos de varios investigadores, en metales con estructura cristalina fcc y baja energía de falla de apilamiento, como los aceros inoxidables austeníticos [3-4, 6].

El endurecimiento producido por la formación de maclas de deformación ha sido estudiado por

Rohatgi et al. [7] en algunas aleaciones de cobre, quienes determinaron que estas maclas se forman tanto en el interior de los granos como en el de las maclas de recocido, y lo hacen orientadas al azar con relación a otras maclas por deformación que están en otros granos o maclas de recocido.

La recrystalización es un proceso en el cual se forman nuevos granos dentro de la matriz original. Estos granos tienen una nueva orientación con respecto a los granos originales, poseen ángulos y bordes poligonales y se encuentran esencialmente libres de dislocaciones en su interior. La recrystalización dinámica está favorecida por altas temperaturas y relativamente bajas velocidades de deformación, aunado a una energía de falla de apilamiento baja. Si no se cumplen estas condiciones, el mecanismo de restauración será únicamente la recuperación dinámica.

Durante la recuperación dinámica, todos los mecanismos de restauración involucran dislocaciones unitarias, las cuales son aniquiladas en eventos individuales. Se ha demostrado que la formación de nuevos granos sigue la evolución de la deformación induciendo sub-bordes en el interior de los granos, tales como paredes de alta densidad de dislocaciones y microbandas. El ángulo de los mencionados sub-bordes aumenta por la acumulación de dislocaciones y/o por la rotación de subgranos a altas deformaciones permitiendo la formación de nuevos y finos granos [8]. Por el contrario, durante la recrystalización dinámica, las dislocaciones son aniquiladas en grandes números a través de la migración de un límite de grano de ángulo elevado. Esto significa que la red en la cual residen es destruida y reemplazada por una nueva y sustancialmente perfecta en una operación integral.

En el trabajo en caliente se eliminan rápidamente el endurecimiento por deformación y la estructura granular deformada, al formarse granos nuevos libres de deformación durante la recrystalización [9-11]. Se pueden lograr deformaciones muy grandes trabajando en caliente porque la recrystalización elimina las perturbaciones introducidas por la deformación.

En metales con energía de falla de apilamiento baja y media, la recrystalización dinámica ha sido reportada como el mecanismo responsable de restauración a las altas temperaturas de deformación. Para los aceros inoxidables austeníticos, que poseen una energía de apilamiento baja, la recrystalización es el principal mecanismo

dinámico de restauración en los procesos de laminación en caliente [10-11].

La mayoría de los procesos de laminación se realizan a altas temperaturas debido a la gran cantidad de deformación requerida, y en búsqueda de las ventajas que estas condiciones ofrecen, tales como: menor potencia del equipo para deformar el material, poco endurecimiento del mismo, entre otras. Pero debido a la poca exactitud dimensional y pobre acabado superficial del producto laminado a altas temperaturas (producto intermedio), éste es sometido a procesos posteriores de trabajo en frío, para establecer dimensiones más exactas y propiedades deseadas.

Lo anteriormente descrito implica que debe caracterizarse adecuadamente las propiedades mecánicas (a temperatura ambiente) de los productos intermedios, obtenidos mediante el trabajo en tibio o caliente, lo que permitiría identificar las condiciones idóneas de temperatura, grado y tasa de deformación, de estas primeras etapas de conformado, para posteriormente continuar con éxito la manufactura. Es de suma importancia caracterizar el comportamiento mecánico del metal de trabajo en las diferentes condiciones de procesamiento, para poder controlar su microestructura y conocer tanto la respuesta del material ante las demandas impuestas por el proceso, como las propiedades mecánicas del producto obtenido.

El presente trabajo considera la importancia de caracterizar el comportamiento mecánico del acero inoxidable austenítico AISI 304, empleando ensayos de dureza Vickers, cuando se somete a laminaciones en tibio y en caliente. El proceso de laminación se realizará para condiciones determinadas de temperatura, grado de deformación y tasas de deformación con la finalidad de establecer su efecto sobre la dureza del material.

## 2 PARTE EXPERIMENTAL

El material empleado en este estudio fue una lámina de acero inoxidable austenítico AISI 304. La caracterización del material de trabajo se realizó mediante el análisis químico, la determinación de las propiedades mecánicas y el análisis metalográfico en la condición de entrega. La composición química obtenida se presenta en la tabla 1.

Las propiedades mecánicas fueron determinadas mediante ensayos de tracción simple de tres probetas, en una Prensa Universal de Ensayos MTS 810 de 25 toneladas de capacidad, con una velocidad de desplazamiento constante e igual a 4,3 mm/min. Los ensayos de tracción se realizaron según las normas ASTM E 8 M-91 [12] y ASTM A 370-91a [13].

**Tabla 1.** Composición química del acero inoxidable AISI 304

<i>Elemento</i>	<i>Porcentaje</i>
C (%)	0,099 ± 0,001
Cr (%)	16 ± 1
Ni (%)	8,6 ± 0,2
Mn (%)	1,19 ± 0,05
Si (%)	0,323 ± 0,002
Mo (%)	0,197 ± 0,003
W (%)	0,013 ± 0,002
Nb (%)	0,0104 ± 0,0005
V (%)	0,045 ± 0,003
Ti (%)	0,0080 ± 0,0003
S (%)	0,030 ± 0,001
Fe	Remanente

Los ensayos de dureza Vickers se realizaron a tres muestras, siguiendo la metodología indicada en la norma ASTM E 92-82 [14], empleando un durómetro marca Otto Wolpert-Werke y una carga de 30 Kgf durante 15 s. En la tabla 2 se reportan las propiedades mecánicas y la dureza promedio obtenidas.

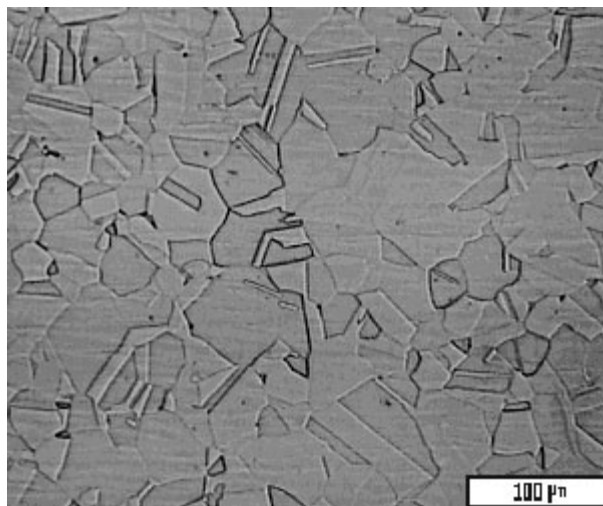
**Tabla 2.** Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 304

$S_y$ (MPa)	$S_u$ (MPa)	$\sigma_f$ (MPa)	$A_r$ (%)	$\epsilon_f$	HV
298	676	1998	80	1,61	158

Finalmente se realizó el estudio metalográfico del material bajo la norma ASTM E3-80 [15]. En la figura 1 se muestra la microestructura del acero en estado de entrega la cual se caracteriza por presentar una estructura de granos austeníticos equiaxiales de diferentes tamaños.

El conformado plástico del material en estudio se realizó mediante laminación a diferentes condiciones. Dichas condiciones se establecieron en función de la temperatura inicial del material de

trabajo y el grado de deformación en el espesor del metal.

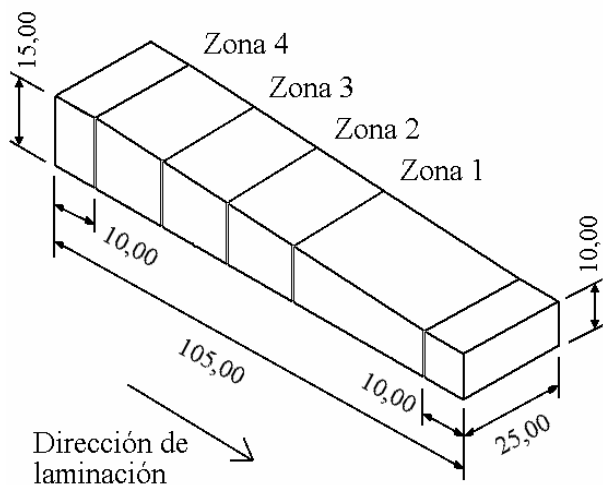


**Figura 1.** Fotomicrografía del acero inoxidable austenítico AISI 304 empleado, en estado de entrega. Se observan granos austeníticos equiaxiales de diversos tamaños y maclas. Aumento 100x. Ataque químico con ácido oxálico al 10%

Se utilizaron 19 temperaturas iniciales de las probetas en el intervalo desde 300 hasta 1200 °C, cada 50 °C (desde 300 hasta 700 °C considerado como el intervalo de laminación en tibio, y desde 700 hasta 1200 °C el de laminación en caliente, como se verá más adelante). Para cada temperatura se realizaron laminaciones a una velocidad tangencial de los rodillos 0,05 m/s, y a cuatro diferentes grados de deformación en el espesor. En ocasiones es conveniente utilizar la variable velocidad o tasa de deformación ya que reúne en una sola variable el efecto de la velocidad tangencial de los rodillos y el grado de deformación. Cada combinación de variables se repitió tres veces con la finalidad de minimizar errores experimentales, de manera que se tendrían 228 experiencias en total. Para reducir la cantidad de ensayos a realizar se escogió un diseño de probeta en forma de cuña, con área transversal variable, tal como se muestra en la figura 2. La ventaja de laminar este tipo de probetas estuvo en que este diseño permitió obtener en una sola pasada de laminación diferentes grados de deformación, con lo cual sólo se necesitaron realizar 57 ensayos que cubrieron todas las combinaciones de parámetros posibles. La selección de las dimensiones más adecuadas de las probetas en forma de cuña se hizo en función de la potencia del

equipo de laminación disponible y de los resultados de trabajos anteriores [16].

Las probetas se mecanizaron de manera tal que su dimensión mayor (ver figura 2), que fue la dirección de laminación, coincidió con la dimensión mayor de la lámina original. El grado de deformación que se obtuvo en las probetas una vez laminadas aumentó gradualmente desde la zona 1 hasta la zona 4 (espaciadas uniformemente), estas zonas se seleccionaron considerando que fueron las más deformadas y fueron marcadas mediante cepillado.



**Figura 2.** Diseño de las probetas en forma de cuña empleadas en las laminaciones

Las deformaciones aplicadas a las cuñas se realizaron en un laminador dúo reversible, marca Stanat, modelo TA-315, de 15 HP de potencia; se utilizaron rodillos para laminado en caliente de 0,152 m de diámetro con una temperatura promedio de 145 °C y una separación entre rodillos de 10 mm.

El procedimiento seguido para llevar a cabo las deformaciones fue el siguiente: primero se calentaron las probetas en un horno de resistencia eléctrica, marca Thermolyne, modelo Furnatol 133, el control de la temperatura de las probetas se hizo con un termopar tipo "K" colocado en una probeta adicional horadada para tal fin. Una vez que las probetas alcanzaron la temperatura de ensayo se realizaron las laminaciones. Inmediatamente después de cada laminación se templó cada probeta en agua, con agitación y a temperatura ambiente,

para poder analizar la microestructura una vez ocurrida la deformación. Después de laminadas las probetas, se identificaron y se seccionaron en cada una de ellas, las cuatro zonas correspondientes a los diferentes grados de deformación, obteniéndose así 228 nuevas probetas para analizar.

A partir de las deformaciones reales obtenidas con las dimensiones iniciales y finales de cada sección, se obtuvieron las deformaciones efectivas utilizando la ecuación (1): [17]

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sqrt{2}}{3} \left[ (\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

Donde:

$\bar{\varepsilon}$  = deformación efectiva

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$  = deformaciones principales

Esto se hizo debido a que no siempre se obtuvo el espesor final buscado (10 mm) y que a medida que se iba incrementando la temperatura del ensayo, la deformación en el ancho también fue aumentado. Los valores de deformación efectiva para cada una de las cuatro zonas, fueron promediados entre todas las temperaturas y son presentados en la tabla 3, junto con los valores de la tasa de deformación efectiva, los cuales fueron calculados con la ecuación (2): [16]

$$\dot{\varepsilon} = \frac{v}{\sqrt{R \cdot \Delta h}} \cdot \ln \frac{h_o}{h_f} \quad (2)$$

Donde:

$\dot{\varepsilon}$  = tasa de deformación efectiva

v= velocidad tangencial de los rodillos

R= radio de los rodillos del equipo de laminación

$\Delta h$ = variación del espesor de la lámina

$h_o$ = espesor inicial de la lámina

$h_f$ = espesor final de la lámina

Para estudiar la influencia de las variables establecidas en la dureza Vickers se prepararon metalográficamente, según la norma ASTM E 3-80 [15], las superficies obtenidas las cuales tenían un área aproximada de (25x10) mm<sup>2</sup>. A cada sección preparada se le realizaron barridos de dureza Vickers en las dos direcciones transversales a la

dirección de laminación, las cuales son perpendiculares entre sí (ancho y espesor), para verificar la existencia o no de un gradiente de deformación en cualquiera de estas dos direcciones.

**Tabla 3.** Deformaciones efectivas y Tasas de Deformación Efectiva obtenidas al laminar al acero inoxidable AISI 304 entre 300 y 1200 °C.

Zona	Deformación Efectiva	Tasa de Deformación Efectiva ( $s^{-1}$ )
1	0,17	0,70
2	0,25	0,84
3	0,32	0,94
4	0,39	1,00

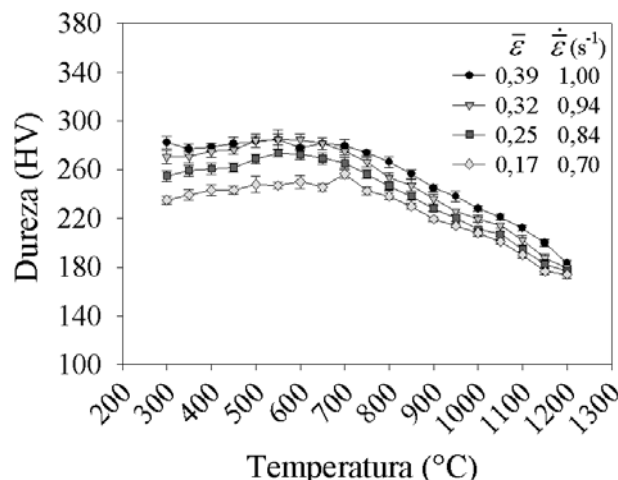
No se encontraron variaciones significativas en las medidas de dureza obtenidas en cada uno de los dos barridos realizados para cada sección, por lo cual se tomaron los promedios de las mediciones realizadas en cada barrido. El área de la sección permitió realizar 13 mediciones en la dirección del ancho y 6 mediciones en la dirección del espesor. Los ensayos de dureza se realizaron en un durómetro marca Otto Wolpert-Werke, empleando un penetrador de diamante, piramidal de base cuadrada, una carga de 30 Kgf y un tiempo de aplicación de la carga de 15 s, siguiendo la norma ASTM E92-82 [14]. Para cada huella cuadrada obtenida se midieron las dos diagonales, y con el promedio de ambas se calculó el índice de dureza Vickers de cada medición.

Finalmente, en determinadas condiciones de laminado se realizó un análisis metalográfico a través de la microestructura de las probetas deformadas del acero, empleando para ello un microscopio óptico marca Versamet Unión.

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 3 y 4 se presentan las gráficas de la dureza Vickers en función de la temperatura de laminación, para una velocidad tangencial de los rodillos de 0,05 m/s y en las dos direcciones transversales a la laminación medidas, ancho y espesor respectivamente. En cada una de estas gráficas se muestran cuatro curvas, correspondientes a los cuatro diferentes grados de deformación efectiva analizados. Cada punto graficado corresponde al promedio de las tres repeticiones realizadas para cada condición, cuyos errores no superan el 4 %. Ambas gráficas presentan un comportamiento similar.

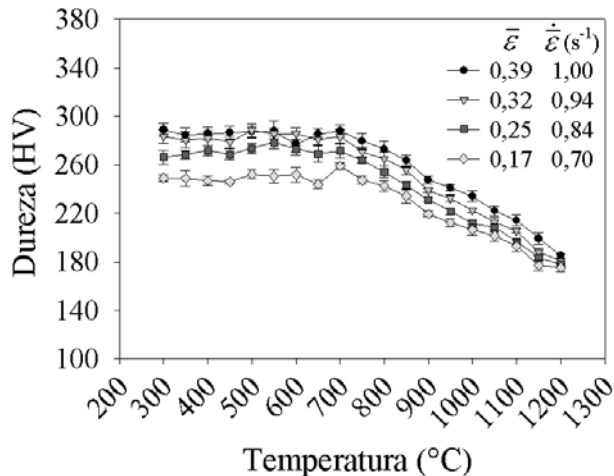
En general, se observa que la dureza no registra una variación significativa desde los 300 hasta los 700 °C. La mayor diferencia en los valores de dureza con la temperatura, para este intervalo, no supera el 9 % (21 unidades de dureza Vickers HV). Este porcentaje de diferencia no representa una variación importante de la dureza con la temperatura hasta los 700 °C, y podría atribuirse en gran parte a variaciones experimentales intrínsecas de las mediciones, teniendo en consideración los siguientes puntos: 1) que la apreciación de la reglilla empleada para medir las dos diagonales de las huellas cuadradas dejadas por el penetrador Vickers es de  $\pm 0,01$  mm; y 2) que el índice de dureza varía, aproximadamente, entre 8 y 13 unidades HV para variaciones en el orden de apreciación de la reglilla. Lo anterior permite inferir que no hay una influencia de la variable temperatura en la dureza del acero inoxidable AISI 304 laminado entre estas temperaturas.



**Figura 3.** Influencia de la temperatura de laminación en la dureza Vickers medida en el ancho de las secciones transversales del acero inoxidable AISI 304 laminado en tibio y caliente con una velocidad de rodillos de 0,05 m/s.

Para el intervalo entre 700 y 1200 °C, se observa una evidente disminución de la dureza Vickers con el aumento de la temperatura para cada uno de los cuatro grados de deformación efectiva estudiados. La mayor diferencia en los valores de dureza, en este intervalo, se registró en las mediciones efectuadas en el espesor de la sección transversal de mayor grado de deformación (0,39), donde el cambio de temperatura de 700 a 1200 °C implicó una disminución en la dureza de 36 % (103 unidades HV).





**Figura 4.** Influencia de la temperatura de laminación en la dureza Vickers medida en el espesor de las secciones transversales del acero inoxidable AISI 304 laminado en tibio y caliente con una velocidad de rodillos de 0,05 m/s.

La disminución de la dureza a partir de 700 °C, es consistente con las diferencias microestructurales presentadas entre las fotomicrografías de la figura 5 cuyas características, para un mismo grado y tasa de deformación, sugieren un predominio de los procesos dinámicos de recuperación a 700 °C y recristalización a 750 °C.

Al hablar de temperatura, y más aún en el caso de deformaciones a altas temperaturas es necesario, dentro de la evolución microestructural, abordar el tema de la restauración del material, cuyos mecanismos principales son la recuperación dinámica y la recristalización.

Durante la recuperación las dislocaciones se acomodan en una configuración más favorable en forma de subgranos, los cuales se caracterizan por ser gruesos, con bordes de alta densidad de dislocaciones y, generalmente, con orientación similar a la de los granos originales [4].

Las microestructuras que se observan en las fotomicrografías para 700 °C de la figura 5, presentan características similares a aquella que ha experimentado un proceso dinámico de recuperación, tales como la heterogeneidad microestructural y la indefinición de bordes de grano. En cambio en las fotomicrografías para 750 °C de la misma figura, se presenta una formación de granos recristalizados, equiaxiales, con sus bordes perfectamente definidos, manifestaciones típicas de los procesos dinámicos de recristalización, y que concuerda con el descenso

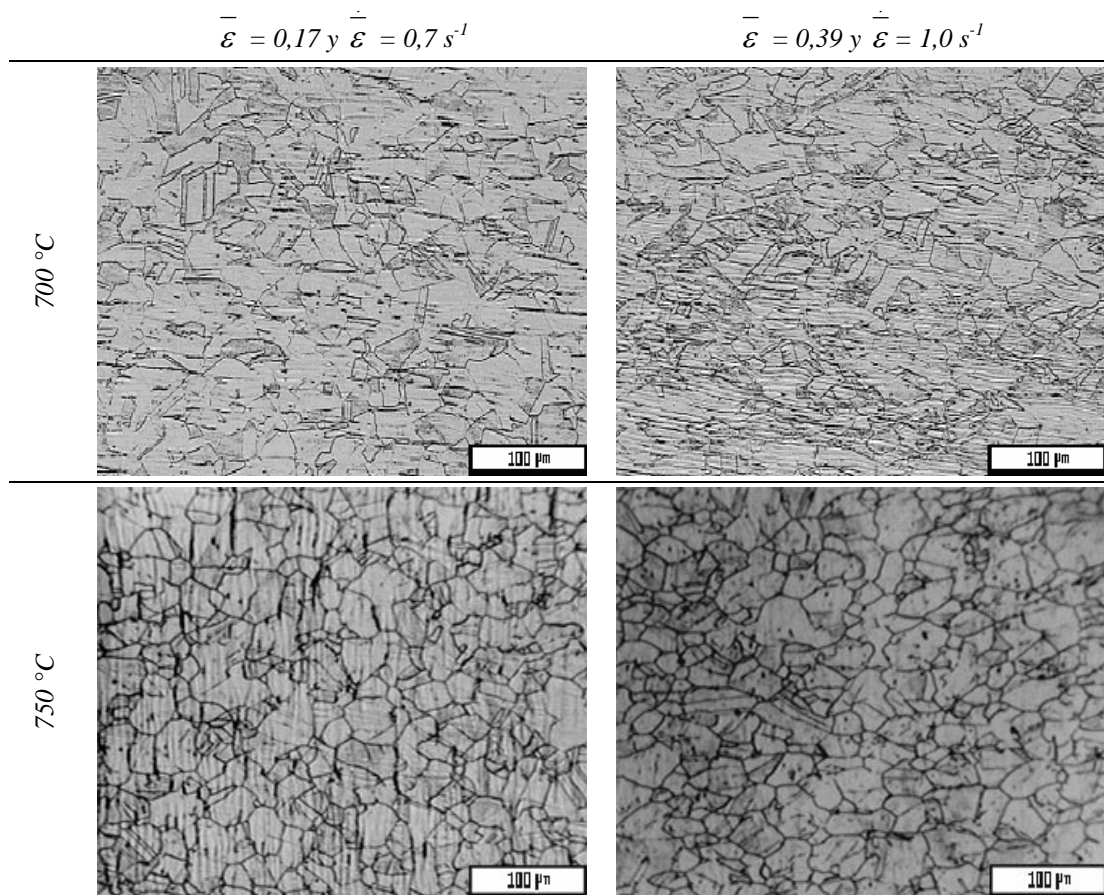
de la dureza del acero después de los 700 °C.

La disminución de la dureza después de los 700 grados junto con el cambio microestructural observado en la figura 5 entre las dos temperaturas, y la presencia de granos recristalizados a 750 grados, permiten sugerir el comienzo de la recristalización en el acero a una temperatura entre 700 y 750 °C, que equivaldrían a aproximadamente un 48 y 52 % de la temperatura de fusión de este metal (1450 °C) respectivamente. En lo que respecta al presente trabajo, al intervalo de temperaturas de laminación entre 300 y 700 °C se le denominará intervalo de trabajo o conformado en tibio, debido a la poca variación de los valores de dureza encontrados en dicho intervalo. Mientras que la disminución significativa de la temperatura, entre 700 y 1200 °C, para los cuatro grados de deformación, sugiere que se puede establecer a este intervalo de temperatura como el de trabajo o conformado en caliente.

En función de lo anteriormente descrito, en las tablas 4 y 5 se reportan los promedios de las durezas obtenidas para las temperaturas del intervalo de laminación en tibio, para cada uno de los cuatro grados de deformación estudiados, y los dos barridos realizados a las secciones transversales de las probetas (ancho y espesor). De estas tablas, y comparando con la dureza correspondiente al del acero en estado de entrega HV 158 (ver tabla 2), se puede calcular que el máximo valor de dureza obtenido luego del conformado en tibio, fue 81 % mayor que el de este material en su condición inicial; lo cual implica el endurecimiento por deformación que sufrió el acero al ser deformado.

Los mecanismos de endurecimiento por deformación como la formación de maclas pueden, en determinadas ocasiones, interrumpir el proceso de recuperación dinámica. Los materiales con baja energía de falla de apilamiento (EFA), como el acero inoxidable en estudio, son propensos a la formación de maclas de deformación, las cuales, a altas tasas de deformación y/o bajas temperaturas, pueden contribuir a la deformación plástica junto con los mecanismos de deslizamiento, provocando el endurecimiento del material. Estas maclas se observan como líneas o marcas oscuras dentro de los granos o de las maclas térmicas, presentando paralelismo unas con otras dentro un mismo grano, pero sin ninguna relación con respecto a las maclas de deformación formadas dentro de otros granos o maclas térmicas. En la figura 6 se puede observar

con detalle la morfología de las maclas de deformación (encerrada en el óvalo), en la microestructura del acero laminado a 300 °C y al menor grado de deformación efectiva.



**Figura 5.** Fotomicrografías correspondientes al acero inoxidable laminado a 700 y 750 °C, con deformaciones iguales a 0,17 y 0,39 y tasas de deformación iguales a 0,7 y 1,0 s<sup>-1</sup>. Aumento 100x. Ataque químico con ácido oxálico al 10%.

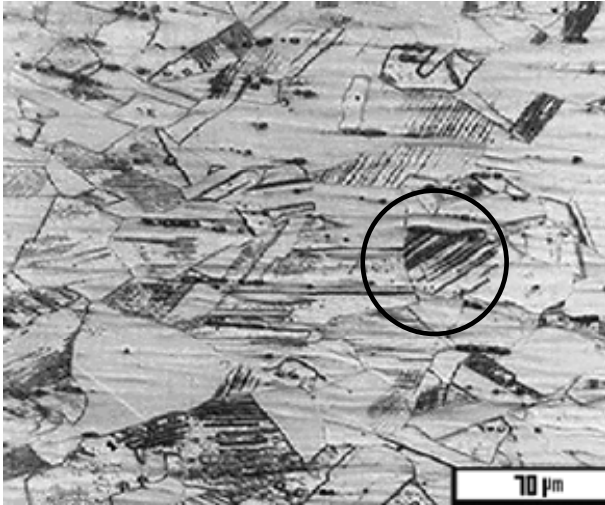
**Tabla 4.** Promedios de las durezas medidas, en el ancho de las secciones transversales del acero inoxidable AISI 304, en el intervalo de laminación en tibio, para los grados de deformación efectiva estudiados.

<i>Deformación Efectiva</i>	<i>Dureza Vickers (HV) (ancho)</i>	<i>Desviación Estándar</i>
0,17	245	6
0,25	265	6
0,32	278	6
0,39	281	3

**Tabla 5.** Promedios de las durezas medidas, en el espesor de las secciones transversales del acero inoxidable AISI 304, en el intervalo de laminación en tibio, para los grados de deformación efectiva estudiados.

<i>Deformación Efectiva</i>	<i>Dureza Vickers (HV) (espesor)</i>	<i>Desviación Estándar</i>
0,17	250	4
0,25	271	4
0,32	283	3
0,39	286	3

En cuanto a la influencia del grado de deformación, en las gráficas de las figuras 3 y 4 se observa que, para una temperatura constante, al aumentar la deformación efectiva desde 0,17 hasta 0,39 aumenta la dureza, tanto en el ancho como en el espesor de las áreas transversales. Esta descripción concuerda con el comportamiento característico de los metales al estar sometidos a deformación plástica



**Figura 6.** Fotomicrografía del acero AISI 304 laminado a 300 °C, con una deformación efectiva igual a 0,17 y una tasa de deformación igual a 0,70 s<sup>-1</sup>. Aumento 200X. Ataque químico con ácido oxálico al 10%.

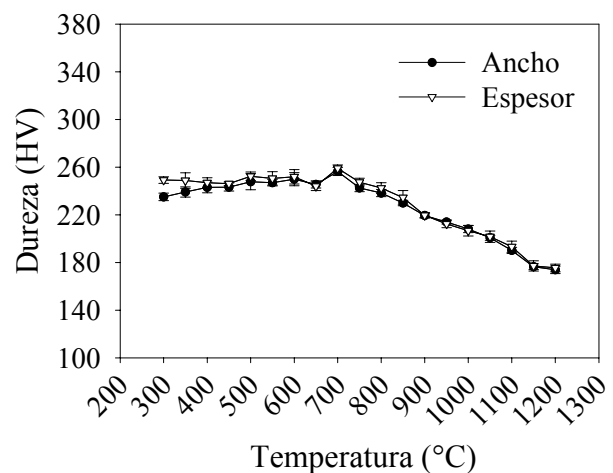
La mayor diferencia en la dureza, resultante entre los valores extremos de deformación, fue de 17 % para 300 °C, la cual fue disminuyendo con el incremento de la temperatura, hasta alcanzar un valor de 5 % para 1200 °C. Esto también puede observarse en cómo las cuatro curvas, en ambas figuras, tienden a acercarse a medida que aumenta la temperatura, por lo que la influencia del grado de deformación es mayor a temperaturas menores.

En las fotomicrografías de la figura 5, para una misma temperatura y los dos grados de deformación extremos estudiados (0,17 y 0,39), se observan bandas de deformación más pronunciadas en la microestructura del acero laminado a 700 grados y 0,39 de deformación efectiva, que en la microestructura de igual temperatura y menor deformación; así como un mayor refinamiento aparente de la microestructura. Esto concuerda con la poca influencia del grado de deformación efectiva en la dureza del material laminado, debido probablemente a la manera localizada en la determinación de la dureza. Para 700 y 750 °C, el máximo porcentaje de diferencia en la dureza entre los valores extremos de deformación fue de 11 %, diferencia que no puede ser percibida en cuanto a cambios microestructurales se refiere por las mismas consideraciones mencionadas tomando en cuenta lo puntual del ensayo y las variaciones experimentales e inevitables en las mediciones de dureza.

La influencia de la dirección en la cual se efectuaron los barridos de dureza Vickers en las

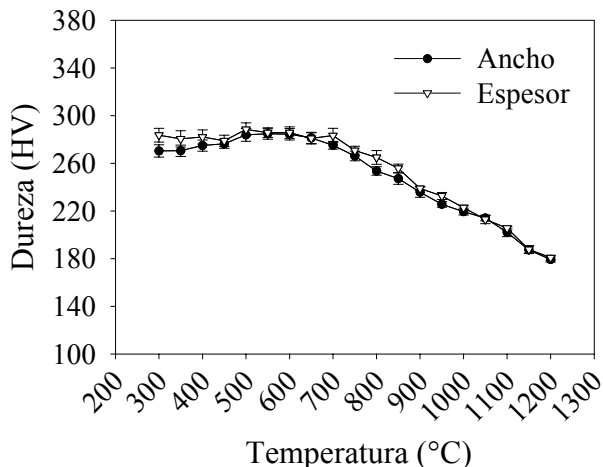
áreas transversales a la laminación, es decir, ancho y espesor, junto con la influencia de la temperatura, se observan en las gráficas de las figuras 7 a la 10, para cada una de las cuatro zonas deformadas respectivamente.

En todas estas gráficas se observa de nuevo la influencia de la temperatura de laminación en la dureza Vickers descrita anteriormente, es decir, la dureza se mantiene aproximadamente constante para temperaturas de laminación entre 300 y 700 °C para luego disminuir notoriamente con el incremento de la temperatura de laminación hasta los 1200 °C.

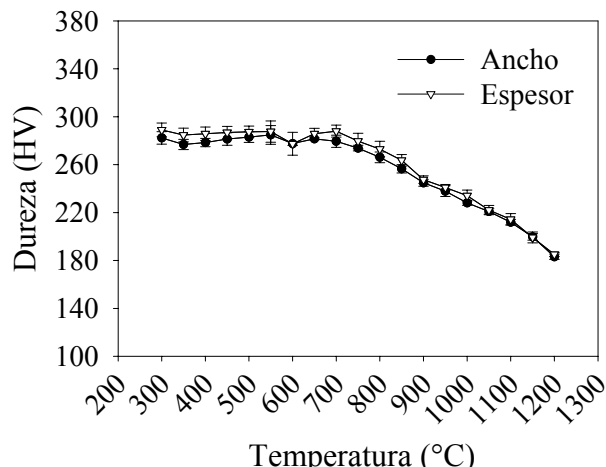


**Figura 7.** Influencia de la temperatura de laminación en la dureza Vickers medida en el ancho y espesor de la sección transversal, con una deformación efectiva igual a 0,17, del acero inoxidable AISI 304 laminado en tibio y caliente con una velocidad de rodillos de 0,05 m/s.

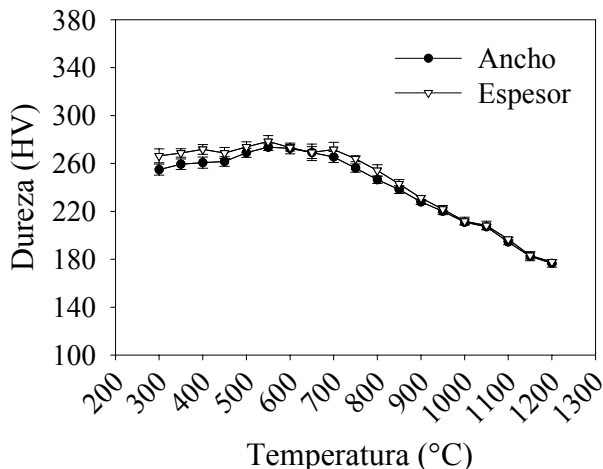
A pesar de que la mayoría de los valores de dureza correspondientes a los barridos en la dirección paralela al espesor de la sección, se encuentran ligeramente por encima de los correspondientes a los barridos en la dirección paralela al ancho, la diferencia entre la dureza de ambas direcciones tiene un valor máximo de 14 HV (aproximadamente 5%), tanto para el conformado en tibio como en caliente. Teniendo presente las mismas consideraciones descritas en párrafos anteriores, las diferencias registradas pueden atribuirse a errores experimentales de las mediciones, por lo que puede afirmarse entonces que no existe una influencia notoria de la dirección en la cual se realizaron los barridos sobre la dureza del material, para cualquier grado de deformación realizado y todo el intervalo de temperatura ensayado.



**Figura 8.** Influencia de la temperatura de laminación en la dureza Vickers medida en el ancho y espesor de la sección transversal, con una deformación efectiva igual a 0,25, del acero inoxidable AISI 304 laminado en tibio y caliente con una velocidad de rodillos de 0,05 m/s.



**Figura 10.** Influencia de la temperatura de laminación en la dureza Vickers medida en el ancho y espesor de la sección transversal, con una deformación efectiva igual a 0,39, del acero inoxidable AISI 304 laminado en tibio y caliente con una velocidad de rodillos de 0,05 m/s.

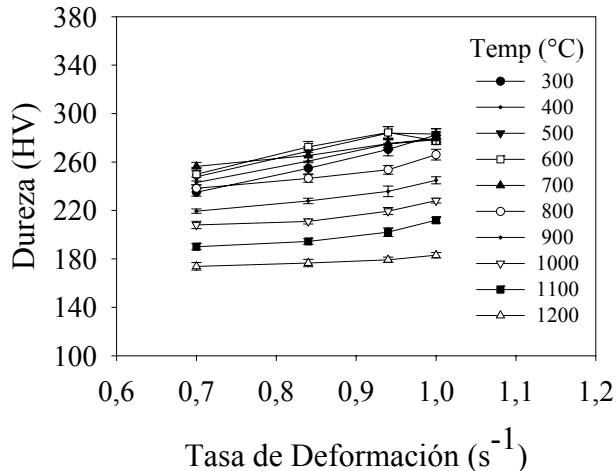


**Figura 9.** Influencia de la temperatura de laminación en la dureza Vickers medida en el ancho y espesor de la sección transversal, con una deformación efectiva igual a 0,32, del acero inoxidable AISI 304 laminado en tibio y caliente con una velocidad de rodillos de 0,05 m/s.

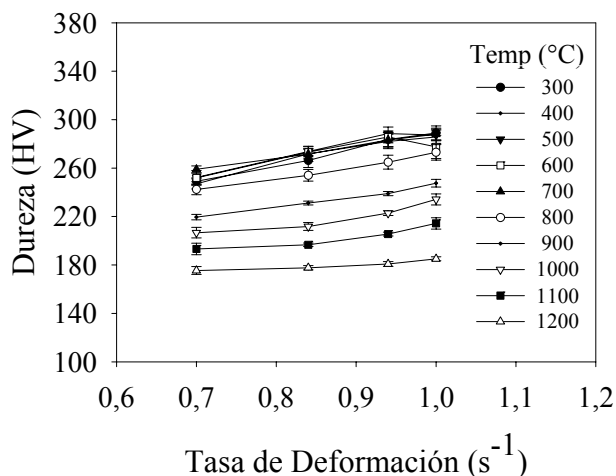
En los procesos de conformado, la velocidad de un elemento móvil del equipo puede relacionarse con la rapidez a la que realmente se deforma el material. Específicamente en laminación, la velocidad real con la cual se deforma el metal cambia durante el trayecto de deformación, dentro de la longitud de contacto rodillo – metal, por lo que es necesario calcular la tasa de deformación real media durante este proceso con la ecuación (2) presentada en la parte experimental.

Las gráficas de las figuras 11 y 12 muestran la variación de la dureza en función de la tasa de deformación para determinadas temperaturas de ensayo (cada 100 °C), en las dos direcciones transversales estudiadas, y en ellas se observa, en general, como a medida que aumenta la tasa de deformación se incrementa la dureza.

Tomando en cuenta que la tasa de deformación es función de la velocidad tangencial de los rodillos (la cual se mantuvo invariable) y de la deformación en el espesor de la probeta, la influencia de la tasa de deformación sobre la dureza corresponde al efecto implícito de la deformación efectiva, en todo el intervalo de temperatura estudiado. Por esta razón, el incremento de la dureza con la tasa de deformación es mayor para las menores temperaturas ensayadas, donde hay un mayor efecto del grado de deformación, y menor para las altas temperaturas del trabajo en caliente, donde el efecto del grado de deformación es menor. En estas dos últimas figuras, este comportamiento se observa por una mayor pendiente de las curvas correspondientes al laminado en tibio, en comparación con las del laminado en caliente, donde la línea de 1200 °C es prácticamente horizontal. Esto concuerda con lo analizado anteriormente en cuanto a la influencia del grado de deformación en las figuras 3 y 4, donde las curvas, de las cuatro deformaciones efectivas, tendían a unirse en las altas temperaturas del conformado en caliente.



**Figura 11.** Influencia de la tasa de deformación y temperatura de laminación en la dureza Vickers medida en el ancho de las secciones transversales del acero inoxidable AISI 304 laminado en tibio y caliente con una velocidad de rodillos de 0,05 m/s.



**Figura 12.** Influencia de la tasa de deformación y temperatura de laminación en la dureza Vickers medida en el espesor de las secciones transversales del acero inoxidable AISI 304 laminado en tibio y caliente con una velocidad de rodillos de 0,05 m/s.

En las gráficas de las figuras 11 y 12 se manifiesta de nuevo el comportamiento descrito en las anteriores, en relación a que la cercanía de las curvas de cada una de las temperaturas del intervalo de trabajo en tibio, indica que la dureza no varía significativamente con la temperatura en estas condiciones; mientras que en el intervalo del trabajo en caliente, sí disminuye notablemente cuando se incrementa la temperatura, aumentando el espaciamiento entre las curvas pertenecientes a

este intervalo.

Por lo general, durante las primeras etapas del conformado de productos intermedios el procesamiento se realiza a altas temperaturas (trabajo en tibio y caliente), para luego continuar a intervalos de temperaturas de trabajo en frío. Caracterizar las propiedades mecánicas (a temperatura ambiente) de los productos intermedios, permitiría identificar las condiciones idóneas de temperatura, grado y tasa de deformación, de estas primeras etapas de conformado, para posteriormente continuar con éxito la manufactura. Con respecto a las condiciones óptimas de laminación a altas temperaturas, del acero inoxidable AISI 304, bajo las cuales ha sido conformado y que favorecen cualquier proceso posterior de manufactura, éstas se encuentran en el intervalo de trabajo en caliente. Específicamente, en el intervalo de trabajo en caliente se puede establecer, luego de los resultados obtenidos, que las condiciones en las cuales se obtienen las propiedades que facilitarían las posteriores etapas de deformación, se encuentran a una temperatura de 1200 °C independientemente del grado de deformación, debido a que en esta temperatura se registraron los menores valores de dureza para las cuatro deformaciones efectivas estudiadas. Desde este mismo punto de vista, para el intervalo de trabajo en tibio, no existe diferencia en laminar a cualquier temperatura, para una misma deformación, debido a que la dureza no presentó variación significativa entre 300 y 700 °C.

A pesar de los mayores requerimientos de energía térmica necesarios para laminar en las condiciones más favorables del trabajo en caliente, es bajo éstas donde se obtienen las mejores propiedades de los productos intermedios que conllevan a un mejor comportamiento mecánico posterior del acero inoxidable AISI 304.

#### 4 CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos para el acero inoxidable austenítico AISI 304 laminado en tibio (300 - 700 °C) y caliente (700 - 1200 °C), a deformaciones efectivas de 0,17, 0,25, 0,32 y 0,39 y tasas de deformación entre 0,70 y 1,0 s<sup>-1</sup>, empleando una velocidad de los rodillos de 0,05 m/s, se pueden deducir las siguientes conclusiones:

- En el laminado en tibio no hay una influencia notoria del incremento de la temperatura sobre la dureza Vickers, para las condiciones

estudiadas.

- En el laminado en caliente, a medida que aumenta la temperatura la dureza Vickers disminuye para las condiciones estudiadas.
- El acero AISI 304 laminado a 700 °C con grados de deformación efectivas iguales a 0,17 y 0,39 y tasas de deformación de 0,7 y 1,0 s<sup>-1</sup> respectivamente, presenta características microestructurales similares a aquellas estructuras que evolucionan mediante procesos dinámicos de recuperación.
- El acero AISI 304 laminado a 750 °C con grados de deformación efectivas iguales a 0,17 y 0,39 y tasas de deformación de 0,7 y 1,0 s<sup>-1</sup> respectivamente, presenta características microestructurales propias de aquellas estructuras que evolucionan mediante procesos dinámicos de recristalización.
- Para una temperatura constante, a medida que aumenta el grado de deformación aumenta la dureza Vickers del acero estudiado. El efecto del grado de deformación en la dureza es mayor a temperaturas menores y a medida que aumenta la temperatura la sensibilidad de la dureza, a las variaciones del grado de deformación, es cada vez menor.
- En base a las mediciones de dureza Vickers, no existe una influencia notoria de la dirección en la cual se realizaron los barridos sobre la dureza del material, para las condiciones estudiadas.
- Las condiciones óptimas de laminación a altas temperaturas, que favorecen cualquier proceso posterior de manufactura, se encuentran a una temperatura de 1200 °C para cualquier grado de deformación de los estudiados.

## 5 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Lacombe P, Baroux B, Beranger G. *Stainless Steels*, (Francia): Les editions de Physique, 1993, Cap. 16.
- [2] Groover MP. *Fundamentos de Manufactura Moderna, Materiales, Procesos y Sistemas*, (México): Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A., 1997, p. 62, 126-128, 439-443, 448-449.
- [3] Mataya M, Perkins S, Thompson S, Matlock D. *Metall. Mater. Trans. A*. 1996; **27A**: 1251-1266.
- [4] Hines J, Vecchio K, Ahzi S. *Metall. Mater. Trans. A*. 1998; **29A** (1): 191-203.
- [5] Wahabi M. *Caracterización Termomecánica de los Aceros Inoxidables Austeníticos*, Tesis Ph.D. Barcelona (España): E.T.S. d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2002.
- [6] Mei Z, Morris J. *Metall. Mater. Trans. A*. 1990; **21A**: 3137-3152.
- [7] Rohatgi A, Vecchio K, Gray III G. *Metall. Mater. Trans. A*. 2001; **32A** (1): 135-145.
- [8] Belyakov A, Sakai T, Miura H, Kaibyshev R. *ISIJ International*, 1999; **39** (6): 592-599.
- [9] Belyakov A, Miura H, Sakai T. *Mater. Sci. Eng. A*, 1998; **A255**: 139-147.
- [10] Kim S, Ko B, Lee C, Hwang S, Yoo Y. *Mater. Sci. Technol.*, 2003; **19**: 1648-1652.
- [11] Stewart G, Elwazri A, Yue S, Jonas J. *Mater. Sci. Technol.*, 2006; **22**: 519-524.
- [12] Norma ASTM E 8M-91, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials (metric)*, Vol. 01.02, Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1992.
- [13] Norma ASTM A 370-91a, *Standard Test Methods for Mechanical Testing of Steel Products*, Vol. 01.01, Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1992.
- [14] Norma ASTM E 92-82, *Standard Test Methods for Vickers Hardness of Metallic Materials*, Vol. 03.01, Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1992.
- [15] Norma ASTM E 3-80, *Standard Methods of Preparation of Metallographic Specimens*, Vol. 03.01, Filadelfia (EE.UU.): American Society for Testing and Materials, 1992.
- [16] Soto E. *Laminación en Caliente del Acero 1045*, Informe de Investigación Tecnológica. Caracas (Venezuela): UNEXPO, 1998.
- [17] Dieter G. *Mechanical Metallurgy*, 3era Ed. Nueva York (USA): McGraw-Hill Book Company, 1986, p. 88, 526-527, 530, 572-573, 586-587.