

## Evaluación del comportamiento mecánico de un acero microaleado X-60 laminado en frío y sometido a un tratamiento térmico de recocido

César Angarita, Philippe Moewis, Laura Sáenz

Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Carabobo, Valencia, Venezuela

Email: lsaenz@postgrado.uc.edu.ve

### Resumen

El comportamiento mecánico del acero microaleado X-60, se estudia cuando el material es laminado en frío con grados de deformación de 10, 20 y 30 %, y posteriormente tratado térmicamente; aplicándosele específicamente un recocido, a la temperatura de 700 °C con tiempos de 10, 15 y 20 minutos. Dicho estudio contempló primeramente el análisis químico, el ensayo de tracción, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido para las condiciones originales, laminado en frío y con recocido; esto con el objeto de poder comparar los resultados obtenidos con la muestra original. Un incremento en las propiedades mecánicas de forma significativa se da en el material, el cual se hace más notable al aumentar el porcentaje de deformación. Este incremento mecánico se caracteriza por el aumento del esfuerzo de fluencia, la resistencia a la tracción, y la reducción de la ductilidad. En cuanto a las condiciones de recocido se da progresivamente la recuperación del material con relación a sus propiedades mecánicas, debido a la recristalización parcial que se produce, la cual se hace más satisfactoria para tiempos de recocido mayores de 15 minutos y para mayores grados de deformación en frío. En las condiciones de mayor deformación (20 y 30 %), existe un leve crecimiento de grano, destacando que es más evidente en la condición de mayor grado de deformación en frío.

**Palabras claves:** Acero microaleado, laminación, recocido, comportamiento mecánico.

## Evaluation of the mechanical performance of a microalloyed stainless steel type X-60 cold deformation and recovery thermal treatment

### Abstract

The mechanical behavior of microalloyed stainless steel X-60 were analyzed in the present work, when the material is cold rolled. The cold plastic deformation of 10, 20 and 30 % of their thickness, followed by a thermal treatment at 700 °C during 10, 15 and 20 minutes. The mechanical behavior is characterized through chemical analysis of its components, and the tension tests, optic microscope and scanning electronic microscopy. The microstructure obtained is ferrite-perlite. The properties mechanical of the samples were evaluated in the conditions as-received, cold-plastic deformation and thermal treatment material. When deformation is progressive increment for the application of the cold rolling deformation is observed the increase of the mechanical strength. It's characterized for the yield strength and ultimate tensile strength, and the reduction of the ductility. Partial recrystallization is obtained when the time of recovery is lower at 15 minutes and when the deformation is increased. In the conditions when the material have more deformation (20 and 30 %), have a little growth of grain, it's more evident in the condition when have more cold deformation.

**Keywords:** Microalloyed steel, cold deformation, recovery and mechanical behavior.

### 1. INTRODUCCIÓN

Los aceros Microaleados conocidos como de alta resistencia y baja aleación (HSLA), son un grupo de aceros de bajo contenido de carbono que

utilizan pequeñas cantidades de elementos aleantes para obtener esfuerzos de fluencia mayores que 275 MPa (40 Ksi) en la condición de laminados ó normalizados. La función principal de los elementos aleantes en estos aceros, es de contribuir al

endurecimiento de la ferrita por medio del refinamiento de grano, endurecimiento por precipitación y endurecimiento por solución sólida. Este último está ligado ampliamente a los contenidos de aleación, mientras que los dos efectos anteriores a este, dependen de los efectos del complejo diseño de aleación y de los tratamientos termomecánicos.

Estos tienen mejores propiedades mecánicas y a veces mejor resistencia a la corrosión que los aceros al carbono laminados. Mas aún, debido a que el esfuerzo de fluencia de los aceros HSLA puede obtenerse con menores contenidos de carbono, la soldabilidad de muchos de ellos es comparable a la del acero suave y hasta a veces mejor.

Los aceros HSLA también se proporcionan como chapas laminadas en frío y forjas. La principal ventaja de las forjas HSLA (como los productos HSLA laminados en caliente) es que los esfuerzos de fluencia en el rango de 275 a 485 MPa (40 a 70 Ksi) ó quizás mayores pueden alcanzarse sin un tratamiento térmico. Las composiciones base de estas forjas de ferrita-perlita microaleadas son comúnmente 0,3 – 0,5 % de carbono y 1,4 – 1,6 % de manganeso. También han sido desarrolladas las forjas de acero HSLA bainíticas de bajo carbono [1-3].

En el presente trabajo se establece como objetivo determinar como influye el tratamiento térmico de recocido sobre las propiedades mecánicas del acero microaleado de fabricación nacional denominado tipo X-60 laminado en frío y recocido. A continuación se presentará un resumen acerca de los aceros microaleados.

## 2. ACEROS MICROALEADOS

Los aceros HSLA son principalmente laminados en caliente en las formas de productos forjados (chapas, láminas, barras, planchas y secciones estructurales) y se proporcionan comúnmente en la condición de laminados en caliente. Sin embargo, la producción de aceros HSLA laminados en caliente también puede incluir un procedimiento especial de laminación denominado "hot mill" que adicionalmente mejora las propiedades mecánicas durante su fabrica-

ción. Este procedimiento incluye: Laminación controlada, enfriamiento acelerado, de templado o enfriamiento rápido al aire o enfriamiento al agua de aceros de bajo carbono, el normalizado, y de recocido intercrítico.

- Laminación controlada: De endurecimiento por precipitación de los aceros HSLA para obtener un grano austenítico fino y/o grano austenítico altamente deformado [3-5], esto produce que el enfriamiento se transforme en granos ferríticos finos que mejora la tenacidad y el esfuerzo de fluencia.
- Enfriamiento acelerado: En los aceros HSLA de laminación controlada para producir un grano ferrítico fino durante la transformación de la austenita. Estas velocidades de enfriamiento no pueden ser tan rápidas como para precipitar ferrita acicular, ni tampoco puede ser tan lenta que puede causar un sobrevejecimiento por precipitación.
- De templado o enfriamiento rápido al aire o enfriamiento al agua de aceros de bajo carbono (<0,08 %C). Poseen una adecuada templabilidad a transformar bainita los aceros de bajo carbono (ferrita acicular). Esta microestructura ofrece una excelente combinación de alto esfuerzo de fluencia (275-690 MPa ó 60-100 Ksi) excelente soldabilidad, formabilidad y alta tenacidad controlando el laminado si es necesario para bajar la temperatura de transición.
- El normalizado: De los aceros HSLA conteniendo vanadio, para refinar el grano mejorando la tenacidad y el esfuerzo de fluencia.
- De recocido intercrítico: De los aceros HSLA, para obtener una microestructura de doble fase (matriz ferrítica con martensita dispersa). Esta microestructura causa una disminución del esfuerzo de fluencia, pero su capacidad de endurecimiento por deformación suministra una buena combinación de ductilidad y esfuerzo máximo y mejora la formabilidad.

La utilidad y la efectividad de costo de estos métodos de proceso son altamente dependientes de la forma de producto y del contenido de aleación.

## Especificaciones y categorías de los aceros HSLA [1]

Los aceros de alta resistencia y baja aleación incluyen muchas normas y poseen distintos grados diseñados para proporcionar combinaciones específicas de propiedades tales como esfuerzo, tenacidad, deformabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión atmosférica. Estos aceros no son considerados aceros aleados, aún cuando sus propiedades deseadas se alcancen mediante el uso de pequeñas adiciones de aleantes. En lugar de esto, los aceros HSLA se clasifican como categoría separada, la cual es similar al acero de medio carbono laminado con propiedades mecánicas acrecentadas obtenidas mediante la juiciosa (pequeña) adición de aleantes y quizás las técnicas especiales de procesos tales como la laminación con enfriamiento controlado.

Aunque los aceros HSLA se consiguen en numerosas normas y combinaciones, los aceros HSLA pueden dividirse en las siguientes categorías:

- Aceros para la exposición a la intemperie.
- Aceros microaleados ferríticos-perlíticos.
- Aceros estructurales perlíticos laminados.
- Aceros de ferrita acicular (bajo carbono bainita).
- Aceros de doble fase.
- Aceros controlados en el perfil de inclusión.
- Aceros resistentes al agrietamiento inducido por hidrógeno.

Solo se hará referencia a los aceros del tipo ferrítico perlíticos ya que son los utilizados en el presente trabajo [3-6].

### Aceros microaleados ferrítico-perlítico

Contienen pequeñas cantidades de elementos formadores de carburos o carbonitruros (generalmente < 0,10 %), tales como el niobio, el vanadio y/o titanio para el endurecimiento por precipitación, refinamiento de grano y posiblemente control de la temperatura de transformación. Las propiedades mecánicas pueden incrementarse y mejorar la microestructura mediante la adición de manganeso y silicio [2-6].

Usando pequeñas cantidades de elementos aleantes como el niobio y el vanadio se puede incrementar el esfuerzo del acero laminado en caliente sin aumentar el contenido de carbono y/o manganeso. Estos aleantes en cantidades menores al 0,10 % fortalecen los aceros estándar al carbono-manganeso sin interferir en sus procesos. Entonces el contenido de carbono puede ser reducido para mejorar la soldabilidad y la tenacidad debido a los efectos fortalecedores del niobio y vanadio compensados por la reducción en el esfuerzo debido a la reducción del contenido de carbono.

El refinamiento de grano mediante el condicionamiento de la austenita con métodos de laminación con enfriamiento controlado ha dado como resultado una mejora en la tenacidad y en los esfuerzos de fluencia, de 345 a 620 MPa (50 a 90 Ksi) [3-6].

El alto esfuerzo de fluencia se alcanza a través del efecto combinado del tamaño de grano fino desarrollado durante el laminado en caliente controlado y el endurecimiento por precipitación debida a la presencia del vanadio, niobio y titanio. Ejemplos especificados de acuerdo a las normas: SAE J410, SAE J 1392, SAE J 1442, ASTM A-242, A-606, A-715 [6].

## 3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El material utilizado es un acero microaleado tipo X-60 fabricado por un proceso de laminación en caliente, en forma de plancha de 15 mm de espesor fabricado por SIDOR cuya composición química es especificada en la Tabla 1 y comparada con el % en peso máximo exigido por las especificaciones de la Norma ASTM A 709.

El acero microaleado es sometido a un proceso de laminado en frío, con grados de deformación de 10, 20 y 30% respectivamente y posteriormente es tratado térmicamente, aplicándosele específicamente un tratamiento de recocido a la temperatura de 700 °C con tiempos de 10, 15 y 20 minutos respectivamente. Dicho estudio contempló ensayos de: tracción, microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido. Se evaluó el material en su condición original, laminado en frío y luego de laminado y recocido.

Tabla 1. Composición química del acero microaleado X-60.

Elemento	C	Ni	Mo	Cu	P	Al	Cr	Mn	S	Si
% Peso Experimental	0,175	0,013	0,001	0,009	0,05	0,003	0,005	0,63	0,01	0,23
% Peso máx. especificado en Norma ASTM A 709	0,26	---	---	---	0,04	---	---	1,35	0,05	0,40

## Ensayo de tracción

El ensayo de tracción evaluado en la máquina marca Galdabini de capacidad 20 toneladas permitió evaluar el comportamiento del material bajo la acción de cargas estáticas. Durante el ensayo se somete a una probeta de dimensiones especificadas según la norma ASTM A 370, a una fuerza de tensión axial suficientemente lenta, para que las partes de las probetas estén en equilibrio en todo instante. A su vez se registro los diferentes alargamientos de la misma con relación a una longitud inicial, hasta llegar a la ruptura.

Se utilizaron tres (3) probetas planas por cada condición de ensayo. A través del ensayo de tracción se determinaron las siguientes propiedades del material: Esfuerzo de fluencia,  $\sigma_{y0,2\%}$ , resistencia a la tracción,  $\sigma_{m\acute{a}x}$ , esfuerzo de ruptura,  $\sigma_{rup}$ , ductilidad medida a través de el % de elongación, %e, y el % de reducción de área, % RA, y coeficiente de endurecimiento del material, n.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La muestra del acero microaleado fue preparada metalográficamente y atacada con Nital al 2 % ( 2 % de ácido nítrico diluido en 98 % de alcohol etílico), para observar el tipo de microestructura, encontrándose en el análisis de microscopía óptica la presencia de una microestructura ferrítico-perlítica, como puede ser observado en la Figura 1. Con respecto a cómo afecta la deformación en frío al material se observa un alargamiento del grano a medida que se incrementa el porcentaje de deformación.

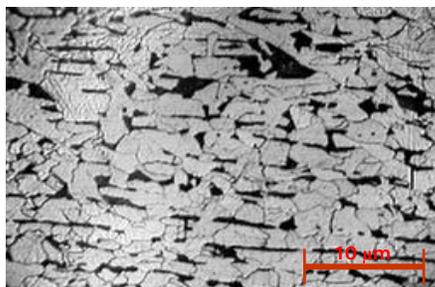
En la Figura 1 (a, b, y c) se puede observar que bajo las condiciones de recocido en base a la deformación en frío del 10 %, no muestran tendencia a la recrystalización, lo cual se puede atribuir a que los

tiempos de recocido establecidos no permiten desarrollar ni siquiera recrystalización parcial en el material. Debido a esto se puede decir que se da sólo la etapa de recuperación o restauración inicial.

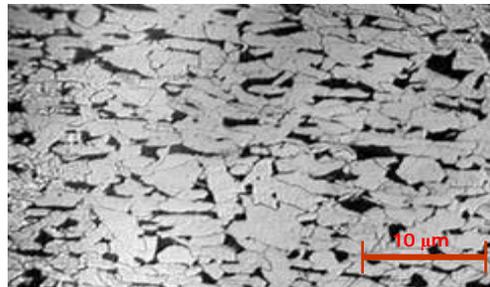
Los valores de las propiedades mecánicas evaluadas a través del ensayo de tracción del material original y el material tratado, son presentados en la Tabla 2. Se puede observar un incremento en las propiedades mecánicas de forma significativa, el cual se hace más notable al aumentar el porcentaje de deformación, como es sabido la densidad de dislocaciones aumenta a medida que aumenta la deformación en frío del material, generando el endurecimiento por deformación del material y como consecuencia el aumento de la resistencia mecánica del material. Este incremento mecánico es caracterizado por el aumento del esfuerzo de fluencia y la resistencia a la tracción, así como la reducción de la ductilidad, evaluada a través del % de reducción de área y el porcentaje de elongación.

En las condiciones de recocido se da progresivamente la recuperación del material, con relación a sus propiedades mecánicas, debido a la recrystalización parcial que se produce, la cual se hace más satisfactoria para tiempos de recocido mayores de 15 minutos y para mayores grados de deformación en frío, como se puede observar en las Figuras 2, 3 y 4. En las condiciones de mayor deformación (20 y 30 %), existe un leve crecimiento de grano que se da en poca proporción y que pudiera contribuir a una dispersión parcial del alargamiento granular, destacando que es más evidente en la condición de mayor grado de deformación en frío, siendo así la más significativa ( Ver Figura 1).

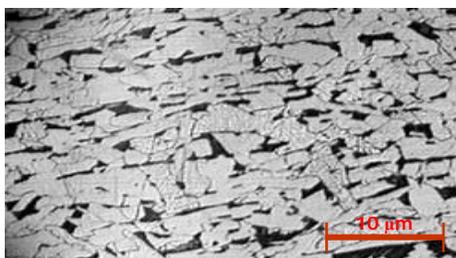
La laminación en frío provoca en el material, el decrecimiento del coeficiente de endurecimiento por deformación, disminuyendo así, la capacidad del acero para ser deformado plásticamente como se puede observar en los resultados expuestos en la Tabla 2.



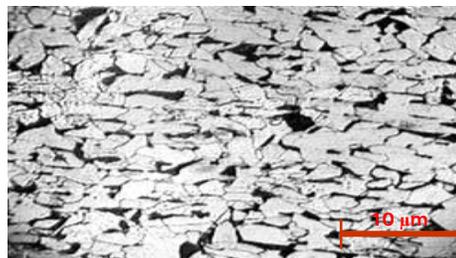
a) Deformación en frío al 10 % y recocido por 10 minutos.



e) Deformación en frío al 20 % y recocido por 15 minutos.



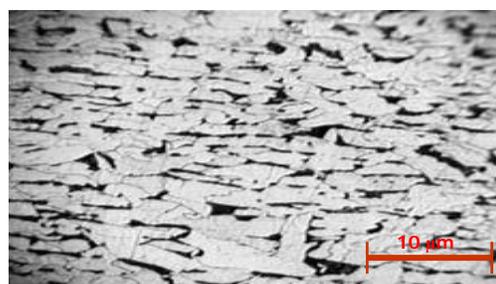
b) Deformación en frío al 10 % y recocido por 15 minutos.



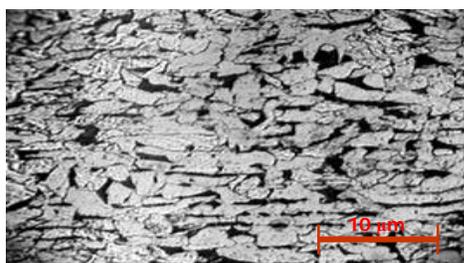
f) Deformación en frío al 20 % y recocido por 20 minutos.



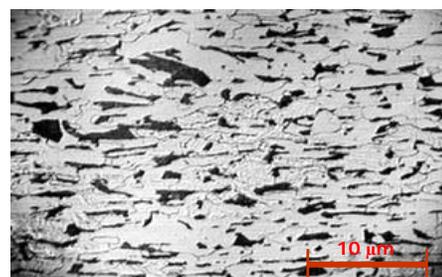
c) Deformación en frío al 10 % y recocido por 20 minutos.



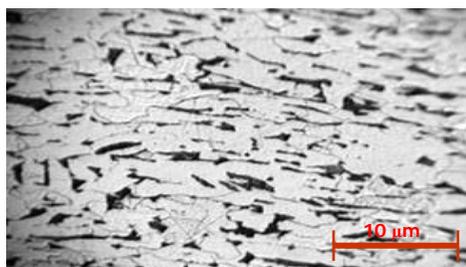
g) Deformación en frío al 30 % y recocido por 10 minutos.



d) Deformación en frío al 20 % y recocido por 10 minutos.



h) Deformación en frío al 30 % y recocido por 15 minutos.



i) Deformación en frío al 30 % y recocido por 20 minutos.

Figura 1. Microscopía óptica del acero X-60 en su condición de deformado en frío y tratado térmicamente a 700 °C.

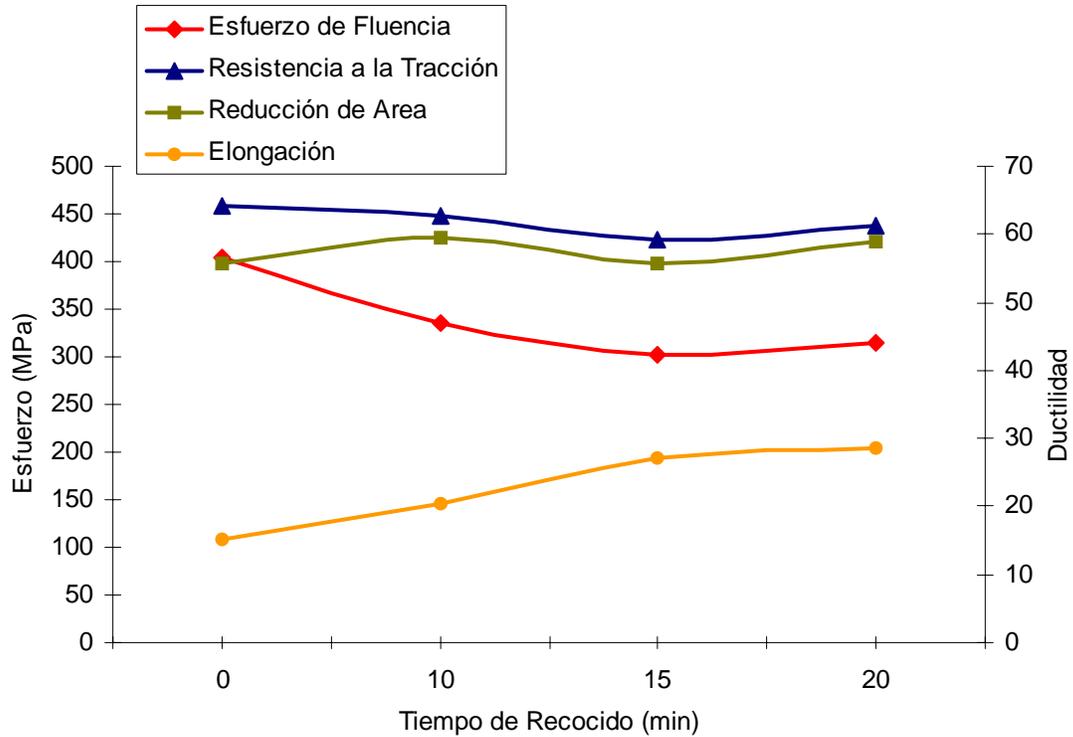


Figura 2. Variación de las propiedades mecánicas del acero microaleado X-60 en función del tiempo de recocido realizado a 700 °C, después de deformado en frío. Deformación en frío al 10 %

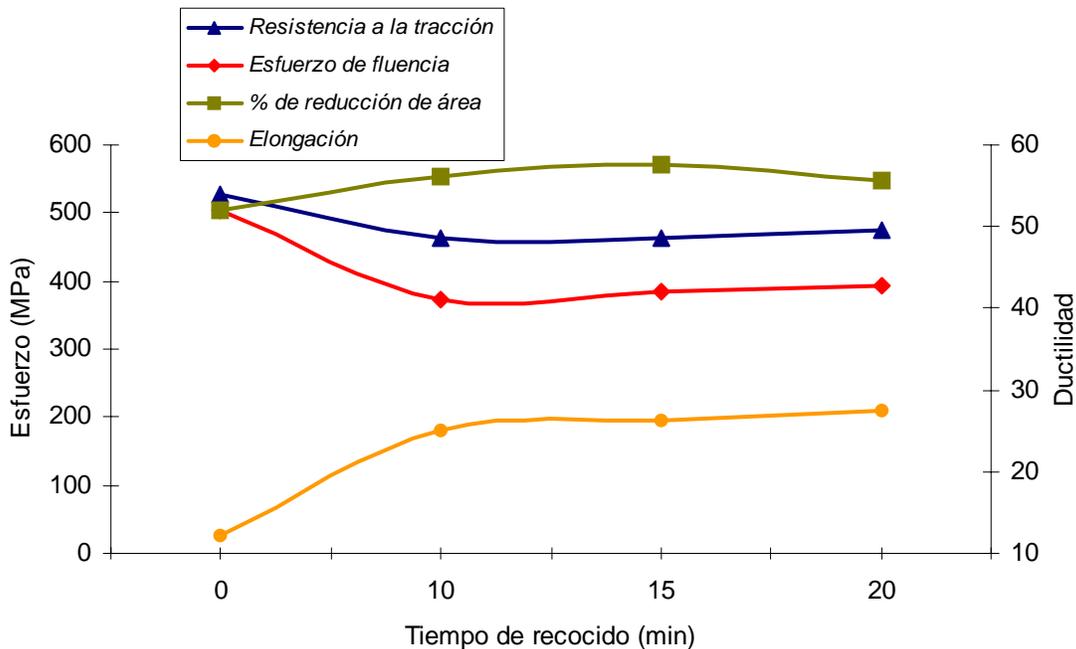


Figura 3. Variación de las propiedades mecánicas del acero microaleado X-60 en función del tiempo de recocido realizado a 700 °C, después de deformado en frío. Deformación en frío al 20 %

La condición de laminación en frío con 30 % de deformación, y en las condiciones de recocido (tiempos de 10, 15 y 20 minutos) se da el reestableci-

miento de las propiedades mecánicas en el acero microaleado X-60, ya que estas alcanzan valores muy próximos a los que el material posee en condición

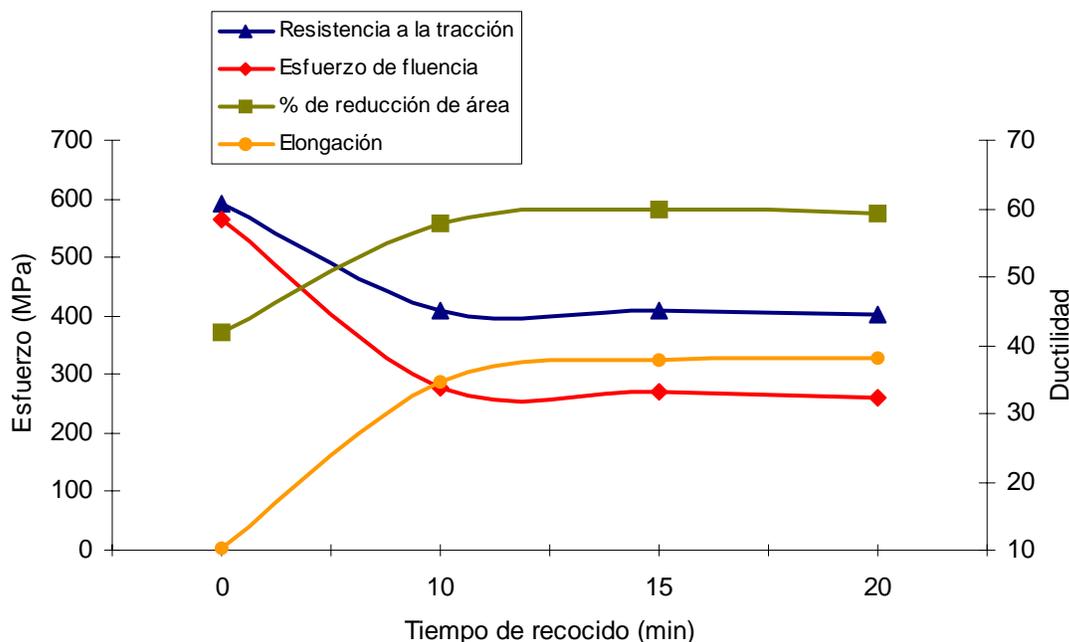


Figura 4. Variación de las propiedades mecánicas del acero microaleado X-60 en función del tiempo de recocido realizado a 700 °C, después de deformado en frío. Deformación en frío al 30 %

original. Cabe destacar que se producen recristalizaciones parciales, evidenciadas mediante el estudio metalográfico (Ver Figuras 2, 3 y 4).

En la condición de 30 % de laminación en frío a partir de 10 min de recocido presenta el mayor intervalo de recuperación de ductilidad, representados por el porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción de área, en comparación a las demás condiciones de laminación y recocido.

Las condiciones de recocido en base a la deformación en frío del 10 %, (Ver Figura 2) no parcial en el material. Debido a esto se puede decir que se da sólo la etapa de recuperación o restauración inicial.

### Microscopía electrónica de barrido

Las superficies de fractura de las probetas de tracción fueron observadas a través del microscopio electrónico de barrido, a nivel general el material presenta en mayor proporción, características dúctiles en la superficie de fractura de las probetas de tracción, las cuales pueden atribuirse al tratamiento de recoci-

do aplicado. Encontrándose que el mecanismo de fractura es del tipo coalescencia de cavidades, caracterizado por la presencia de hoyuelos de pequeños diámetros y coalescencia de cavidades.

## 5. CONCLUSIONES

La condición de 30 % de laminación en frío a partir de 10 min de recocido presenta el mayor rango de recuperación de ductilidad, representados por el porcentaje de elongación y el porcentaje de reducción de área, en comparación a las demás condiciones de laminación y recocido. Estos intervalos son de 10,2-34,7 % y 41,92-57,87 % respectivamente.

Para el mayor grado de deformación en frío (30 %), se tiene un incremento en el esfuerzo de fluencia del 100,44 % y un 39,14 % para la resistencia a la tracción, en comparación a la condición original.

Las condiciones de recocido en base a la deformación en frío del 10 %, no muestran tendencia a la recristalización, lo cual se puede atribuir a que los tiempos de recocido establecidos no permiten

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero microaleado X-60.

Condición	$\sigma_0$ (MPa)	$\sigma_{y0,2\%}$ (MPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\sigma_{rup}$ (MPa)	RA (%)	e (%)	n
Original	285,7	300,4	565	433,7	61,7	30	0,35
laminado al 10 %	414,5	428,6	505,7	392,5	55,9	15,3	0,13
laminado al 20 %	480,6	534,2	565,1	429	52,0	12,2	0,11
laminado al 30 %	551,4	604	635,3	497,4	42	10,2	0,12
laminado al 10 % + recocido a 700 °C por 10 min	347,8	351,3	545,7	412,4	59,4	20,5	0,25
laminado al 10 % + recocido a 700 °C por 15 min	305,1	319,7	536,8	402,3	55,8	27,1	0,31
laminado al 10 % + recocido a 700 °C por 20 min	271	346,3	567,6	450,5	58,84	28,6	0,24
laminado al 20 % + recocido a 700 °C por 10 min	378,8	399	570	438,5	56,2	25	0,24
laminado al 20 % + recocido a 700 °C por 15 min	383,3	407,4	560,5	437,8	57,5	26,2	0,29
laminado al 20 % + recocido a 700 °C por 20 min	397,2	406	574,8	445,2	55,6	27,4	0,26
laminado al 30 % + recocido a 700 °C por 10 min	244,5	313,1	570,7	438	57,9	35,2	0,38
laminado al 30 % + recocido a 700 °C por 15 min	246,5	304,2	559,3	427,2	59,8	36,1	0,40
laminado al 30 % + recocido a 700 °C por 20 min	247	290,4	549,4	418,9	59,4	38,1	0,37

desarrollar ni siquiera recristalización parcial en el material. Debido a esto se puede decir que se da sólo la etapa de recuperación o restauración inicial.

A nivel general el material presenta en mayor proporción, características dúctiles en la fractura de las probetas de tracción, lo cual puede atribuirse al tratamiento de recocido aplicado.

A partir de los 15 min. de recocido, se observa un leve crecimiento de grano en ciertas regiones del material, lo cual es consecuencia de la recristalización parcial producida. Esto es específicamente para las condiciones de 20 y 30 % de deformación en frío mediante el proceso de laminación.

La laminación en frío provoca en el material, el decrecimiento del coeficiente de endureci-

miento por deformación, disminuyendo así, la capacidad del acero para ser deformado plásticamente.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores reconocen al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad de Carabobo por el financiamiento al proyecto CDCH-99-03.

## REFERENCIAS

- [1] T. Gladman The Physical Metallurgy of Microalloyed Steels, The Institute of Materials, UK(1997).

- [2] Johannes Richter, Albert Guth, Alfred Kothe and Gunter Backmann. Influence of Manganese and Si contents on structure and mechanical properties of ferritic-pearlitic HSLA Steels. (1993) Materials Technology. Steel Research 64 N°5 p.p. 267-274.
- [3] F. Peñalba, García de Andrés, F. Carsi, F. Zapirain. Austenite grain size evolution and continuous cooling transformation diagrams in vanadium and titanium microalloyed steel. Journal of Materials Science 31 (1996), p.p. 3847-3852.
- [4] N. Gao and T.N. Baker. Austenite Grain growth behavior of microalloyed Al-V-Ti-N Steels. ISIJ International, vol 38 (1998) N° 7 p.p. 744-751.
- [5] O. Flores, L. Martínez. Anomalous grain of Austenite in a V-Nb Microalloyed Steel. Journal of Materials Science 32 (1997) p.p. 5985-5991.
- [6] F.B. Pickering (1978) Physical Metallurgy and the Design of Steels, cap. 4, Ed. Applied Science Publishers, Essex.