

## Caracterización Microestructural y Mecánica de Rollos Procesados a través de un Molino Steckel y por Laminación en Frío

Microstructural and Mechanical Characterization of Steel Coils  
Processed by Steckel Mill and Cold Rolling



Fuente: <https://www.ahmsa.com/en/about-ahmsa/>

Dra. Adriana Eloisa García-Castillo<sup>a</sup>, Ing. Alberto Perea-Garduño<sup>a</sup>, Ing. Rubén Menchaca-Jiménez<sup>a</sup>, Ing. Mauro Díaz de León-Luna<sup>b</sup>  
Altos Hornos de México, S. A. B. de C. V.

<sup>a</sup>Departamento de Investigación y Desarrollo,

<sup>b</sup>Departamento de Laminación en Frío 1

Prolongación Juárez, S/N, La Loma, Monclova Coahuila, México, 25770

Correo de contacto: [adriana\\_eloisagc@hotmail.com](mailto:adriana_eloisagc@hotmail.com)

## Resumen

El presente proyecto de investigación se realizó en la empresa Altos Hornos de México S.A.B. de C.V. (AHMSA), en el cual se llevó a cabo el desarrollo de un nuevo producto a partir de un grado de acero comercial, mediante una ruta de procesamiento no convencional dentro de la industria siderúrgica, para la fabricación de acero que cumpla con las características necesarias para utilizarse en la industria de línea blanca. La ruta de procesamiento de este material consistió en una primera reducción (en caliente), en el Molino Steckel, obteniendo un espesor mínimo de 0.138". El acabado superficial de un rollo Steckel es más burdo en comparación con uno procesado por la línea de tira, lo que pudiera provocar dificultades en la reducción en frío y afectar la funcionalidad y estética del producto terminado. Posteriormente, se sometió a dos reducciones en frío en el Molino Reversible de 60", con un tratamiento térmico de recocido después de cada reducción, el espesor final al término del procesamiento fue de 0.009". En cada etapa se realizó un análisis microestructural, con lo que pudo comprobarse la calidad del material al cumplir con las características morfológicas requeridas por el cliente, así mismo, se realizaron pruebas de tensión y dureza, con lo que se corroboraron las características mecánicas obtenidas y la funcionalidad del acero para su aplicación en línea blanca.

**Palabras clave:** Molino Steckel, Laminación en Frío, Reducción de Espesor, Línea Blanca.

## Abstract

The presented research work was undertaken in the company Altos Hornos de México S.A.B. de C.V. (AHMSA). The project consisted in the development of a new product starting from a commercial steel grade and processed by an unconventional process route within the steel industry. The new product is intended to be utilized in the production of home appliances and therefore, it must comply with the industry's

norms. The processing route began with an initial reduction (hot rolling) in a Steckel Mill, obtaining a minimum thickness of 0.138". The surface quality of a Steckel coil is rougher in comparison to that obtained by a standard hot strip mill. This roughness can cause complications during the reduction in thickness by cold rolling and also affect the functionality and surface quality of the finished product. Afterwards, the coil was further reduced twice by a 60" Reversible Mill and thermally treated after each reduction, which allowed the coil to achieve a final thickness of 0.009". After each stage, a microstructure analysis was done with which it was possible show that the quality of the material complied with the morphological characteristics required by the customer. Furthermore, tension and hardness tests were carried out in order to validate the obtained mechanical characteristics and the steel's functionality for its application in home appliances.

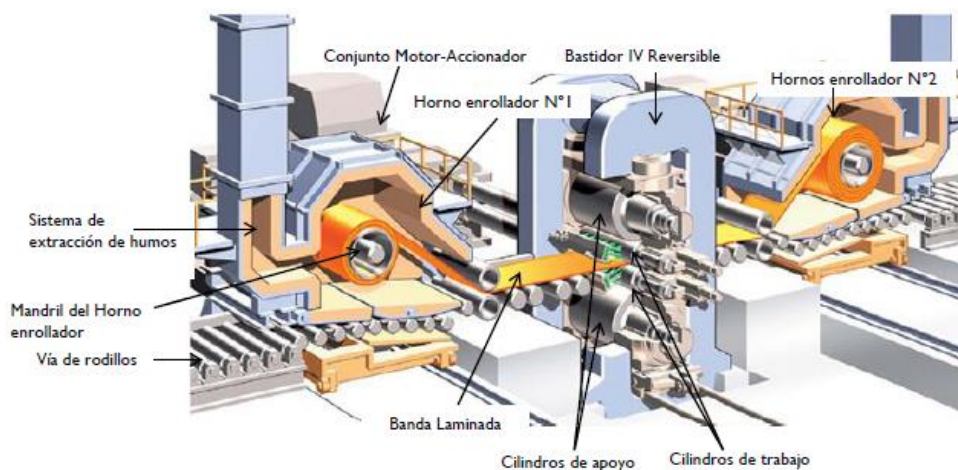
**Keywords:** Steckel Mill, Cold Rolling, Thickness Reduction, Home Appliances.

## Introducción

Altos Hornos de México S.A.B. de C.V. (AHMSA) ha sido uno de los cimientos de la industria siderúrgica nacional durante 77 años, produciendo acero de alta gama para apoyar el crecimiento del país. Es uno de los productores de acero más grandes en México. Su actividad principal es la producción y venta de aceros planos y perfiles estructurales. Cuenta con una extensa cadena industrial, desde la extracción de los minerales de hierro y carbón hasta la producción de diferentes grados de aceros. Todos sus productos terminados son fabricados en una siderúrgica integrada que consiste en dos plantas ubicadas en la ciudad de Monclova en Coahuila de Zaragoza. Actualmente, tiene una capacidad de producción total de 5.5 millones de toneladas anuales de acero líquido. Es líder nacional en la producción y comercialización de aceros planos como lámina rolada en caliente, placa en hoja y en rollo, lámina rolada en frío, hojalata y lámina cromada. Además, tiene como uno de sus activos una línea de perfiles estructurales. En el ámbito nacional, sus productos están orientados a los sectores manufacturero,

construcción, automotriz, petrolero, empaque y línea blanca. En 2006 AHMSA inició el desarrollo del Proyecto Fénix, en el cual se estableció un plan de eficiencia operativa y productiva mediante la modernización de los equipos e instalaciones de producción. Lo anterior con la finalidad de incrementar la capacidad de producción de acero líquido, así como también de producto terminado, principalmente placa de acero. Dentro de los alcances se incluyó la instalación de una línea nueva de placa con Molino Steckel, cuya capacidad es de 1 millón de toneladas por año. Con la incorporación de esta línea se cubre una mayor gama de dimensiones y grados de acero. Esta línea entró oficialmente en operaciones en 2013 (AHMSA, 2019).

El Molino Steckel (ver Figura 1) es un tipo 4 Hi con rodillos horizontales para reducir el espesor, cuenta con un sistema de tornillos bajadores y cápsulas hidráulicas para controlar el espesor (HGC, por sus siglas en inglés), además de rodillos verticales, los cuales son accionados mediante cilindros hidráulicos para el control automático del ancho (AWC, por sus siglas en inglés). Es un tipo único de laminador que consiste en una caja reversible que puede procesar planchones de gran tamaño para producir placa en hoja y en rollo de alta calidad. Esencialmente, es un laminador reversible en donde el espesor del planchón es reducido hasta un espesor final de 0.177" (4.5 mm) para la producción de rollo.

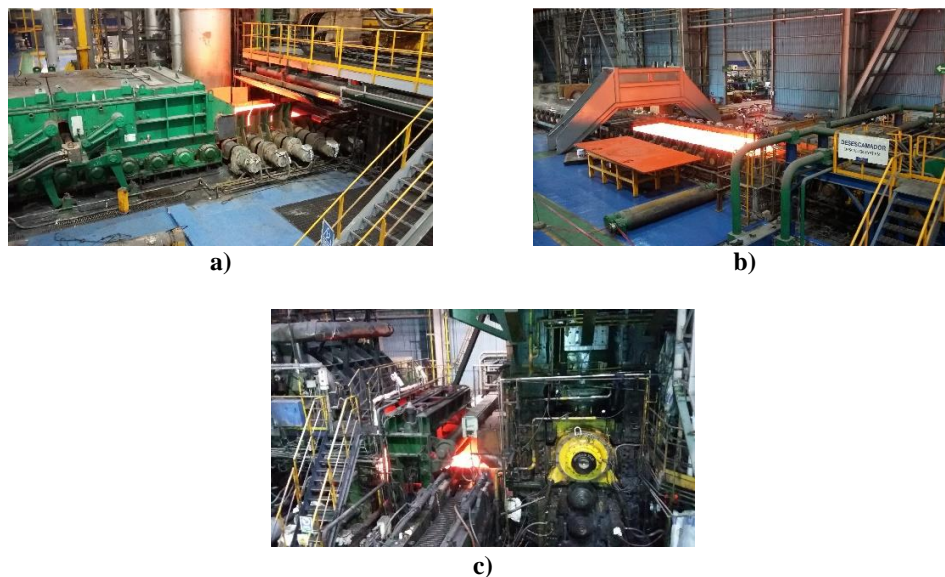


**Figura 1** Ilustración del molino Steckel. Fuente:

<https://jfernandar.files.wordpress.com/2013/08/hierro-acero-guayana-hector-gonzalez.pdf>



En la Figura 2 se presenta una serie de fotografías del molino en operación y en la Tabla 1 se incluyen los datos principales de diseño.



**Figura 2 a)** Salida del planchón, **b)** Sistema de desescamado y **c)** Molino Steckel. Fuente: Elaboración propia.

**Tabla 1** Datos principales del diseño del molino Steckel de AHMSA (Madías, 2017).

<b>Espesores de salida</b>	4.5 – 50 mm
<b>Anchos de salida</b>	1,600 – 3,200 mm
<b>Longitud de salida</b>	6 – 40 m
<b>Fuerza máxima de laminación</b>	80,000 kN
<b>Diámetro de rodillos de trabajo</b>	915 – 1,010 mm
<b>Potencia del motor</b>	2 x 8,000 KW
<b>Esfuerzo de flexión del rodillo</b>	2,500 kN/lado
<b>Velocidad de laminación</b>	0 – 11.0 m/s

La diferencia principal que presenta el Molino Steckel con respecto a otros tipos de laminadores, es que éste dispone de hornos enrolladores a la entrada y salida del laminador (Goli y col., 2013; Hinton y Beynon, 2008; Konovalov y Khokhlov, 2013) para sujetar el acero durante el proceso, en lugar de mesas horizontales de salida. Esto se debe a que la longitud del rollo aumenta considerablemente por los sucesivos pases de laminación. Los hornos enrolladores mantienen todo el cuerpo del rollo a una temperatura controlada durante la operación de laminación (Konovalov y Khokhlov, 2013). Además, ofrecen la posibilidad de obtener piezas de gran peso y una distribución y utilización máxima de las instalaciones.

En la producción de equipos de línea blanca, uno de los puntos importantes es la calidad superficial del acero. Sin embargo, dentro de los inconvenientes que presenta el acero al ser procesado por un Molino Steckel (Almeida y col., 2016; Hinton y Beynon, 2008; Konovalov y Khokhlov, 2013) está relacionado con la calidad superficial.

Existen defectos en la superficie inherentes al proceso de transformación del acero y que siempre estarán presentes en menor o mayor medida. Uno de estos defectos en productos terminados es la escama secundaria, que es una anomalía común de las placas laminadas en caliente. Esta característica es visible en forma de escamas o manchas negras de óxido de hierro que se forman durante el calentamiento del planchón, y que durante el proceso de laminación en caliente se incrustan en el material. En ocasiones, el óxido de hierro se desune del material y, en consecuencia, es posible observar una falta de material en el producto terminado. Este faltante de material es el resultado de la escama generada durante el calentamiento (Chen y Yuen, 2001; Ibarra-Hernández y Duffus, 2008).

El rolado en el Molino Reversible de 60" consiste en pasar hacia delante y hacia atrás el material entre los rodillos de trabajo, dándole varios pases hasta alcanzar el espesor deseado. Para lograr esto, se cuenta con un carrete a la entrada y salida de los rodillos para enrollar y desenrollar la cinta.

Durante este proceso, el rollo de acero adquiere mayor dureza y baja ductilidad porque el trabajo mecánico en frío origina movimiento en la estructura interna del metal, quedando la cinta con esfuerzos internos por la deformación que sufrió en la reducción de espesor. Para eliminar estos esfuerzos, el material debe pasar por un tratamiento térmico de recocido, el cual consiste en un calentamiento rápido seguido de un enfriamiento relativamente lento. El proceso de recocido es esencialmente de recristalización, durante el cual, los granos originalmente deformados alargadamente por el trabajo mecánico son reemplazados por granos normales. La velocidad de crecimiento de estos nuevos granos depende de la temperatura y duración de calentamiento, así como también de la cantidad de deformación previa.

Esta investigación permitirá a AHMSA diseñar y evaluar el proceso de producción de placa en rollo en espesores delgados en la línea de placa Steckel. Además, estudiar la factibilidad de generar una posible ruta alterna para suministrar material a las líneas de laminación en frío, y con ello evitar saturaciones en el programa de producción de la línea de tira de laminación en caliente, que actualmente abastece lo solicitado por laminación en frío.

El conocimiento del comportamiento mecánico, tanto de los grados de acero, específicamente para la placa en rollo, como de los equipos con los que cuenta la línea de placa Steckel, permitirá el diseño de nuevas prácticas de proceso tecnológicamente adecuadas para el desarrollo de nuevos productos, lo que fortalecerá la presencia de AHMSA en los mercados nacional e internacional.

### **Materiales y Métodos**

El material estudiado es un grado de acero comercial, para el cual se estableció un plan de pruebas basado en los requerimientos del sector de línea blanca, con el fin de analizar su evolución microestructural y propiedades mecánicas bajo diferentes condiciones de deformación en caliente y frío, cumpliendo con las especificaciones y estándares de calidad que son requeridos por dicho sector.

Para realizar las pruebas de reducción en frío, se identificaron 4 rollos en inventario. La totalidad de los rollos contaban con una anchura de 72". En la Tabla 2 se presentan las dimensiones y los parámetros de proceso de los rollos Steckel.

**Tabla 2** Parámetros de proceso de los rollos Steckel.

Número de rollo	Dimensiones	Temperatura de acabado (°C)	Temperatura de enrollado (°C)
S5378024	0.138 x 72" (3.5 x 1,828.8 mm)	752	585
S5378025	0.157 x 72" (4 x 1,828.8 mm)	791	613
S5378026	0.157 x 72" (4 x 1,828.8 mm)	785	610
S5638014	0.173 x 72" (4.4 x 1,828.8 mm)	797	611

Los rollos debieron ser fraccionados al centro del ancho, a fin de cumplir con el tamaño permisible por los equipos de las líneas de laminación en frío, obteniendo en total 8 secciones de aproximadamente 36" cada una. En la Figura 3 se presentan algunas fotografías de los rollos en el área de patios.



**Figura 3** Ubicación de los rollos en el área de patios.



Para la ejecución de las pruebas, se tomó como referencia un pedido regular de un cliente externo (ver Tabla 3).

**Tabla 3** Características del pedido de referencia.

<b>Material</b>	Black plate con aceite
<b>Espesor</b>	0.009"
<b>Ancho</b>	34.5"
<b>Acabado</b>	Mate con aceite

Para ello, se generó un pedido interno en sistema para darle un seguimiento adecuado a los 8 rollos Steckel durante las pruebas en reducción en frío. Posteriormente, les fue asignado un número provisional de la línea de tira (ver Tabla 4), para luego aplicarlos al pedido interno generado y poder realizar las pruebas de reducción. Esta acción se realizó, debido a que la ruta de enlace entre las líneas de Molino Steckel y laminación en frío actualmente no está dada de alta en el sistema.

**Tabla 4** Medidas de espesor y ancho de los 8 rollos Steckel.

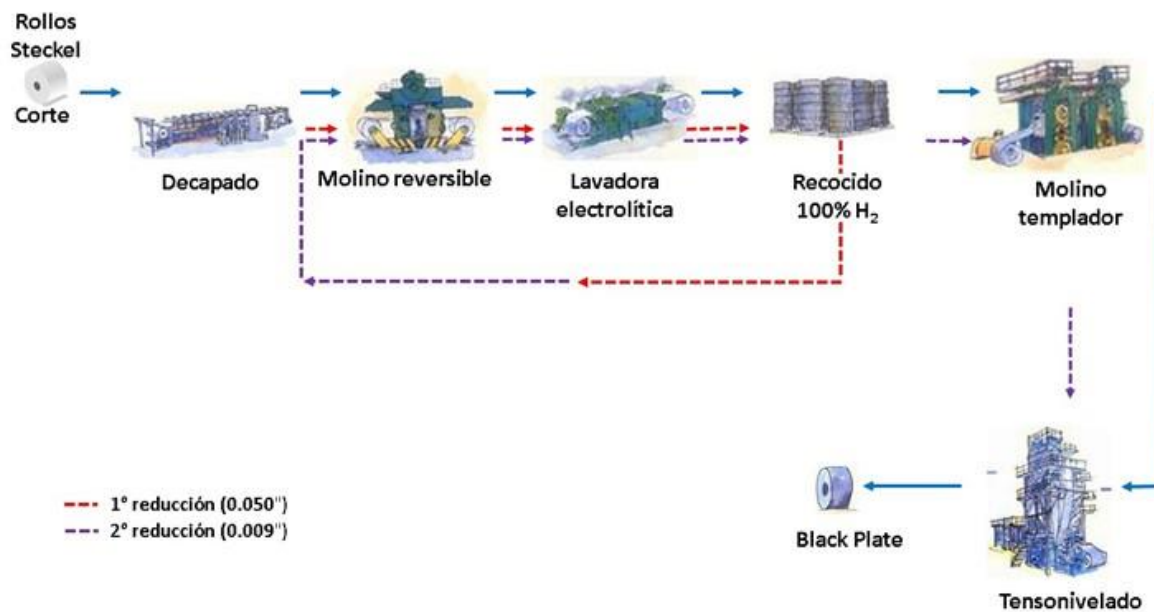
ROLLO	NÚMERO ROLLO TIRA	ESPESOR		ANCHO	
		pulgadas	mm	pulgadas	Mm
S5378024-A	5378-600	0.138	3.5	36.25	921
S5378024-B	5378-601				
S5378025-A	5638-602	0.157	4	36.375	924
S5378025-B	5638-603				
S5378026-A	5378-604	0.157	4	36.25	921
S5378026-B	5378-605				
S5638014-A	5378-606	0.173	4.4	36.75	933
S5638014-B	5378-607				

El procedimiento experimental consistió de 2 etapas de procesamiento, esto debido a que el grado de deformación en una sola etapa es muy alto, y existe el riesgo de fractura por el efecto de endurecimiento por la alta deformación aplicada. Para evitar

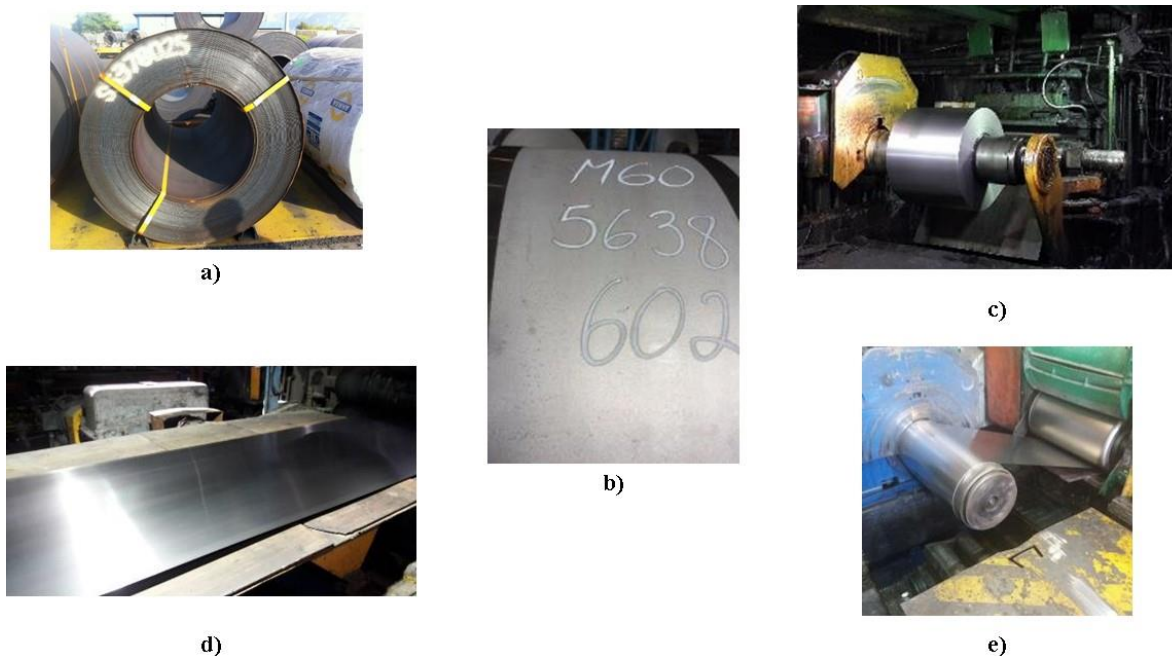
esto, el material debe pasar por un proceso intermedio de recocido. La primera etapa incluyó decapado, reducción en el Molino Reversible de 60" (espesor final entre 0.040 y 0.050" aproximadamente), lavado y por último recocido en atmósfera 100% H<sub>2</sub> (Batch Annealing). La segunda etapa consistió de reducción en el Molino Reversible de 60" (espesor final de 0.009"), lavado, recocido en atmósfera 100% H<sub>2</sub> (Batch Annealing), templado y tensonivelado.

Los parámetros de trabajo definidos para el procesamiento del material fueron obtenidos de otros productos de línea que maneja la empresa, y que son utilizados en la producción de aparatos de línea blanca.

En la Figura 4 se muestra un diagrama de la ruta de proceso de los 8 rollos Steckel en la línea de laminación en frío, y en la Figura 5 se presenta una serie de fotografías de los rollos durante el proceso.



**Figura 4** Ruta de proceso de los 8 rollos Steckel en la línea de laminación en frío.



**Figura 5** Fotografías de los rollos durante el proceso en la línea de laminación en frío; **a)** Rollo Steckel, **b)** Decapado, **c)** Reducción en frío, **d)** Lavado y **e)** Templado.

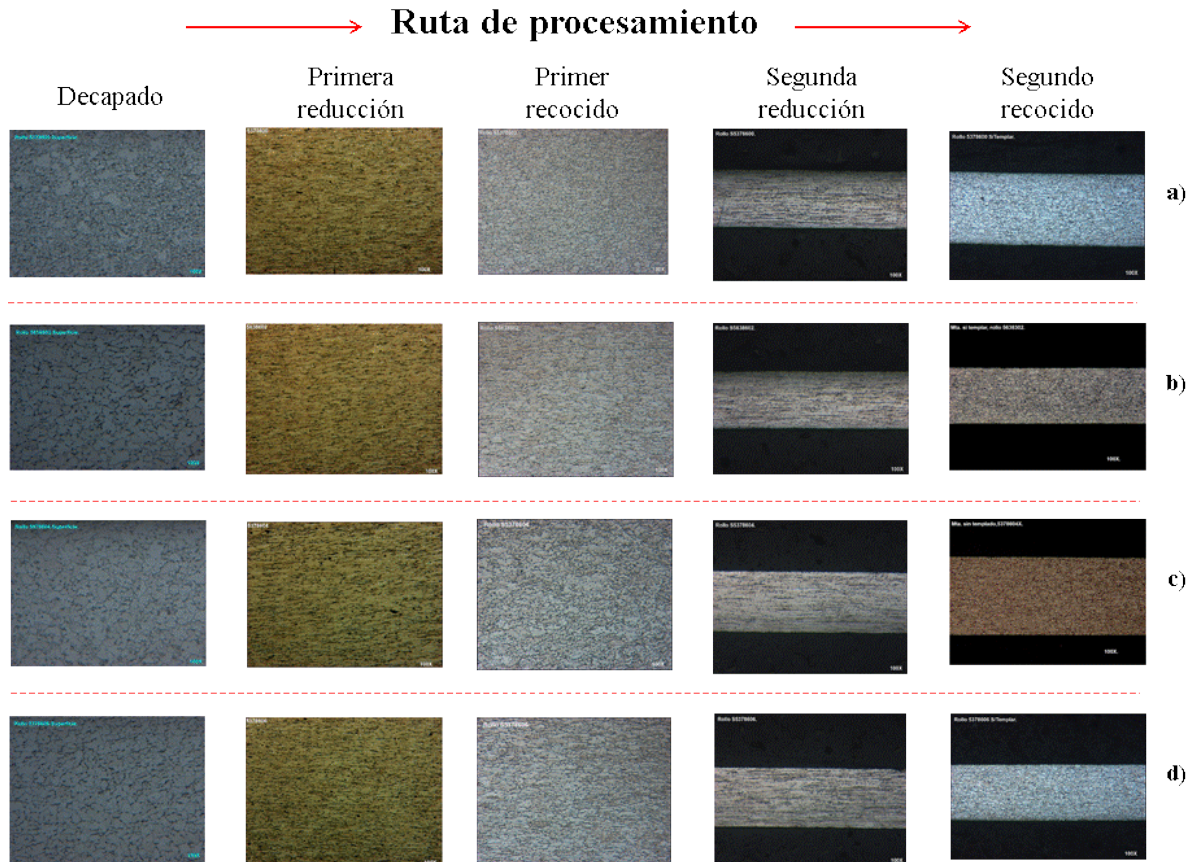
## Resultados y Discusión

Esta sección se presenta en dos partes, inicialmente se muestra la caracterización microestructural y posteriormente la caracterización mecánica.

### *Caracterización microestructural*

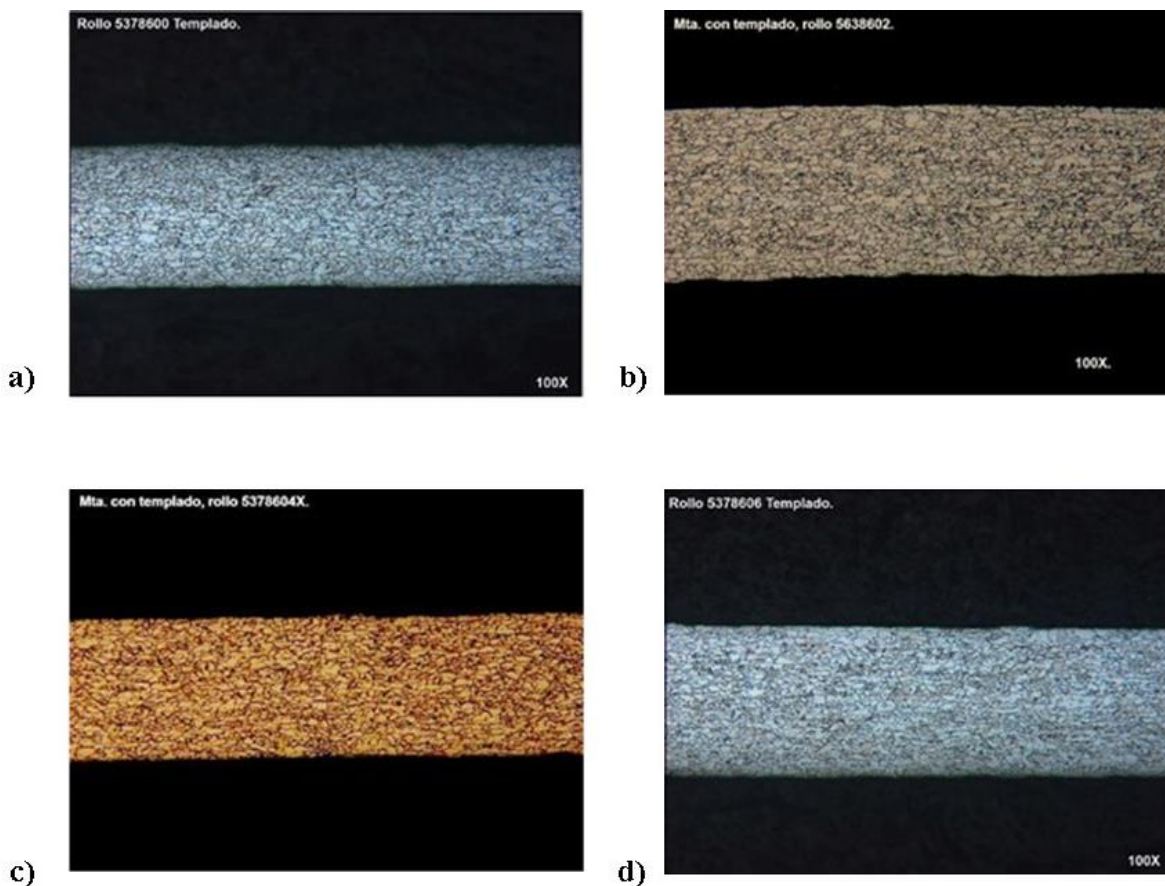
Con el objetivo de lograr comparar la estructura inicial del material contra las encontradas después de las pruebas mecánicas y tratamientos térmicos definidos al iniciar esta investigación, se obtuvieron micrografías de cada una de las etapas del proceso. Para ello, se utilizaron microscopios ópticos marca Nikon Epiphot 200 y Olympus Leco PMG3.

Las Figura 6 y 7 muestran la evolución microestructural que sufrió el acero tratado.



**Figura 6** Micrografías ópticas a 100X de los rollos; **a)** 5378-600, **b)** 5638-602, **c)** 5378-604 y **d)** 5378-606.





**Figura 7** Micrografías ópticas a 100X de los rollos (producto terminado); **a)** 5378-600, **b)** 5638-602, **c)** 5378-604 y **d)** 5378-606.

De izquierda a derecha, en la Figura 6 se muestra la microestructura obtenida de la reducción en caliente (una vez decapada), en la cual puede observarse la presencia de granos equiaxiales de la fase ferrítica. Como se mencionó anteriormente, una vez decapado el material pasa en dos ocasiones por un proceso de reducción en frío y un tratamiento térmico de recocido. Los rollos de acero al ser laminados en los molinos de reducción adquieren mayor dureza y baja ductilidad, debido a que el trabajo mecánico en frío origina movimiento en la estructura interna del material, quedando la cinta con esfuerzos internos causados por la deformación provocada por la reducción de espesor (obteniéndose un material endurecido); mientras que el recocido de un material endurecido por el trabajo mecánico, consiste en un

calentamiento rápido seguido de un enfriamiento relativamente lento. El proceso de recocido es esencialmente de recristalización, durante el cual, los granos originalmente deformados (alargados) por el trabajo mecánico son reemplazados por granos normales, la velocidad de crecimiento de estos nuevos granos depende de la temperatura y duración de calentamiento, así como también de la cantidad de deformación previa. Por lo tanto, en la micrografía correspondiente a la primera reducción, puede observarse el alargamiento de los granos mostrados en la micrografía del decapado. Dichos granos alargados disminuyen su tamaño (recristalizan) mediante el primer recocido, tal como puede observarse en la micrografía correspondiente. Posteriormente, el material es nuevamente reducido, por lo que se adquiere nuevamente una estructura alargada (deformada y endurecida) mostrada en la micrografía de la segunda reducción. Esta estructura se homogeniza y recupera durante el segundo tratamiento térmico de recocido. Como se mencionó anteriormente, este doble procesamiento se llevó cabo, debido a que el grado de deformación en una sola etapa es muy alto, y existe el riesgo de fractura por el efecto de endurecimiento por la alta deformación aplicada, por lo tanto, para evitar esto, el material debe pasar por un proceso intermedio de recocido.

Posterior al segundo recocido, se lleva a cabo un proceso de temple en el Molino Templador, cuyo objetivo es dar al material la forma y las propiedades mecánicas adecuadas según su uso, además de controlar la planeza y dar el acabado superficial final al material. La Figura 7 muestra los resultados de metalografía obtenidos del análisis de las muestras correspondientes a esta parte del proceso. En esta imagen puede observarse que no existe un cambio significativo en la microestructura con respecto a la mostrada en el segundo recocido, debido a que este proceso se enfoca en reducir los esfuerzos producido por el tratamiento de recocido del material. La última parte de esta etapa es el tensonivelado, cuya finalidad es eliminar los defectos de forma, por lo que no se consideró necesario el análisis metalográfico.

### Caracterización mecánica

En la Tabla 5 se muestran los resultados de la caracterización mecánica. Para la pruebas de tensión y dureza, se utilizaron una máquina de ensayo de tensión marca Tinius Olsen Super L-120 y un durómetro marca Wilson Rockwell 2000, respectivamente.

**Tabla 5** Resultados de la caracterización mecánica.

ROLLO	ESPESOR		LÍMITE ELÁSTICO (lb/plg <sup>2</sup> )	ÚLTIMA TENSIÓN (lb/plg <sup>2</sup> )	% ELONGACIÓN	DUREZA (HRB)
	Pulgadas	mm				
5378-600	0.009	0.223	37,248	50,645	34.2	54.07
5378-601			34,852	50,362	34.5	53.03
5638-602			38,238	51,568	31.9	58.93
5638-603			38,814	51,408	32.0	58.33
5378-604			39,570	51,634	31.7	58.53
5378-605			37,174	50,783	34.1	57.87
5378-606			37,811	51,547	31.3	55.70
5378-607			36,386	47,189	37.8	54.97

Las propiedades microestructurales y mecánicas obtenidas estuvieron dentro del rango especificado por el cliente, con lo que se validó el proceso alternativo de producción.

Finalmente, se realizó una visita al cliente para conocer la funcionalidad de los rollos con ruta de proceso por molino Steckel y laminación en frío, con respecto a la calidad superficial y comportamiento del material durante la producción de piezas, por medio de troquelado para la manufactura de productos de línea blanca y otros productos.

Se efectuó un recorrido por la planta donde se observaron las máquinas de troquelado que estaban, en ese momento, procesando el material suministrado por AHMSA. Se conversó con los operarios y el gerente de planta sobre la funcionalidad

del material, y confirmaron que no se presentó ningún problema en el troquelado de las piezas y procesos posteriores.

## **Conclusiones**

### *Proceso en planta*

- La pérdida de rendimiento fue alta debido al espesor del rollo Steckel, el cual requirió doble reducción en frío con tratamiento intermedio de recocido (Batch Annealing) para obtener el espesor final de 0.009".
- No hubo afectación en las propiedades microestructurales y mecánicas, ni tampoco en la calidad superficial derivada por el acabado burdo de los rollos Steckel.
- De acuerdo a las especificaciones establecidas por el cliente, la calidad superficial y las propiedades microestructurales y mecánicas resultaron dentro del rango requerido y, por lo tanto, validan al material para su utilización en productos de línea blanca.
- Generación de una posible ruta alterna de suministro de material para las líneas de laminación en frío.

### *Cliente final*

- El acero suministrado por AHMSA cumplió con los requerimientos de calidad superficial y propiedades mecánicas para la obtención de piezas por troquelado.

## **Recomendaciones**

- Para evitar demoras en producción y problemas mecánicos durante el proceso en frío, es recomendable reducir el espesor del rollo procesado en la línea de placa Steckel alrededor de un 25%.

## **Agradecimientos**



Los autores agradecen sinceramente al Instituto de Innovación y Transferencia de Tecnología de Nuevo León – I2T2, al Consejo Estatal de Ciencia y Tecnología del Estado de Coahuila – COECYT y al Fondo Institucional de Fomento Regional para el Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación – FORDECYT (proyecto apoyado por el FORDECYT 273496).

### Referencias

AHMSA, Altos Hornos de México S.A.B. de C.V. <https://www.ahmsa.com/>.  
Fecha de consulta: 25 de noviembre de 2019.

Almeida, W., Rodrigues, H., Rebellato, M., Bastos, F. & Barbosa, R. (2016). Modelling Microstructure Evolution during Hot Rolling of HSLA Steels in a Steckel Mill. En: *HSLA Steels 2015, Microalloying 2015 & Offshore Engineering Steels 2015*. 335-341.

Chen, R.Y. & Yuen, W.Y.D. (2001). Oxide-Scale Structures Formed on Commercial Hot-Rolled Steel Strip and Their Formation Mechanisms. *Oxidation of Metals*. 56(1-2): 89-118 <https://doi.org/10.1023/A:1010395419981>

Goli-Oglu, E.A. & Morozov, Y.D. (2013). Effectiveness of One-, Two-, and Three-Cell Steckel Mills in the Thermomechanical Treatment of Microalloyed Steel. *Steel Transl.* 43(8):520-523. <https://doi.org/10.3103/S0967091213080032>

Hinton, J.S. & Beynon, J.H. (2008). A Laboratory Steckel Mill Simulation. *Steel Research International*. 79(4): 278-286. <https://doi.org/10.2374/SRI07SP060-79-2008-278>

Ibarra-Hernández, E.V. & Duffus Scott A.B. (2008). Defectos en Planchas Laminadas de Acero Utilizadas en la Fabricación de Domos para Calderas de Vapor en la Industria Azucarera, en *Revista Centro Azúcar*. [En línea]. Disponible en: <http://centroazucar.uclv.edu.cu/media/articulos/PDF/2008/3/11.pdf>. Fecha de consulta: 25 de noviembre de 2019.

Konovalov, Y.V. & Khokhlov, A.S. (2013). Benefits of Steckel Mills in Rolling. *Steel Transl.* 43(4):206-211. <https://doi.org/10.3103/S0967091213040062>

Madias, J. (2017). Nuevas plantas latinoamericanas. *Acero Latinoamericano.* 562:28-43.