

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL EN ACEROS
PREPINTADOS EMBOZADOS CON REDUCCIÓN DE ESPESOR.**

Por

Ing. Joel Madrigal Torres

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

AGOSTO, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA ESTRUCTURAL EN ACEROS
PREPINTADOS EMBOZADOS CON REDUCCIÓN DE ESPESOR.**

Por

Ing. Joel Madrigal Torres

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES**

AGOSTO, 2025

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
Posgrado

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis "**Análisis de la resistencia estructural en aceros prepintados embozados con reducción de espesor**", realizada por el estudiante Joel Madrigal Torres, con número de matrícula 2173604, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Materiales.

El Comité de Evaluación de Tesis

Dr. Moisés Hinojosa Rivera
Director

Dr. Luis Adolfo Leduc Lezama
Revisor

Dr. Rafael David Mercado Solís
Revisor

Dr. Jorge Adrián Aldaco Castañeda
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



Institución 190001

Programa 551546

Acta Núm. 4534

Ciudad Universitaria, a 26 de agosto de 2025.

Agradecimientos

Inicialmente agradecido con Dios quien es mi fortaleza y está siempre presente en todas las oportunidades, logros y fracasos del día a día. Agradezco a mis padres y hermanos quienes siempre me brindan su soporte y motivación para superarme.

A Ternium México que me ofreció la oportunidad de desarrollarme profesionalmente mediante el otorgamiento de una beca académica para realizar esta maestría actuando como puente institucional con la Universidad Autónoma de Nuevo León. Asimismo, agradezco la disposición del personal de laboratorio y el acceso a los equipos necesarios para llevar a cabo los estudios requeridos en esta investigación.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por brindarme la formación académica con profesores de alto nivel quienes siempre mostraron profesionalismo, y apertura.

Índice

Declaración de autenticidad	7
Resumen.....	11
i. Introducción	13
ii. Hipótesis	14
iii. Objetivos.....	15
Objetivo general	15
Objetivos específicos	15
Capítulo 1.- Marco teórico	16
1.1 Aceros prepintados embozados.....	16
1.2 Laminación en caliente	19
1.3 Laminación en frío	21
1.4 Recocido batch	22
1.5 Recocido continuo.....	23
1.6 Características superficiales	24
1.7 Aceros recubiertos.....	25
1.8 Recubrimientos de zinc	25
1.8.1 Resistencia a la corrosión.....	26
1.9 Pintado	27
1.10 Propiedades mecánicas	28
1.10.1 Propiedades mecánicas y su importancia en el acabado superficial.	29
1.11 Formabilidad de las láminas de acero.	32
1.11.1 Propiedades mecánicas y formabilidad.	33
1.11.2 Correlación entre microestructura y formabilidad	40
1.11.3 Efecto de los recubrimientos metálicos y la formabilidad.	41
1.11.3 Ensayos para evaluar formabilidad	42
Capítulo 2.- Revisión del estado del arte	46
2.1 Introducción	46
2.2 Análisis de estudios.....	47
2.3 Síntesis del estado del arte	52
Capítulo 3.- Desarrollo experimental.....	55
3.1 Secuencia de fabricación.....	55
3.2 Muestreo.....	56
3.3 Ensayos mecánicos.....	57

3.4 Modelación y simulación	61
Capítulo 4.- Análisis y discusión de resultados	62
4.1 Ensayo de tensión.....	62
4.1.1 Probeta lisa	62
4.1.2 Probeta embozada	67
4.1.3 Análisis comparativo de las probetas lisas y embozadas.	68
4.2 Microdureza Vickers	73
4.3 Tamaño de grano	75
4.4 Modelación y simulación	79
Capítulo 5.- Conclusiones y recomendaciones	83
Referencias	85

Declaración de autenticidad

Declaro solemnemente que he preparado este documento siguiendo las mejores prácticas nacionales e internacionales. Contiene material original generado y redactado por mí. También contiene material parafraseado o entrecomillado, que por ser de otras personas se incluye dando el debido reconocimiento, citando las fuentes documentales correspondientes.

San Nicolás de los Garza, septiembre de 2025



Joel Madrigal Torres

Índice de Tablas

Tabla 1. Efecto de protección de los sistemas galvanizados/pintados en exposición atmosférica, * la vida de servicio es definida como el tiempo en el que se alcanza el 5% de óxido rojo (Leonard, 2005).....	27
Tabla 2. Rangos de propiedades mecánicas típicas no mandatorias de acuerdo a ASTM A653 para aceros galvanizados por inmersión en caliente y a ASTM A1008 para aceros fríos recocidos *E sin propiedades mecánicas típicas establecidas. (A653, 2020) y (A1008, 2015).....	29
Tabla 3. Materiales muestreados diferenciados en espesor manteniendo grado, % de reducción y profundidad de embozado para todos los casos.	56
Tabla 4. El análisis químico reportado para la colada representativa de cada rollo, tratándose para todos los casos de acero de bajo carbono comercial.	57
Tabla 5. Ensayos, normas de referencia internacionales y equipos utilizados para el plan de experimentos.	57
Tabla 6. Referencia internacional bajo ASTM E8 tomada en cuenta para preparación dimensional de probeta embozada.	60
Tabla 7. Resultados de propiedades mecánicas como probeta lisa.	63
Tabla 8. Resultados de propiedades mecánicas de acero grado comercial embozado	68

Índice de Figuras

Figura 1. Diferentes colores y patrones de embozado disponibles para el acero prepintado (EPC, 2022)	17
Figura 2. Representación del proceso de embozado	17
Figura 3. Rutas de proceso principales para la fabricación de aceros prepintados embozados destinados a uso final de línea blanca.....	19
Figura 4. Generalidades del proceso de laminación en caliente	21
Figura 5. Curvas de extensión de carga para chapa de acero que tienen el mismo límite elástico, pero diferente comportamiento característico. a) Acero recocido, El límite elástico es la tensión más baja medida durante el alargamiento del punto de fluencia. b) Acero con borde ligeramente laminado templado. Acero laminado templado con bajo contenido de carbono. El límite elástico se calcula a partir de la carga con un desplazamiento del 0,2% (c) o de la carga con una extensión del 0,5% (d). e) Acero con borde elástico debido al envejecimiento a temperatura ambiente durante varios meses. El límite elástico es la tensión más baja medida durante el alargamiento del punto de fluencia. (Granzow W. , 2005)	34
Figura 6. La deformación mayor ϵ , en la región crítica de una pieza formada, se distribuye de manera más uniforme para el acero que tiene el valor más alto de n. Una de estas dos partes (que son idénticas excepto por el valor n del acero seleccionado) se tensó hasta el punto de un adelgazamiento excesivo; el otro, hecho de acero con el valor de n más alto, no mostró inclinación a fracturarse. (Granzow W. , 2005)	39
Figura 7. Curva esfuerzo-deformación para aceros de bajo carbono, se muestran zonas de interés durante la prueba de tensión.....	39
Figura 8. Representación esquemática de la prueba de torsión	44
Figura 9. Región doblada donde se definen las direcciones de los principales esfuerzos y deformaciones en el ensayo de flexión.....	45
Figura 10. Secuencia de fabricación y experimentación.	55
Figura 11. Probeta de tensión embozada con dimensiones basadas en ASTM E8....	59
Figura 12. Variación de la resistencia a la cedencia, σ_y , con respecto al cambio de espesor en probeta lisa.	64
Figura 13. Variación de la resistencia a la tensión, σ_{UTS} , con respecto al cambio de espesor en probeta lisa.	64
Figura 14. Variación del % de elongación con respecto al cambio de espesor en probeta lisa.....	65
Figura 15. Variación del valor n con respecto al cambio de espesor en probeta lisa.	65
Figura 16. Variación del porcentaje de elongación con respecto al cambio de espesor en probeta lisa utilizando datos históricos.....	66
Figura 17. Probeta embozada posterior a ensayo de tensión, comportamiento normal de falla por esfuerzo cortante a 45° observado para todos los materiales ensayados.....	67
Figura 18. Variación comparativa entre probeta embozada y lisa de la resistencia a la cedencia, σ_y , contra espesor de probeta	71
Figura 19. Variación comparativa entre probeta embozada y lisa del % de elongación contra espesor de probeta.	71

Figura 20. Variación comparativa entre probeta embozada y lisa de la resistencia a la tensión, σ_{UTS} , contra espesor de probeta.	72
Figura 21 Variación comparativa entre probeta embozada y lisa del valor n contra espesor de probeta.	72
Figura 22 Distribución de microdureza Vickers entre probeta lisa y embozada para los espesores 0.37, 0.45 y 0.5 mm. Se muestran los valores de acuerdo con la zona de indentación: inferior, centro y superior.	74
Figura 23. Micrografías de microdureza Vickers realizadas en corte transversal, huellas de indentación señaladas en azul. Por muestra se realizaron 5 indentaciones por cara: superior, centro e inferior.....	75
Figura 24. Tamaño de grano promedio comparativo entre probeta lisa y embozada para los espesores 0.37, 0.45 y 0.5 mm	78
Figura 25. Componentes del gabinete considerados para modelación: Carcasa en U con espesor variable, espuma interior de poliuretano, respaldo y fondo de gabinete.	79
Figura 26. Desplazamiento total en mm contra espesor (mm)	80
Figura 27. Resultado de simulación para espesor 0.45 mm observando el desplazamiento total en mm considerando carga de 3,800 lb (1723.65 kg).....	81
Figura 28. Esfuerzo de von Mises (MPa) contra el espesor (mm).....	81
Figura 29. Resultado de simulación para el espesor de 0.45 mm, observando el esfuerzo de von Mises, considerando una carga de 3,800 lb (1723.65 kg).	82

Resumen

En las operaciones de plegado de gabinetes para productos de línea blanca, se emplean como materia prima aceros prepintados y embozados con espesores que varían entre 0.35 y 0.50 mm. La técnica de embozado se utiliza principalmente con fines estéticos, ya que proporciona un acabado con un patrón característico en la superficie, además de contribuir al endurecimiento de las láminas, mejorando sus propiedades mecánicas. Este aumento en la resistencia se logra gracias al endurecimiento por deformación superficial y a los esfuerzos residuales inducidos durante el proceso de embozado. Según diversos estudios realizados en diferentes aceros y metales, las propiedades mecánicas que experimentan mayores cambios son la resistencia a la cedencia y el porcentaje de elongación. Al inducir trabajo en frío en las láminas, se amplía la ventana de procesamiento, lo que reduce efectos indeseados como pandeamiento, arrugas y pliegues, mejorando así el desempeño final al absorber de manera más eficiente las cargas de compresión por apilamiento y los impactos durante el manejo.

Con el objetivo de determinar la influencia del cambio de espesor y el efecto de la deformación superficial sobre las propiedades mecánicas, en este estudio se analizaron aceros comerciales de bajo carbono (aproximadamente 0.08 % en peso), fabricados bajo porcentajes de reducción y prácticas metalúrgicas estándar, con espesores entre 0.35 y 0.50 mm. Se caracterizaron sus propiedades mecánicas antes y después del proceso de embozado mediante ensayos de tensión y mediciones de microdureza Vickers. Además, se realizó una caracterización microestructural mediante microscopía óptica.

Adicionalmente, se llevó a cabo la modelación y simulación por elementos finitos de una estructura típica utilizada en refrigeradores, con el fin de explorar su comportamiento mecánico, evaluando el porcentaje de desplazamiento y el esfuerzo de von Mises para distintos espesores bajo una carga de compresión equivalente al peso por apilamiento habitual de hasta tres refrigeradores.

Los resultados indican que el embozado induce un incremento en la resistencia a la cedencia proporcional al espesor de las probetas, con aumentos del 4.8 % para los espesores menores (0.36 mm) y hasta un 18 % para el espesor mayor (0.50 mm). Este endurecimiento se acompaña de una disminución en la ductilidad, ya que el porcentaje de elongación disminuye un 24 % para el espesor más delgado y un 19 % para el más grueso; sin embargo, esta reducción no supera los límites de especificación que solicitan los clientes para este tipo de grados de acero. Por otro lado, la dureza Vickers no presenta cambios significativos para el espesor menor (0.37 mm), mientras que para el espesor de 0.50 mm se observa un incremento de hasta 20 puntos Vickers. Estos resultados evidencian el efecto de endurecimiento provocado por la deformación local durante el embozado.

Finalmente, el modelo de elementos finitos confirma la influencia del espesor en la capacidad de carga de este tipo de gabinetes utilizados en línea blanca, subrayando la necesidad de incrementar la resistencia a la cedencia en los espesores más delgados, dado que los esfuerzos de von Mises son mayores en estos casos, lo que indica una mayor susceptibilidad a la deformación plástica.

i. Introducción

Las hojas de lámina prepintada embozada se utilizan como pieza estética en las carcasas expuestas del refrigerador y otros productos de línea blanca, abarcando más del 50% del área lateral y superior del equipo, esto se traduce en una alta demanda de este tipo de materiales distinguiéndose principalmente por el color y patrón de embozado en función al diseño requerido por el cliente.

El análisis de estructuralidad contra la reducción de espesor de este tipo de aceros es un tema de relevancia en ingeniería estructural y de materiales debido a que, a lo largo del tiempo, la industria de línea blanca se ha enfocado en incrementar los ahorros de energía y recursos a través de la reducción del costo y peso de los productos de lámina de acero con el fin de incrementar su productividad.

Recientemente, una gran cantidad de componentes utilizados en la industria de línea blanca y aires acondicionados (HVAC) se han estado reemplazando por material con espesor reducido por la ligereza que representa, aunado a que al ser un rollo más largo se obtiene mayor cantidad de piezas por tonelada, que finalmente se traduce en más refrigeradores, estufas, gabinetes, y/o lavadoras. Es importante destacar que la resistencia y rigidez de estos aceros más delgados tiende a disminuir afectando directamente a la capacidad de carga y la resistencia estructural de los componentes por lo que debe existir una compensación que no comprometa el diseño estructural de la aplicación final evitando a toda costa la disminución del rendimiento estructural y erradicar el riesgo de falla por debilidad estructural, pandeamiento o maltrato durante el manejo y almacenaje así como dificultades en el proceso de conformado por generación de arrugas, pliegues o grietas. Con el fin de equilibrar esta condición de espesor delgado, existen diversas alternativas como otros grados de acero,

procesos de manufactura, tratamientos térmicos y/o diseño estructural en donde siempre se debe poner por delante la relación costo-beneficio.

ii. Hipótesis

La aplicación del embozado al acero que se emplea en gabinetes de productos de línea blanca puede compensar la pérdida de propiedades mecánicas de una lámina lisa con espesor más delgado, ya que esta disminución de espesor puede influir en la capacidad de formado de la materia prima, aumentando el riesgo de arrugas, pliegues o deformaciones no deseadas durante el proceso de conformado o hacer susceptible el gabinete a maltrato por abolladuras durante traslado o almacenaje afectando su resistencia estructural y demeritando la calidad percibida por el cliente final.

iii. Objetivos

Objetivo general

Aportar conocimiento que contribuya a optimizar la resistencia estructural de aceros prepintados embozados con reducción de espesor.

Objetivos específicos

- Elucidar el comportamiento de los aceros prepintados embozados con reducción de espesor bajo cargas de tracción para prevenir posibles modos de falla.
- Cuantificar el efecto de deformación superficial producida por el embozado sobre las propiedades mecánicas en la lámina.
- Determinar el posible efecto del trabajo mecánico superficial sobre la microestructura del acero estudiado.
- Predecir, mediante modelación y simulación, los límites de resistencia estructural, bajo cargas estáticas, de gabinetes fabricados con el acero embozado de espesor reducido.

Capítulo 1.- Marco teórico

1.1 Aceros prepintados embozados

Se trata de un producto final utilizado como materia prima en las industrias de línea blanca y HVAC que puede ser entregado en forma de rollo, hojas o cintas en una amplia gama de anchos abarcando desde los 600 mm a 1200 mm y espesores de 0.3 mm a 0.5 mm. El sustrato de este tipo de aceros puede ser de dos tipos los cuales parten inicialmente de lámina caliente decapada: lamina fría recocida tensonivelada o lámina galvanizada. Cualquiera que sea el sustrato posteriormente es llevado a un proceso de prepintado. Finalmente, la lámina pintada base fría o galvanizada se lleva al proceso de embozado dónde por medio de rodillos se le imprime el patrón característico tipo piel sobre la superficie.

Como se ilustra en la figura 2, el embozado es un proceso de estampado para generar patrones o relieves pasando la lámina de acero entre rodillos de acero forjado con alto contenido de carbono estampados con el patrón deseado con una profundidad de patrón de 0.05 mm. Es un proceso continuo y no conlleva una reducción del espesor de la lámina.

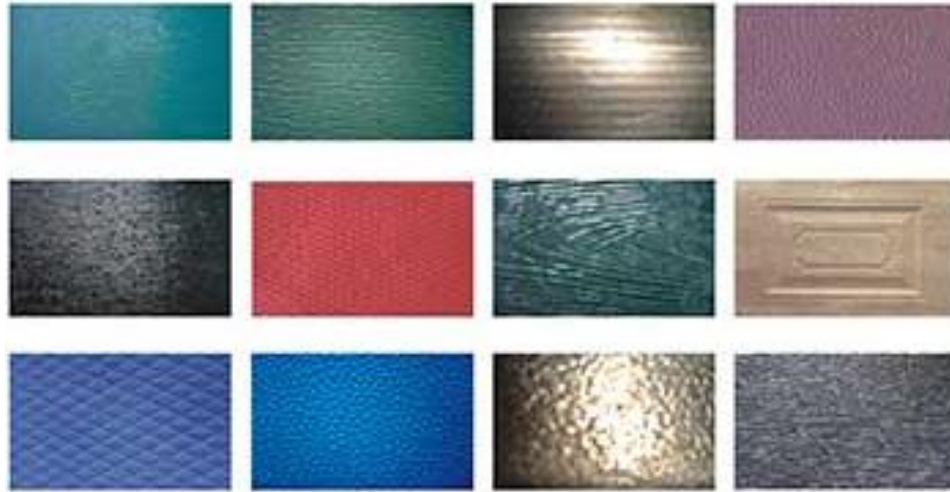


Figura 1. *Diferentes colores y patrones de embozado disponibles para el acero prepintado (EPC, 2022)*

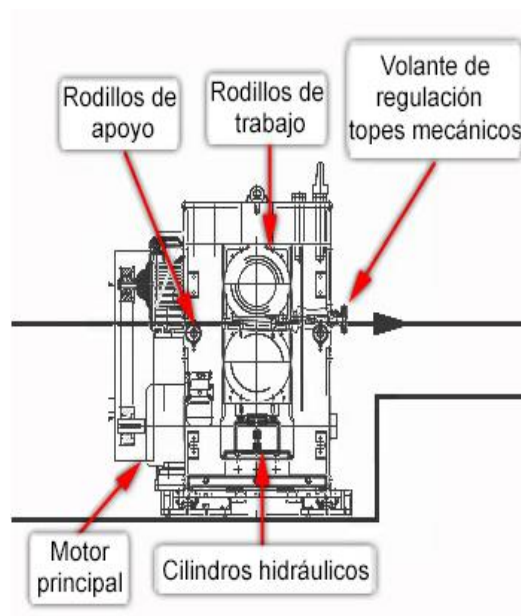


Figura 2. *Representación del proceso de embozado*

Los aceros embozados son ideales para clientes que buscan un acabado estético o bien para mejoras funcionales en el producto. El embozado puede ayudar a dispersar los líquidos rápidamente, reduce la fricción y la estática, refuerza la rigidez del panel metálico, aumenta la superficie metálica para la transferencia acústica o de calor y mejora la tracción. Las aplicaciones que utilizan lámina embozada incluyen: paneles de electrodomésticos, productos de construcción, paneles de ascensor, paneles de puerta de garage, adornos automotrices, muebles de oficina metálicos, entre otros.

1.1.1 Ruta de fabricación de aceros prepintados embozados

Como se ilustra en la Figura 3, las dos alternativas de ruta de fabricación para este tipo de aceros destinados a línea blanca se dividen a partir del proceso de laminación en frío. El tipo de sustrato elegido dependerá principalmente de la aplicación final o resistencia a la corrosión esperada. Posterior a la ruta de galvanizado o ruta frío recocido, el material se destina a su proceso de prepintado para finalmente embozarlo. El presente estudio se enfoca en los aceros prepintados con sustrato “RFR” que indica rollo frío recocido.

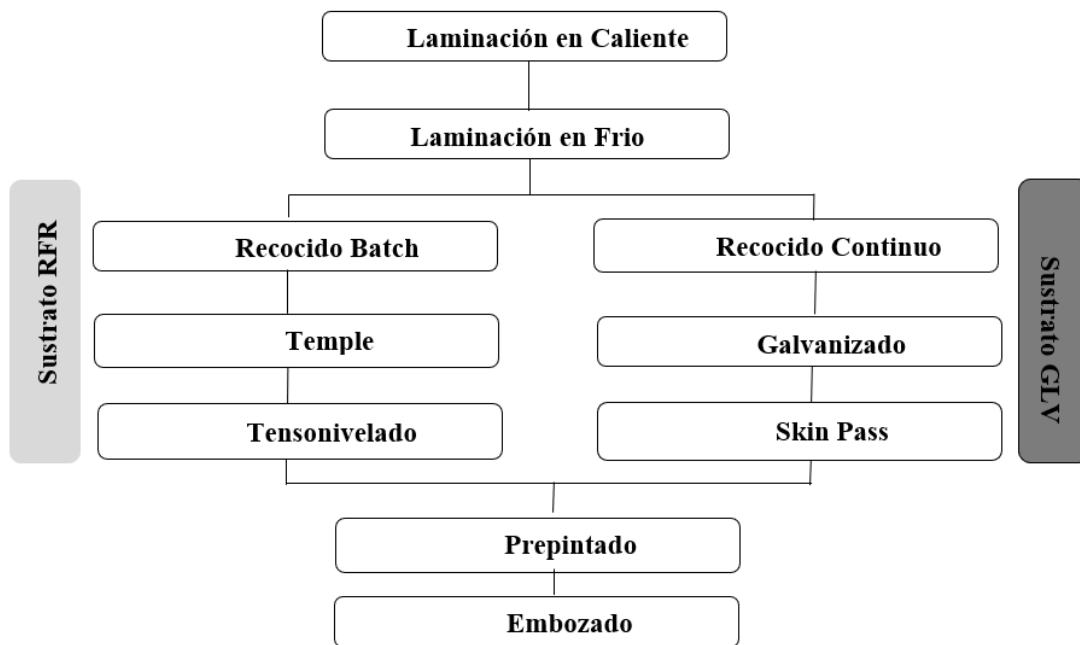


Figura 3. *Rutas de proceso principales para la fabricación de aceros prepintados embozados destinados a uso final de línea blanca.*

1.2 Laminación en caliente

Entre los pasos iniciales para el procesamiento de los aceros prepintados embozados se encuentra la laminación en caliente que se realiza al acero en la fase austenítica γ . El acero es plástico y particularmente maleable en las temperaturas que se emplean, en el rango de 1200°C, hasta los 800°C. Esto permite grandes reducciones en caliente, por ejemplo, partiendo de un planchón de 200 mm se logran láminas de hasta 1.5 mm de espesor con fuerza relativamente pequeña. Posterior a la laminación en caliente, el acero se transforma a su fase de baja temperatura: α o ferrita y otros microconstituyentes. Las características de

esta transformación, lo cual tendrá un efecto significativo en las propiedades mecánicas del producto, dependerá de los perfiles de enfriamiento utilizados en la mesa de enfriamiento.

El proceso inicia en el horno de recalentamiento donde se ingresa el acero en forma de planchón que presenta estructuras de solidificación aciculares, dendritas columnares, además contiene segregaciones, carburos y nitruros no disueltos, presentando una estructura heterogénea. Con el fin de reordenar esta estructura, el planchón se calienta hasta 1200°C - 1300°C para generar granos de austenita con un tamaño de 200 micrómetros o 2 ASTM.

Después del horno se pasa el planchón al desbastador reversible en donde a temperaturas entre 1100°C y 1200°C se reducen las dimensiones del planchón inicial pasando de un largo de 6-8 mts y espesor de hasta 250 mm a espesores de 30 a 50 mm y largos de 40 a 50 mts.

Esta barra de transferencia es llevada finalmente al molino acabador tándem el cual puede tener de 5 a 7 estaciones constituidas por rodillos de laminación buscando obtener el espesor final deseado. Se trabaja en un rango de temperaturas que va desde los 1000°C para el primer castillo disminuyendo hasta 870 °C- 900°C en el último castillo.

Después del último castillo la barra de transferencia es pasada por la mesa de enfriamiento en donde se logran las transformaciones metalúrgicas deseadas. Obteniendo finalmente una microestructura ferrítica tipo pancake fina. Después de esto se pasa a enrollar la lámina y los rollos son enfriados a temperatura ambiente en zonas delimitadas. (Jonas, 2005). Todas estas etapas se representan en la figura 4.

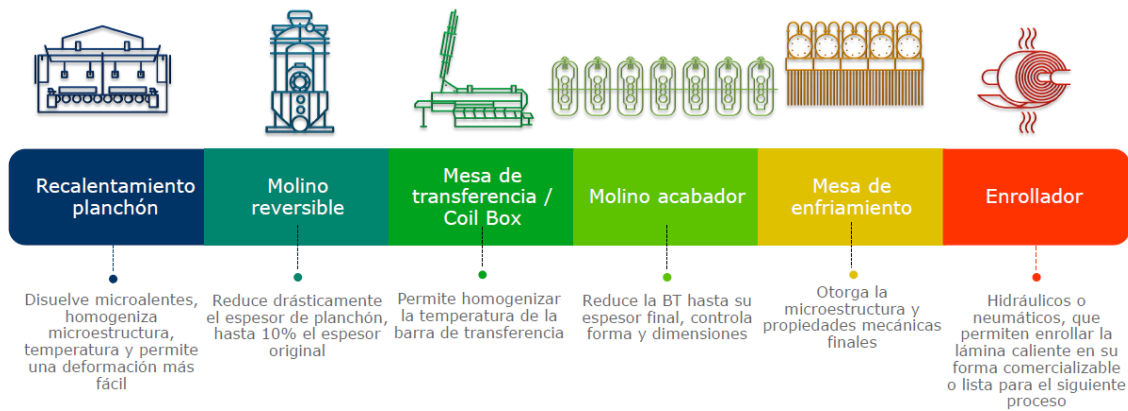


Figura 4. Generalidades del proceso de laminación en caliente

1.3 Laminación en frío

Numerosos productos como es el caso de los prepintados embozados para línea blanca requieren mucho mayor reducción en espesor, así como mejor calidad superficial comparado con una bobina laminada en caliente, aquí es donde el proceso de laminación en frío toma lugar. En el laminado en frío de productos planos se han realizado numerosos avances en equipos y procesos que han permitido mejorar la planeza y la consistencia del espesor a lo largo de una bobina.

La laminación en frío incrementa la dureza y la resistencia a la cedencia, reduce la ductilidad y formabilidad, y también introduce componentes de textura específicos asociados con la reducción de espesor a un ancho constante que después puede ser mejorado con el proceso de recocido. Algunos productos son utilizados en una condición cruda o laminada en frío sin procesos posteriores, particularmente cuando no llevan una deformación o

conformado posterior. Sin embargo, cuando se llevan operaciones de conformado posteriores, como la manufactura de envases, pliegues a más de 45°, componentes de línea blanca o partes automotrices troqueladas, el rolado en frío debe llevar un recocido posterior. El recocido remueve el trabajo en frío introducido por el rolado y por lo tanto recupera la formabilidad del material. Para aplicaciones y grados de acero particulares, el recocido nos da una mejora en el coeficiente de anisotropía normal o valor r lo cual favorecerá en gran medida el troquelado profundo. (Jonas, 2005)

1.4 Recocido batch

El recocido de rollos con pesos entre 9 – 27 tns es una operación muy demandante de tiempo. Los procesos de calentamiento y enfriamiento típicos demoran entre dos y tres días, respectivamente, de modo que la tasa de cambio de temperatura es de 12°C/h en el calentamiento, y de -8°C/h durante el enfriamiento. En consecuencia, se debe considerar un tiempo de proceso promedio de 5 días. Debido a los considerables costos de capital, mantenimiento y energía asociados a este proceso, la optimización de los programas de calentamiento y enfriamiento para mejorar la capacidad productiva de estas unidades es un tema de gran interés en la actualidad.

El mecanismo metalúrgico principal asociado con el recocido batch es la recrystalización, lo cual elimina el endurecimiento por deformación introducido en las

operaciones de laminación anteriores. Una vez que inicia, a temperaturas entre 600 – 650°C, tomará solo unos minutos para extenderse en todo el material y reemplazar la estructura de grano aplanada por laminación con granos equiaxiales y sin deformaciones. A pesar de que también se produce engrosamiento del precipitado y solución de partículas y precipitación, lo cual no es de particular importancia para la mayoría de los grados, incluyendo los grados comerciales utilizados para gabinetes en línea blanca. (Jonas, 2005)

1.5 Recocido continuo

Este proceso es alternativo al recocido batch mencionado anteriormente y su principal ventaja es el incremento considerable en la uniformidad del material en toda su longitud al calentar la lámina. Esto disminuye la variabilidad de propiedades mecánicas en puntas y colas. Debido a que los tiempos de procesamiento son mucho menores, por ejemplo 2 min en lugar de 5 días, las tasas de calentamiento y enfriamiento son mucho mayores en el orden de 15°C/s. (Jonas, 2005). El sustrato utilizado para este proceso es la lámina fría cruda y la lámina caliente decapada.

Los aceros prepintados embozados pueden lograr sus propiedades mecánicas mediante recocido batch cuando es sustrato frío y con recocido continuo cuando es sustrato galvanizado. Por razones de costo y por la aplicación final denominada como línea blanca seca el abastecimiento principal es por la ruta frío recocido, sin embargo, en ocasiones por razones de saturación de líneas se utiliza el sustrato con ruta galvanizado para lograr cumplir la demanda de los clientes de línea blanca.

1.6 Características superficiales

Las superficies con destino a ser pintadas no deben presentar rugosidad tal que la pintura no cubra toda el área correctamente. Una superficie lisa y brillante puede ser obtenida en la lámina utilizando rodillos pulidos y se puede obtener una superficie mate con rodillos de laminación más rugosos. Para el propósito de evaluar la rugosidad superficial se utiliza un rugosímetro o perfilómetro que mide la altura promedio de las asperezas superficiales en micropulgadas y el número de picos por pulgada que excedan una determinada altura.

La lámina de acero rolada en frío también puede ser comprada con patrones que simulan texturas tipo piel. Dichos productos están disponibles en calidad comercial, troquelado medio y profundo. La textura se aplica sobre la superficie del acero después de que la lámina o ha sido recocida y, por lo tanto, tiene un efecto sobre las propiedades mecánicas.

Este efecto, más el efecto de muesca del patrón en sí, reduce un poco la conformabilidad de la hoja o cinta. (Hudok, 2005)

1.7 Aceros recubiertos

Los tipos de recubrimiento básicos incluyen los metálicos, pretratados, preprimer, y acabados prepintados. Los recubrimientos metálicos pueden fabricarse con zinc, aluminio, aleaciones zinc-aluminio, y estaño. Los pretratamientos químicos superficiales son generalmente fosfatos y acabados con un preprimer que pueden aplicarse como una variedad de recubrimientos del tipo orgánicos. (Leonard, 2005). El prepintado consiste en aplicar un sistema de pintura orgánico sobre el acero en una línea de pintado y, comúnmente, parten de un sustrato que no lleva pasivado en la superficie, en cambio puede presentar aceitado ligero que es removido en la línea de lavado habilitada en la línea de pintado.

1.8 Recubrimientos de zinc

El galvanizado es un proceso para mejorar la resistencia a la corrosión del acero por medio de la aplicación de un recubrimiento metálico base zinc. Estos productos tienen diversas aplicaciones en diferentes geometrías y tamaños: techos de naves industriales, paneles laterales, silos, intercambiadores de calor, tanques para agua caliente, cubiertas de aires acondicionados, respaldos de refrigeradores, etc. En todas las partes de acero, el galvanizado proporciona alta durabilidad, protección económica contra una gran variedad de elementos corrosivos presentes en el aire, agua o suelo. (Leonard, 2005).

1.8.1 Resistencia a la corrosión

El uso del zinc es único entre los métodos para la protección a la corrosión del acero.

El recubrimiento de zinc tiene un doble propósito:

- Protege al acero del ataque corrosivo en la mayoría de las atmósferas, actuando como una protección continua tipo barrera entre el acero y la atmósfera.
- Actúa como protector galvánico, lentamente se sacrifica en la presencia de elementos corrosivos para proteger al acero incluso cuando áreas grandes de acero desprotegido son expuestas. (Leonard, 2005).

La pintura de los aceros prepintados embozados puede aplicarse sobre una base galvanizada o bien sobre una base denominada lámina negra sin galvanizar. En aplicaciones como línea blanca seca muchas veces es suficiente la protección tipo barrera que ofrece la pintura sobre la lámina negra o fría recocida y generalmente es elegida por la disminución de costo que representa contra una base galvanizada. Hay algunas otras aplicaciones como el caso de la línea blanca húmeda donde la aplicación final estará en ambientes más agresivos y puede ser recomendable una base galvanizada para dar una protección adicional al acero contra la corrosión.

1.9 Pintado

De acuerdo con Leonard (2005) y como se muestra en la Tabla 1, la selección de material galvanizado para aplicaciones como: graneros, edificaciones, techos, revestimientos, electrodomésticos y muchos accesorios se basa en su protección sacrificial y la protección tipo barrera alcanzada por el metal base gracias al recubrimiento de zinc. Para fines de protección adicional y apariencia cosmética, los recubrimientos de pintura son generalmente aplicados al acero galvanizado. El desempeño de los recubrimientos es un factor económico importante en la durabilidad de estos materiales.

Tabla 1. *Efecto de protección de los sistemas galvanizados/pintados en exposición atmosférica, * la vida de servicio es definida como el tiempo en el que se alcanza el 5% de óxido rojo (Leonard, 2005).*

Tipo de atmósfera	Acero Galvanizado			Pintado			Galvanizado y pintado		
	Espesor um	mils	Vida servicio en años*	Espesor um	mils	Vida servicio en años*	Espesor um	mils	Vida servicio en años*
Industria pesada	50	2	10	100	4	3	150	6	19
	75	3	14	150	6	5	225	9	29
	100	4	19	100	4	3	200	8	33
	100	4	19	150	6	5	250	10	36
Urbano	50	2	19	100	4	4	150	6	34
	75	3	29	150	6	6	225	9	52
	100	4	39	100	4	4	200	8	64
	100	4	39	150	6	6	250	10	67
Marino	50	2	20	100	4	4	150	6	36
	100	4	40	100	4	4	200	8	66
	100	4	40	150	6	6	250	10	69

El acero galvanizado puede ser pintado con una preparación mínima y tiene una excelente adherencia. En este tipo de productos es necesario utilizar un primer especial inhibidor de corrosión con tal de preparar la superficie antes de aplicar la pintura.

Esto se debe en parte a que estos tipos de recubrimientos base zinc son demasiado lisos para proporcionar un anclaje adecuado con la pintura y en parte porque la pintura parece reaccionar con la superficie de zinc sin preparar en presencia de humedad que puede debilitar el vínculo inicialmente formado. (Leonard, 2005).

Los rollos de zinc con destino a ser pintados no deben llevar un tratamiento químico crómico, aunque pudieran llevar un fosfatado para mejorar la adherencia de la pintura, también es común que el rollo de zinc se aceite con fines de protección a la oxidación considerando que la línea de pintado posterior cuenta con una sección de lavado para remover este aceite.

1.10 Propiedades mecánicas

Calidad comercial: este tipo de aceros planos son adecuados para el formado moderado, tienen la suficiente ductilidad para doblarse sobre sí mismos en cualquier dirección en una prueba de flexión estándar a temperatura ambiente. Este tipo de aceros comerciales no son sujetos a pruebas mecánicas muy complejas. Como muestra la Tabla 2, generalmente las normas asociadas como la ASTM A653 para el caso de aceros prepintados con sustrato galvanizado o bien la ASTM A1008 para el caso de los que llevan sustrato frío recocido, establecen una referencia de propiedades mecánicas que no son mandatorias a menos que se acuerde algo diferente con los consumidores, en estos aceros no se espera que

tengan una composición química uniforme. Sin embargo, la dureza de un acero comercial rolado en frío, normalmente, es menor a 60 HRB.

Tabla 2. Rangos de propiedades mecánicas típicas no mandatorias de acuerdo a ASTM A653 para aceros galvanizados por inmersión en caliente y a ASTM A1008 para aceros fríos recocidos *E sin propiedades mecánicas típicas establecidas. (A653, 2020) y (A1008, 2015).

Tipo de producto	Designación	Resistencia a la Cedencia		%Elongación (50 mm)	Valor rm	Valor n
		ksi	mpa			
Galvanizado	CS TIPO A	25/55	170/380	≥20	E	E
	CS TIPO B	30/55	205/380	≥20	E	E
	FS TIPO B	25/45	170/310	≥26	E	0.17/0.21
	DDS TIPO C	25/40	170/280	≥32	1.2/1.8	0.17/0.24
	EDDS	15/25	105/170	≥40	1.6/2.1	0.22/0.27
Frio recocido	CS TIPO A, B y C	20/40	140/275	≥30	E	E
	DS TIPO A Y B	22/35	150/240	≥36	E	E
	DDS	17/29	115/200	≥38	E	0.17/0.21
	EDDS	15/25	105/170	≥40	1.2/1.8	0.17/0.24

1.10.1 Propiedades mecánicas y su importancia en el acabado superficial.

Dureza: es la resistencia a la indentación o penetración. Debido a que todos los métodos de acabado superficial consideran la creación de nuevas superficies, más altas durezas siempre implican mayores fuerzas de maquinado; es más complicado embozar acero más duro que acero suave. Altas durezas también implican mayores desgastes del herramental o rodillo de trabajo. Esto puede atribuirse al mayor desgaste ocasionado por el contacto directo entre la herramienta y la superficie. (Subramanian, 2005)

Tenacidad: es la resistencia a la fractura. Es más fácil propagar grietas a través de material con baja tenacidad. Por este motivo, es más fácil maquinar aceros con una relación de alta dureza-baja tenacidad comparado con aceros de alta tenacidad con misma dureza. Sin embargo, tenacidades extremadamente bajas no son deseables. En estos materiales es deseable utilizar condiciones en los métodos de acabado o embozado que prevengan la generación de grietas en lugar de minimizar o controlar la propagación de grietas. (Subramanian, 2005)

Rigidez: es la resistencia a la deformación. Se mide generalmente como el módulo elástico, o la pendiente de la curva esfuerzo-deformación. Debido a que la mayoría de los métodos de acabado requieren la aplicación de fuerza para la generación de superficie, es deseable que tengan una deflexión o distorsión mínima bajo las fuerzas aplicadas con tal de alcanzar las tolerancias dimensionales que implica la superficie embozada. (Subramanian, 2005)

Ductilidad: es la habilidad del material para deformarse plásticamente antes de que la fractura se inicie o se propague. Esto es medido generalmente en términos de porcentaje de elongación. Los materiales dúctiles son generalmente más complicados para maquinar; estos requieren mucho mayor energía para fabricarse. Por ejemplo, la energía específica requerida para maquinar acero suave es generalmente mayor que la requerida para maquinar hierro fundido. (Subramanian, 2005)

Propiedades térmicas: Debido a que la mayoría de los métodos de acabado son procesos mecánicos en la presencia de un frente térmico, las propiedades térmicas de los

materiales de trabajo juegan un papel clave en la respuesta al acabado. Por ejemplo, la conducción de calor fuera de la zona de maquinado y la tasa de acumulación de calor determinan la temperatura máxima en la superficie, que influye en la vida útil de la herramienta, así como la calidad del trabajo superficial después del acabado. Como una regla general, los conductores pobres de calor son difíciles de maquinar. Los ejemplos típicos son los polímeros, acero inoxidable, y titanio. Cualquier esfuerzo externo para reducir el deslizamiento superficial y la conducción de calor son de beneficio en el acabado de estos materiales.

Las grietas térmicas son generadas cuando el esfuerzo térmico excede la resistencia del material. Materiales con alta conductividad térmica, bajo coeficiente de expansión térmica y bajo módulo elástico son menos susceptibles a las grietas térmicas. (Subramanian, 2005)

Efectos en la microestructura: como regla general, una microestructura uniforme y predecible del material de trabajo es preferible para procesos de acabado confiables y su automatización. Inclusiones, defectos superficiales y capas superficiales duras siempre perjudican el rendimiento.

El tamaño de grano de los materiales de trabajo juegan un rol clave en los resultados del acabado. Tamaños de grano finos son generalmente asociados con mayor resistencia y tenacidad y mayores dificultades para el maquinado. Las modificaciones del tamaño de grano debido al procesamiento, como el tratamiento térmico y shot peening, resultados de resistencia a la cedencia, esfuerzos residuales, propiedades anisotrópicas, y endurecimiento

por trabajo en frío como lo es el embozado, todos estos aspectos generarán dificultades en los procesos de acabado y deberán ser cuidadosamente controlados o monitoreados. (Subramanian, 2005)

1.11 Formabilidad de las láminas de acero.

De acuerdo con Granzow (2005) el término de formabilidad es comúnmente utilizado para describir la habilidad del acero para mantener su integridad estructural mientras es deformado plásticamente en diferentes geometrías. De cualquier modo, no todas las formas requieren las mismas características de conformado, y un acero con excelente formabilidad en determinada aplicación, puede llegar a exhibir una pobre formabilidad en una aplicación distinta. En la práctica, la formabilidad debe de ser optimizada seleccionando un grado de acero que presente las características de conformado necesarias para fabricar la forma requerida. Estas características de conformado son normalmente estimadas con un análisis de las propiedades mecánicas del acero, las cuales son determinadas con los ensayos de tensión uniaxiales. A pesar de que estos ensayos no simulan ninguna operación de conformado comercial, los resultados del ensayo han sido utilizado de forma universal por mucho tiempo para evaluar la formabilidad.

1.11.1 Propiedades mecánicas y formabilidad.

Las propiedades mecánicas de las láminas de acero que influyen en la formabilidad, tanto directa como indirectamente, pueden ser evaluadas por medio del ensayo de tensión uniaxial, como se describe en ASTM E8. Los resultados del ensayo de tensión incluyen el límite elástico, la resistencia a la tracción, elongación total, elongación uniforme, elongación del límite elástico, la tasa de deformación plástica, anisotropía planar, y el coeficiente de endurecimiento por deformación. Los ensayos de tensión uniaxial pueden realizarse con especímenes obtenidos en orientación longitudinal, transversal, diagonal y otras orientaciones relacionadas a la dirección de rolado.

Límite elástico o resistencia a la cedencia: es la máxima tensión que un material puede soportar sin sufrir deformaciones permanentes. Hasta este punto, el material se comporta de manera elástica, es decir, puede recuperar su forma original al eliminar la carga. Una vez superado este límite, el material entra en la zona de fluencia plástica, donde las deformaciones ya no son reversibles. En ausencia de un cambio abrupto en la curva de esfuerzo-deformación, la tensión al 0,2% de desplazamiento o al 0,5% de deformación bajo carga se informa como la resistencia a la cedencia. En el conformado de lámina de acero al carbono, una resistencia a la cedencia de 240 Mpa (35 ksi) o más, incrementa la probabilidad de “springback” excesivo y rotura durante el formado. Sin embargo, el uso de material que presente una resistencia a la cedencia menor de 140 Mpa (20 ksi) pudiera resultar en partes con niveles de resistencia insuficientes. (ChansMachining, 2024)

Resistencia a la cedencia

El límite elástico de la lámina de acero es indicativo tanto de la conformabilidad como de la resistencia después del conformado. Se observa en la figura 3 distintos tipos de comportamiento a la cedencia en la lámina de acero. Cuando se produce el alargamiento del límite elástico, el valor más bajo observado durante el proceso de cedencia discontinua se reporta como la resistencia a la cedencia o límite elástico. (Granzow W. , 2005)

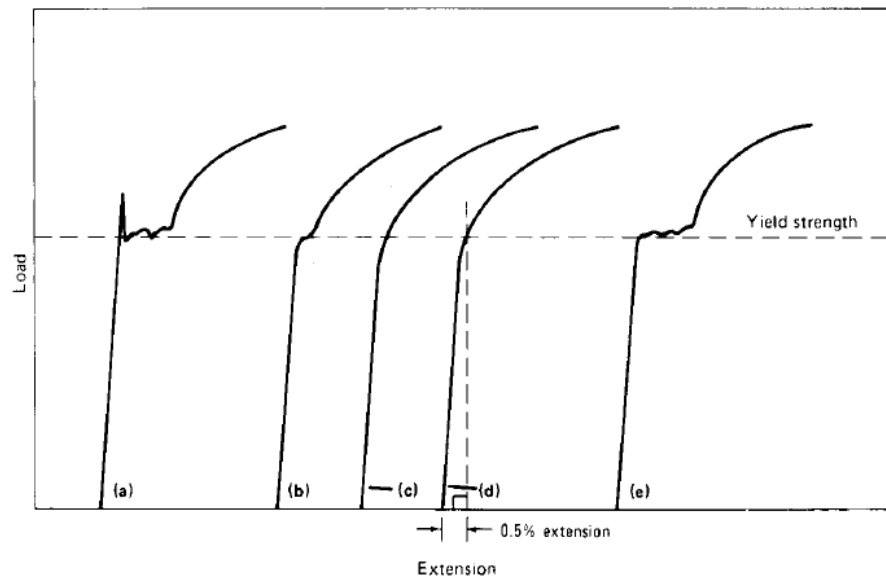


Figura 5. Curvas de extensión de carga para chapa de acero que tienen el mismo límite elástico, pero diferente comportamiento característico. a) Acero recocido, El límite elástico es la tensión más baja medida durante el alargamiento del punto de fluencia. b) Acero con borde ligeramente laminado templado. Acero laminado templado con bajo contenido de carbono. El límite elástico se calcula a partir de la carga con un desplazamiento del 0,2% (c) o de la carga con una extensión del 0,5% (d). e) Acero con borde elástico debido al envejecimiento a temperatura ambiente durante varios meses. El límite elástico es la tensión más baja medida durante el alargamiento del punto de fluencia. (Granzow W. , 2005)

Elongación total

Después de la fractura, la probeta se vuelve a ensamblar y se mide la longitud entre las marcas de calibración. De esta manera se calcula la elongación y se informa como un porcentaje de la longitud de calibración original, que generalmente es de 50 mm. Las probetas de metales en lámina utilizadas para pruebas de tracción generalmente tienen secciones reducidas cortas y de lados paralelos, pero a veces se utilizan secciones reducidas ligeramente cónicas para controlar la ubicación del estrechamiento y la fractura. Los valores de elongación resultantes de pruebas de diferentes probetas del mismo material pueden variar debido a diferencias en la longitud de calibración, el espesor de la lámina, la preparación y el acabado de los bordes, los métodos de prueba u otros factores.

Generalmente una elongación de 35 a 45% en 50 mm es normal para aceros de bajo carbono convencionales, valores más altos indican mayor formabilidad. (Granzow W. , 2005)

Elongación uniforme

La elongación total de una probeta de tensión comprende dos partes, elongación uniforme y elongación post-uniforme. Para un material que sigue la relación de endurecimiento por deformación ($\sigma = K\epsilon^n$), la elongación uniforme que es evaluada en deformación verdadera es igual al exponente de endurecimiento por deformación, n . La elongación post-uniforme depende tanto del comportamiento de endurecimiento por deformación como de la respuesta de sensibilidad a la tasa de deformación del metal ante la tensión aplicada. Cuando se forma el encuellamiento, las deformaciones y la tasa de

deformación dentro del cuello son mayores que en las regiones exteriores, y un mayor endurecimiento por deformación puede compensar el debilitamiento debido a la reducción de espesor de la sección transversal, causando un desplazamiento de la deformación hacia las regiones fuera del cuello. La elongación ingenieril hasta la carga máxima, e_u , está relacionada con el exponente de endurecimiento por deformación n , por la ecuación: $n = \ln(1 + e_u)$.

Elongación en el punto de cedencia

Es la porción de elongación total que ocurre durante la cedencia discontinua en el esfuerzo de cedencia. Se acompaña por la formación de defectos superficiales conocidos como líneas de Lüder, las cuales son consideradas como imperfecciones en muchas aplicaciones debido a su apariencia.

La presencia de elongación en el punto de cedencia puede conducir a una deformación desigual durante el conformado. Esto es porque el material puede experimentar zonas localizadas de estiramiento (bandas de Lüders) que pueden afectar la calidad superficial del acero prepintado. Al reducir el espesor del material, la sensibilidad a la elongación en el punto de cedencia puede aumentar, ya que las tensiones y deformaciones se distribuyen de manera diferente en materiales más delgados. (Granzow W. , 2005)

Relación de deformación plástica.

La relación de deformación plástica, también conocida como valor "r", describe la capacidad de una lámina metálica para resistir el adelgazamiento durante procesos de conformado, como el embutido. Se define como la razón entre la deformación verdadera en la dirección del ancho (también llamada deformación lateral, ϵ_w) y la deformación verdadera en la dirección del espesor, ϵ_t , de una lámina de metal deformada plásticamente:

$$r = \epsilon_w / \epsilon_t$$

Este valor está relacionado con la orientación cristalográfica de los aceros de bajo carbono. El método estándar para determinar r , utilizando el ensayo de tensión está dado en la norma ASTM E 517. El valor variará con respecto a la dirección del ensayo (relacionado a la dirección de laminación) en metales anisotrópicos. El valor promedio r_m , representa la anisotropía plástica normal del acero:

$$r_m = \frac{r_0 + 2r_{45} + r_{90}}{4}$$

Los aceros rolados en caliente y los aceros rolados en frío recocidos son generalmente isotrópicos (r_m de 1.0). El límite superior de los aceros comerciales es alrededor de 3.0.

Exponente esfuerzo-deformación

El exponente de endurecimiento por deformación, n , es la pendiente de la curva de tensión verdadera-deformación verdadera cuando se representa en coordenadas logarítmicas. Una porción significativa de la curva es casi una línea recta para muchos aceros de bajo carbono. Se asume que los datos se ajustan a la ecuación:

$$\sigma = K\varepsilon^n$$

El valor n será normalmente aproximado a 0.22 para los aceros al bajo carbono utilizados para formar piezas complejas. Valores más altos (arriba de 0.26) indican capacidades mejoradas para deformación en el estiramiento. (Granzow W. , 2005)

Los efectos de los diferentes valores n sobre la distribución de esfuerzos en regiones críticas de partes específicas que son conformadas se muestra en la figura 6. Partes conformadas con aceros que presentan valores n bajos (0.21) pueden presentar adelgazamiento excesivo y fractura en regiones críticas. Partes idénticas formadas con un acero que presente valor n más alto (0.23) serán más resistentes en las regiones críticas para transferir la deformación a las áreas adyacentes con lo cual se evitaría la falla durante el conformado. (Granzow W. , 2005). Como se muestra en la figura 7, el valor n se representa en la región de endurecimiento por deformación, justo después del límite elástico y antes del inicio del encuellamiento.

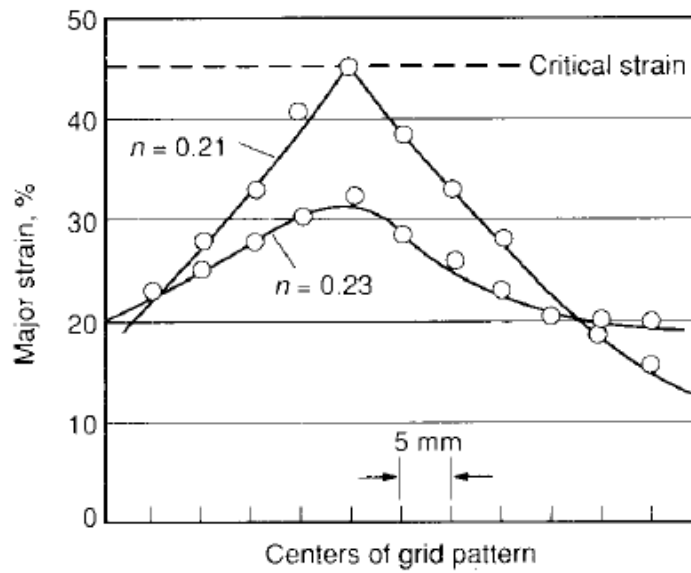


Figura 6. La deformación mayor ϵ , en la región crítica de una pieza formada, se distribuye de manera más uniforme para el acero que tiene el valor más alto de n . Una de estas dos partes (que son idénticas excepto por el valor n del acero seleccionado) se tensó hasta el punto de un adelgazamiento excesivo; el otro, hecho de acero con el valor de n más alto, no mostró inclinación a fracturarse. (Granzow W. , 2005)

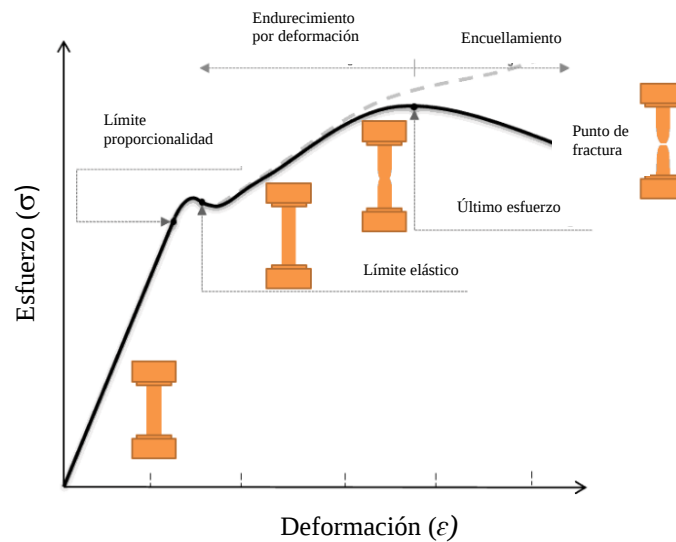


Figura 7. Curva esfuerzo-deformación para aceros de bajo carbono, se muestran zonas de interés durante la prueba de tensión.

Módulo de Young

El módulo elástico o módulo de Young, E, es la pendiente de la porción elástica de una curva uniaxial esfuerzo-deformación. Para la mayoría de los aceros tiene un valor de 200 Gpa. (Boardman, 2005).

$$E = \frac{F * l}{A * \Delta l}$$

E se define como el módulo de elasticidad de Young (N/m²), F se define como la fuerza aplicada en Newtons, l la longitud en metros y A como el área transversal en m², Δl definido como el estiramiento en metros.

1.11.2 Correlación entre microestructura y formabilidad

Tamaño de grano

Este atributo influencia la formabilidad de dos maneras opuestas. Petch (1959) mostró que el límite elástico de los aceros de bajo carbono varía de manera inversa con la raíz cuadrada del diámetro de grano. Los aceros con grano refinado son más resistentes, pero presentan bajos exponentes de endurecimiento por deformación, n, y formabilidad limitada. Blickwede (1968) mostró que el valor *rm* disminuye cuando el tamaño de grano disminuye.

Los aceros con el tamaño de grano más grueso presentan mejor formabilidad, pero la superficie rugosa (llamada piel de naranja) que resulta de estirar acero con tamaños de grano inferiores a ASTM 5 es inaceptable para muchas aplicaciones. Tamaños de grano entre 7 y 8 suelen presentar una buena relación entre formabilidad y apariencia superficial. Los aceros de alta resistencia y baja aleación (HSLA) se producen con tamaños de grano extremadamente pequeños (ASTM 12) para incrementar tanto resistencia como tenacidad. Para el caso de los aceros comerciales destinados a prepintado y embozado los tamaños de grano se encuentran entre 8 y 11 ASTM.

1.11.3 Efecto de los recubrimientos metálicos y la formabilidad.

Los aceros de bajo carbono son recubiertos generalmente con zinc, aluminio o magnesio para mejorar la resistencia a la corrosión. El recubrimiento se aplica sumergiendo el acero en un contenedor con el metal fundido denominado generalmente como inmersión en caliente. La formabilidad de estos aceros recubiertos es la misma de la formabilidad del metal base al cual son aplicados, modificada por los efectos de fricción y problemas de manipulación impuestos por el recubrimiento.

Los aceros galvanizados por inmersión en caliente son fabricados en hornos de recocido continuo, tratamiento que afectara las propiedades mecánicas y la conformabilidad del metal base. Los aceros calidad comercial, troquelables y troquelables profundos mostrarán más altos límites elásticos y resistencias a la tensión, altas durezas, menores elongaciones y menores valores r comparado con los aceros bajo carbono no recubiertos y

estos tendrán generalmente menor formabilidad. Los recubrimientos pueden presentar lubricidad o pueden ser abrasivos. Debido a que muchos recubrimientos de zinc sumergidos en caliente son resbaladizos, es posible que requieran un poco más de presión en el porta piezas durante el conformado en prensa, comparado con los aceros no recubiertos. Todos los recubrimientos de acero son más suaves que el metal base y pueden rasparse de la superficie del metal con rebabas afiladas en los bordes en blanco o áreas rugosas en el equipo de procesamiento. El recubrimiento que se raspa tiende a acumularse en las herramientas por desprendimiento, produciendo así una superficie deficiente en la pieza formada. La solución es mantener los bordes de corte afilados en las herramientas de punzonado para minimizar la altura de las rebabas, así como una superficie pulida en las áreas de contacto del troquel. El desprendimiento también se puede controlar con una mejor práctica de lubricación. (Granzow W. , 2005)

1.11.3 Ensayos para evaluar formabilidad

Ensayo de tensión

Este ensayo es ampliamente utilizado para determinar las propiedades mecánicas de un material determinando valores de resistencia a la cedencia, resistencia a la tensión y elongación. Elongación uniforme, elongación total, y reducción de área en la fractura son usados frecuentemente como índices de ductilidad. El principio consiste en estirar una probeta plana aplicando carga uniaxial hasta la ruptura utilizando una máquina de tensión

universal con célula de carga y extensómetro. El ensayo es utilizado para certificación de materiales de acuerdo a especificaciones establecidas de acuerdo a un diseño de producto. Es una herramienta para entender problemas en el conformado de piezas en la industria de línea blanca. (Granzow W. , 2005)

Ensayo de torsión

En la prueba de torsión esquematizada en la figura 8, la deformación es causada por corte puro, y se pueden lograr grandes deformaciones sin las limitaciones impuestas por el encuellamiento generado en la región plástica posterior al último esfuerzo de tensión. Debido a que la tasa de deformación es proporcional a la velocidad de rotación, se obtienen fácilmente altas tasas de deformación. Además, la fricción no tiene efecto en la prueba, como ocurre en la prueba de compresión. El estado de tensión en la torsión puede representar la tensión típica en los procesos de trabajo de metales, pero la deformación en la prueba de torsión no es una simulación precisa de los procesos de trabajo de metales, debido a la excesiva reorientación del material en grandes deformaciones.

Los datos de fractura de las pruebas de torsión suelen informarse en términos del número de giros hasta la falla o de la deformación por fractura en la superficie hasta la falla. (Granzow W. , 2005)

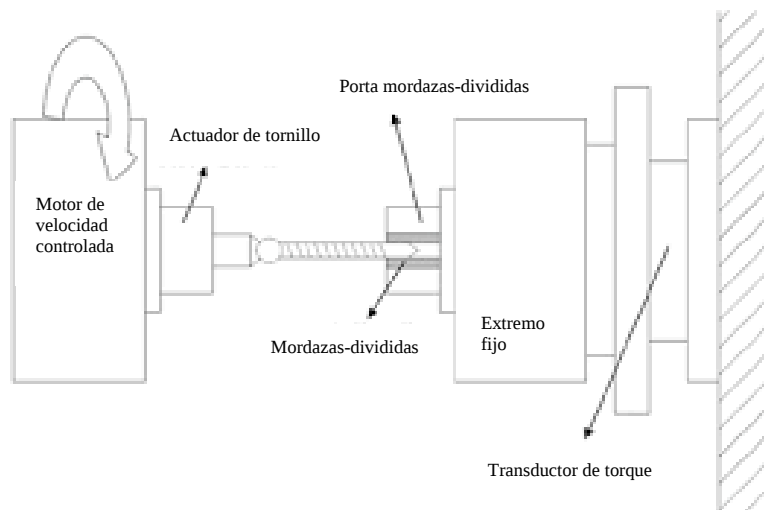


Figura 8. Representación esquemática de la prueba de torsión

Ensayo de flexión

La prueba de flexión, representada en la figura 9, es útil para evaluar la formabilidad de la lámina de acero. En general, esta prueba es más aplicable a las operaciones de trabajo en frío. Las tensiones y deformaciones principales desarrolladas durante la flexión se definen en la Figura 5. El parámetro crítico es la relación ancho a espesor, w/t . Si $w/t > 8$, la flexión ocurre bajo condiciones de deformación plana ($\epsilon_2 = 0$) y $\sigma_2/\sigma_1 = 0.5$. Si $w/t > 8$, la ductilidad de la flexión es independiente de la relación exacta w/t . Si $w/t < 8$, entonces el estado de tensión y la ductilidad de la flexión dependen fuertemente de la relación ancho-espesor. (Granzow W. , 2005). En general esta prueba mecánica consiste en doblar sobre si misma o a 180° una tira de lámina en el sentido transversal al sentido de laminación, posteriormente en la zona de doblez se pasa una cinta scotch 610 para validar si existe desprendimiento del recubrimiento posteriormente utilizando el criterio de pasa o no pasa.

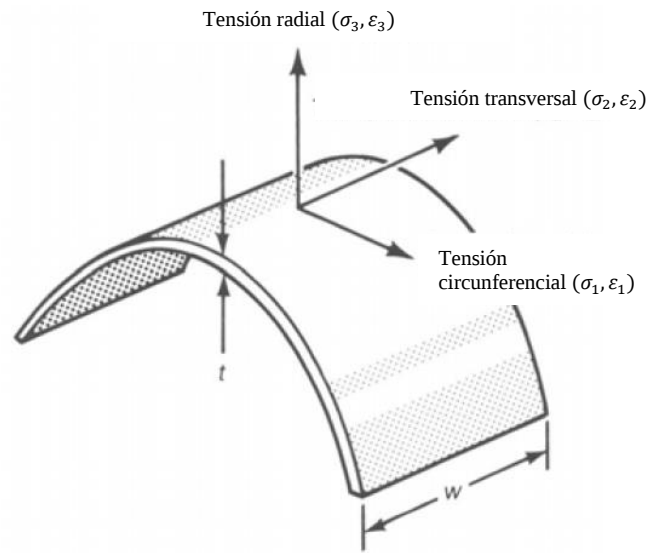


Figura 9. Región doblada donde se definen las direcciones de los principales esfuerzos y deformaciones en el ensayo de flexión.

Capítulo 2.- Revisión del estado del arte

2.1 Introducción

El estudio de los materiales con superficie embozada se ha realizado en diferentes investigaciones las cuales se han centrado en evaluar la influencia de las superficies embozadas o con deformación localizada sobre las propiedades mecánicas de aceros avanzados, aceros inoxidables y aluminios. Debido a su alta correlación con el tema en estudio, los trabajos más relevantes a revisar de manera exhaustiva se enlistan a continuación y se resumen de manera general en la tabla 3:

- C.S. Namoco Jr. a, T. I. (2007). Influence of embossing and restoration on the mechanical properties of aluminum alloy sheets. *Journal of Materials Processing Technology*.
- Stefan Walzer, M. L. (2019). Studies on the influence of embossing on the mechanical properties of high-strength sheet metal. *AIP Conference Proceedings*
- Yohei Abe, K.-i. M. (2019). Improvement of sheet metal formability by local work-hardening with punch indentation. *Production engineering*.
- Walter Stefan, L. M. (2020). Novel approach to decrease sheet thinning during sheet metal forming by using embossing technique. *Procedia manufacturing*.

Tabla 3. Tabla resumida de los estudios analizados mostrando autor, año, título, revista, material analizado y resultados.

Autor / Año / Revista	Título	Material analizado	Estudios	Resultado post-embozado /indentado
C.S. Namoco Jr. a, T. I. 2007 / Journal of Materials Processing Technology.	Influence of embossing and restoration on the mechanical properties of aluminum alloy sheets	Al recocido (Al – O), Al (Al-H) y láminas de aleación de Al A5052-H34 (Series A5000) y A6061-T4 (Series A6000)	Tensión, microdureza, dobléz.	Incremento en resistencia a la cedencia, tensión, microdureza vickers y carga máxima dobléz. Disminución en % de elongación
Stefan Walzer, M. L. 2019 / AIP Conference Proceedings	Studies on the influence of embossing on the mechanical properties of high-strength sheet metal.	DP600 con espesor 1.2 mm	Tensión	Incremento en resistencia a la cedencia de 40%, y resistencia a la tensión de 17%. Disminución en % de elongación.
Yohei Abe, K.-i. M. 2019 / Production engineering.	Improvement of sheet metal formability by local work-hardening with punch indentation	Al A1050-O, A1050-H y acero inoxidable SUS304	Tensión, microdureza, modelación /simulación EF.	La deformación plástica durante el conformado puede ser controlada por la distribución de resistencia en la pieza endurecida localmente logrando mejorar las distribuciones de espesor y resistencia en las partes formadas así como la formabilidad
Walter Stefan, L. M. 2020 / Procedia manufacturing	Novel approach to decrease sheet thinning during sheet metal forming by using embossing technique	DP600	Tensión, Nakajima –FLD, modelación /simulación EF.	El límite elástico se vio incrementado en las probetas embozadas y a pesar de este aumento, las piezas embozadas proveen una capacidad de formado suficiente para la operación considerada de troquelado profundo.

2.2 Análisis de estudios

Influence of embossing and restoration on the mechanical properties of aluminum alloy sheets.

En Japón, se realizó el estudio de la influencia del embozado y su restauración sobre las propiedades mecánicas de láminas de aleación de aluminio. Para el análisis se utilizó aluminio recocido (Al – O), Aluminio (Al-H) y láminas de aleación de aluminio A5052-H34 (Series A5000) y A6061-T4 (Series A6000) con espesores de 1.0 mm. Se llevaron a cabo ensayos de tensión, microdureza y dobléz para investigar las características mecánicas de estos materiales. Para el embozado se utilizaron troqueles de estampado con diámetros de 6.5 y 8 mm para los troqueles superiores e inferiores, para la restauración se comprimieron las

zonas embozadas para producir superficies relativamente planas. Para los resultados de microdureza Vickers se encontró un incremento con respecto a la lámina sin embozar, además la dureza aumentó aún más a medida que la hoja embozada se sometió al proceso de restauración esto validaba el endurecimiento por deformación en las láminas embozadas debido a la deformación plástica. Con respecto a los resultados de tensión, para las probetas embozadas el límite elástico disminuía con respecto a la lámina lisa. Esto se atribuyó a que el espesor en el centro del área deformada es reducido. Por el otro lado, para la muestra restaurada el límite elástico incrementa con respecto a la lámina lisa. Esto es atribuido al efecto de endurecimiento por deformación en el material. Para el caso de la resistencia a la tensión, en materiales con el valor n más alto, la resistencia a la tensión incrementa posterior al proceso de embozado y restauración. Por el otro lado, para los materiales con valor n más bajo, el efecto de la disminución de espesor ocasionado por la deformación del embozado es más pronunciado que el efecto del trabajo en frío, por lo tanto, disminuye la resistencia a la tensión. Con respecto al ensayo de doblez, los resultados mostraron que para las muestras sometidas a embozado, la carga máxima de doblez aumentaba conforme la altura de deformación se incrementaba. Esto significa que la rigidez de la lámina se incrementaba, lo cual se atribuyó al cambio en la forma de la sección transversal de los materiales que se generó con el proceso de embozado. Este cambio, en efecto, incrementaba el módulo de sección de los materiales. Como resultado la rigidez de doblez es mayor comparada con aquellas láminas lisas sin embozar. Además, la deformación plástica que era introducida localmente al área formada también causaba el incremento en la carga máxima de doblez.

Studies on the influence of embossing on the mechanical properties of high-strength sheet metal.

En Alemania, se elaboraron estudios para revisar la influencia del embozado sobre las propiedades mecánicas de aceros planos de alta resistencia. En este trabajo utilizaron acero DP600 con espesor 1.2 mm al cual le aplicaron un embozado unilateral cerca de la superficie utilizando diferentes profundidades y patrones de embozado. Para llevar a cabo el estudio realizaron ensayos de tensión principalmente. Concluyeron en esencia que el incremento en el límite elástico dependía significativamente de las distancias entre cada zona de embozado individual. En general observaron que al incrementar la cantidad de embozados el límite elástico se incrementó arriba del 40%. Para la resistencia a la tensión se observó un incremento del 17% atribuido a la combinación del endurecimiento por trabajo del proceso de embozado y el trabajo en frío adicional del ensayo de tensión. Como era de esperarse el valor de elongación disminuyó con el embozado el cual influyó directamente el pre-fortalecimiento y por lo tanto la elongación para todos los patrones de embozado, a pesar de esto se identificó que la reducción en elongación fue en menor magnitud que el incremento en límite elástico y resistencia a la tensión.

Improvement of sheet metal formability by local work-hardening with punch indentation.

En Alemania, realizaron un estudio para mejorar la formabilidad de lámina de acero inoxidable y aleaciones de aluminio aplicando endurecimiento localizado con punzonado. Se utilizaron para el trabajo aluminio A1050-O, A1050-H y acero inoxidable SUS304 realizándoles ensayos de tensión, microdureza y modelación de pieza con su respectiva simulación del proceso de troquelado profundo de las piezas con elemento finito. En el trabajo se concluyó que la deformación plástica durante el conformado podía ser controlada por la distribución de resistencia en la pieza endurecida localmente logrando mejorar las distribuciones de espesor y resistencia en las partes formadas, así como la formabilidad. El proceso de indentación utilizado era simple, flexible y aplicable y fácilmente incrementaba la resistencia local en la pieza. A pesar de la reducción de espesor, la resistencia de la pieza es incrementaba localmente hasta una cierta reducción. Los materiales con alto valor de endurecimiento por trabajo como el acero inoxidable y metales recocidos son útiles para el proceso de indentación utilizado.

Novel approach to decrease sheet thinning during sheet metal forming by using embossing technique, Walzer Stefan, Liewald Mathias (2020) Procedia manufacturing.

En Alemania, se investigó la influencia del uso de la técnica de embozado para lograr la disminución del adelgazamiento durante el formado de los aceros avanzados. El acero de referencia investigado fue el DP600 en su condición sin embozar sometiéndolo a distintos patrones de embozado con profundidades de 60 μm , 90 μm y 120 μm . Para las pruebas emplearon ensayos de tensión uniaxiales, ensayos de Nakajima para la obtención de la curva límite de formabilidad y el uso de técnica de modelación y elemento finito en donde utilizaron la información de propiedades mecánicas obtenidas inicialmente. Los resultados a destacar fueron que el límite elástico se vio incrementado en las probetas embozadas y a pesar de este aumento, las piezas embozadas tuvieron una capacidad de formado suficiente para la operación considerada de troquelado profundo. Finalmente, encontraron que la técnica de embozado fue efectiva para pre-fortalecer las piezas de acero de tal modo que, comparando con el acero sin embozar, el adelgazamiento del metal en áreas críticas del componente podía disminuirse significativamente.

2.3 Síntesis del estado del arte

Después de hacer una revisión sobre el tema de interés para esta investigación fue posible concluir que no existía información específica sobre los efectos en las propiedades mecánicas del embozado sobre acero comercial, sin embargo, los trabajos analizados plantearon estudios sobre otros materiales metálicos como aceros avanzados, aceros inoxidables y aluminios y nos ofrecían un acercamiento al posible comportamiento mecánico de la deformación superficial contribuida por el embozado. De manera general se observó que los análisis que planteaban los investigadores recaían sobre ensayos de tensión, doblez, microdureza, ensayos de Nakajima y simulaciones con elementos finitos. Para todos los estudios se observó un incremento en la resistencia a la cedencia atribuido al efecto de endurecimiento por trabajo en frío o esfuerzos residuales ejercidos por el embozado o la deformación localizada, este incremento fue de la mano con la reducción en el % de elongación lo cual fue en menor magnitud que para el caso del aumento en la cedencia.

Debido a que la capacidad de formado de un gabinete de acero prepintado embozado para línea blanca es fundamentalmente dependiente de las propiedades mecánicas del material, de acuerdo con Walzer (2019) las técnicas de embozado permiten que las propiedades de endurecimiento de las láminas de metal incrementen. Como se mencionó, este incremento en resistencia se da a partir del endurecimiento por deformación y esfuerzos residuales, los cuales son inducidos a la lámina durante los procesos de embozado lo que localmente influencia las propiedades como la resistencia a la cedencia y el % de elongación.

El embozado es utilizado para fines estéticos y para mejorar propiedades mecánicas de la lámina. En el trabajo revisado de Namoco (2007) se indica que cuando los materiales se someten a esta técnica el módulo de sección o la resistencia a la flexión de la lámina aumenta. Con este método de endurecimiento se abre la posibilidad de utilizar láminas más delgadas con una mejora notable en las propiedades mecánicas como la resistencia y rigidez.

La reducción de peso-espesor en las láminas de acero prepintadas utilizadas para línea blanca si bien puede ser beneficioso en términos económicos, de acuerdo con los estudios analizados en el trabajo de Namoco (2007), ocurren serios problemas durante el formado debido a que la rigidez de la parte formada disminuye conforme disminuye el espesor. Además, la formabilidad de la lámina también disminuye con la reducción del espesor. (K. Yamaguchi, 1988). Para superar estos inconvenientes, las técnicas de embozado y restauración de las láminas metálicas son investigadas como métodos de endurecimiento. Cuando la lámina se somete a estos procesos, la rigidez y la resistencia del metal se incrementa debido al efecto combinado de trabajo en frío durante el embozado y al cambio en la resistencia a la flexión de la lámina debida al embozado.

En las operaciones de plegado en U para formar el gabinete de refrigeradores existe el riesgo de que ocurra adelgazamiento en los bordes cuando se utiliza una lámina de espesor más delgada. Con tal de evitar el adelgazamiento prematuro de la lámina, procesos como el embozado de aceros con espesor delgado se han desarrollado en el pasado, utilizando los efectos de trabajo en frío para mejorar las propiedades mecánicas. Con relación a esto, es posible mejorar la formabilidad de los productos semi-elaborados evitando el adelgazamiento de lámina al redistribuir la elongación.

En estos procesos de conformado de acero prepintado embozado para fabricación de refrigeradores es crucial la capacidad del material para ser doblado sin presentar algún defecto superficial. Resultados del estudio de Namoco (2007) mostraron que para las láminas sometidas a embozado, la carga máxima de doblez se incrementaba conforme la altura del abultamiento del embozado aumenta comparando con una lámina lisa. Esto significa que la rigidez de la lámina embozada se incrementa.

Este incremento de la carga máxima de doblez es debido al cambio en la forma de la sección transversal de los materiales que se generó con el proceso de embozado. Este cambio, en efecto, incrementa la resistencia a la flexión de los materiales. Como resultado la rigidez de doblez es mayor comparada con aquellas laminas lisas sin embozar. Además, la deformación plástica que es introducida localmente al área formada también causa el incremento en la carga máxima de doblez.

Capítulo 3.- Desarrollo experimental

3.1 Secuencia de fabricación

La secuencia de fabricación llevada a cabo para los materiales analizados consistió en laminación en caliente, laminación en frío, recocido, temple, prepintado y embozado. En la figura 10 se distinguen las etapas clave para obtención de muestras posterior a recocido y temple para probetas lisas y posterior a proceso de embozado para probetas embozadas.

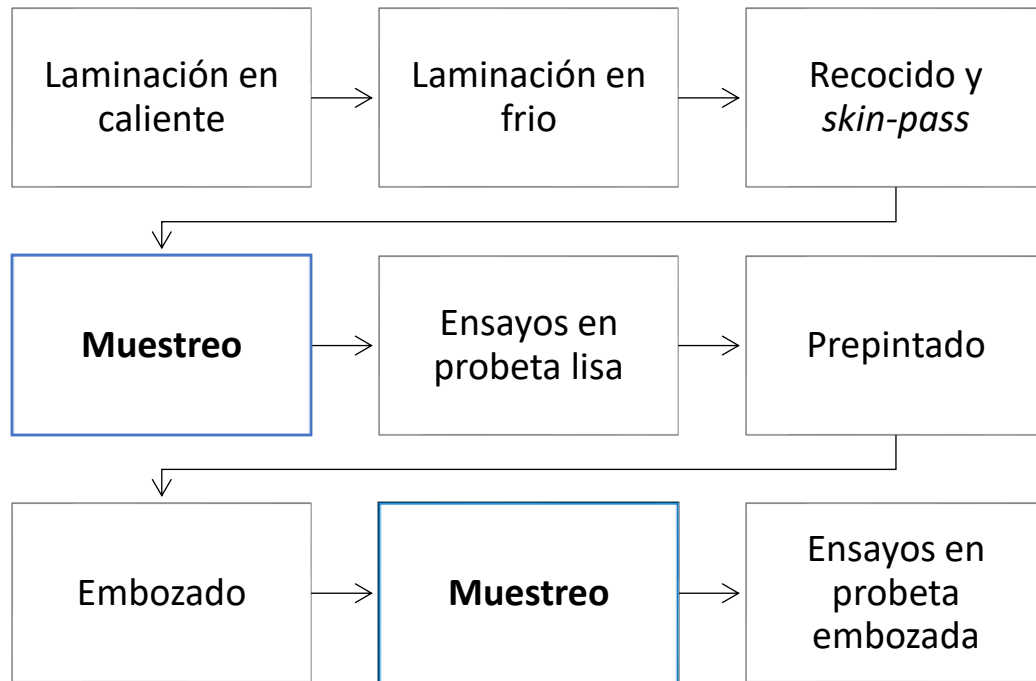


Figura 10. Secuencia de fabricación y experimentación.

3.2 Muestreo

Como se indica en la Tabla 3, Se muestrearon siete materiales del mismo grado de acero bajo carbono fabricado bajo práctica metalúrgica estándar diseñada para acero comercial, bajo el mismo patrón de embozado tipo piel con profundidad de patrón de 0.05 mm. Las muestras obtenidas variaron en espesor desde 0.36 mm hasta 0.50 mm. Para cada lote, antes de embozar se determinaron sus propiedades mecánicas con probeta plana 2A con superficie lisa, microdureza Vickers, tamaño de grano y el respectivo análisis químico mostrado en la tabla 4.

Tabla 3. *Materiales muestreados diferenciados en espesor manteniendo grado, % de reducción y profundidad de embozado para todos los casos.*

Identificación	Espesor (mm)	Acero / Grado	% Reducción	Embozado
Muestra 1	0.36	Comercial bajo carbono	76 - 81 %	Tipo piel [0.05 mm]
Muestra 2	0.37			
Muestra 3	0.38			
Muestra 4	0.40			
Muestra 5	0.46			
Muestra 6	0.49			
Muestra 7	0.50			

Tabla 4. *El análisis químico reportado para la colada representativa de cada rollo, tratándose para todos los casos de acero de bajo carbono comercial.*

Identificación	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Al (%)	Si (%)
Muestra 1	0.06	0.18	0.014	0.005	0.050	0.007
Muestra 2	0.10	0.34	0.014	0.007	0.044	0.011
Muestra 3	0.09	0.34	0.015	0.008	0.034	0.008
Muestra 4	0.05	0.23	0.012	0.009	0.046	0.030
Muestra 5	0.06	0.18	0.009	0.014	0.037	0.009
Muestra 6	0.10	0.36	0.016	0.018	0.042	0.014
Muestra 7	0.09	0.35	0.016	0.020	0.044	0.009
Promedio	0.08	0.28	0.013	0.011	0.042	0.012

3.3 Ensayos mecánicos

Los ensayos realizados para cada muestra en su condición lisa y embozada fueron de tensión uniaxial longitudinal, valor *n*, tamaño de grano, microdureza Vickers, y dureza Rockwell. La norma internacional de referencia y el equipo a utilizar se detallan en la tabla 5:

Tabla 5. *Ensayos, normas de referencia internacionales y equipos utilizados para el plan de experimentos.*

Ensayo	Norma	Equipo
Tensión	ASTM E8	Máquina de tensión universal ZWICK Z 250
Valor <i>n</i>	ASTM E646	Extensómetro longitudinal ZWICK BT2-EXMACRO H11
Tamaño de grano	ASTM E112	Microscópio óptico ZEISS Observer Z1
Microdureza Vickers	ASTM E92	Microdurómetro PS-LA-B03-004
Dureza	ASTM E18	Durómetro Rockwell

El ensayo de tensión uniaxial de acuerdo con la norma ASTM E8 representó el ensayo más importante para el presente estudio debido al comportamiento de los materiales metálicos bajo la influencia de una fuerza de tensión. En este trabajo, los ensayos de tensión fueron realizados con probetas tamaño 2A de acuerdo con ASTM E8. Las dimensiones de la probeta se indican en la Tabla 6 y se ilustran en la Figura 11. Todos los ensayos fueron realizados en el sentido longitudinal de laminación, diferenciándose en el espesor. Para cada probeta evaluada se obtuvo la curva de tensión y fractografía para observar mecanismo de falla posterior a la ruptura.

Para la determinación del valor n o coeficiente de acritud, se utilizó la norma ASTM E646, estableciendo el rango de deformación entre 10% y 20% como intervalo de análisis para el cálculo del endurecimiento por deformación

En cuanto al tamaño de grano la norma utilizada fue la ASTM E112 utilizando microscopía óptica, la revisión contempló la sección transversal permitiendo observar morfología y tamaño de grano en toda la sección del espesor.

La microdureza Vickers fue medida en base a la norma ASTM E92 utilizando microdurómetro, entre cada indentación se consideró una distancia de 0.1 mm realizando perfil transversal de 6 lecturas en la cara superior, 6 lecturas en mitad y 6 lecturas en la cara inferior con el fin de evaluar la influencia del embozado sobre las superficies externa e interna.

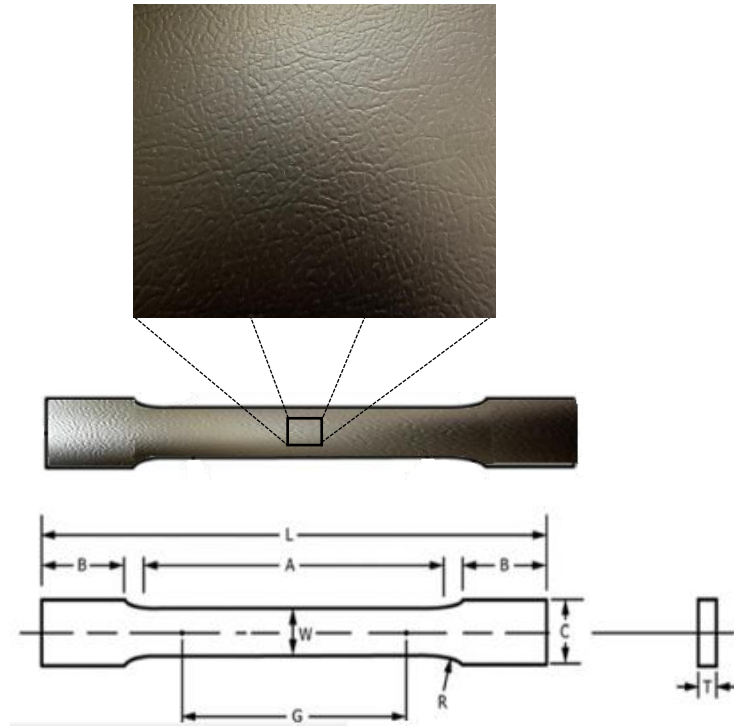


Figura 11. *Probeta de tensión embozada con dimensiones basadas en ASTM E8.*

Tabla 6. Referencia internacional bajo ASTM E8 tomada en cuenta para preparación dimensional de probeta embozada.

Sigla	ASTM E8 (2A)	
	mm	
	Mínimo	Máximo
G (Longitud de la sección calibrada)	50.67	50.93
W (Ancho)	12.44	12.95
R (Radio)	12.54	N/A
L (Longitud total)	305.00	N/A
A (Longitud de la sección reducida)	57.15	N/A
B (Longitud de zona de mordaza)	101.60	N/A
C (Ancho aprox. Zona de mordaza)	19.05	N/A

3.4 Modelación y simulación

Se utilizó el software de métodos numéricos avanzados Comsol en su modalidad de prueba gratuita para modelar y simular condiciones de carga en diferentes espesores abarcando desde 0.4 mm hasta 0.5 mm.

Primero se modeló la carcasa o gabinete de refrigerador considerando las siguientes dimensiones: 1714 mm x 781.27 x 763.67 mm variando los espesores de lámina (mm): 0.40, 0.41, 0.42, 0.43, 0.44, 0.45, 0.46, 0.47, 0.48, 0.49, 0.50. A la carcasa o gabinete se le integró un componente interior de espuma de poliestireno de espesor de 60 mm, un respaldo y base de acero galvanizado con espesor de 0.35 mm.

Para la simulación se utilizó un mallado fino y las condiciones de carga fueron de compresión, simulando el apilamiento realizado en el almacenaje, analizando desde 3,800 lb (1723.65 kg) hasta 8,000 lb (3628.74 kg) con el fin de evaluar el % de desplazamiento y el esfuerzo de von Mises.

Capítulo 4.- Análisis y discusión de resultados

4.1 Ensayo de tensión

4.1.1 Probeta lisa

Debido a su utilización común en la industria de línea blanca, los aceros comerciales bajo carbono son elegidos por su amplia oferta dimensional, precio y características mecánicas adecuadas para las operaciones de conformado a las que son destinados. Los espesores utilizados son generalmente delgados y los más comunes van desde los 0.36 mm y hasta los 0.5 mm debido a que los clientes constantemente buscan componentes ligeros, pero sin perder resistencia y rigidez.

En la tabla 7 se muestran los resultados de las pruebas de tensión, obtenidos para probeta lisa sin embozar para los diferentes espesores. Se obtuvo una resistencia a la cedencia, σ_y , promedio de 32 Ksi (221 MPa) y una resistencia a la tensión, σ_{UTS} , promedio de 52 Ksi (352 MPa). El porcentaje de elongación promedio es de 33% y el valor n es de 0.20 en promedio. Este tipo de propiedades mecánicas son obtenidas gracias a porcentajes de reducción en frío entre 76-81% y prácticas metalúrgicas en procesos de recocido diseñadas para grado comercial. Estas propiedades iniciales se utilizan en este estudio como una referencia y para cuantificar los cambios de estas propiedades mecánicas después del embozado.

Tabla 7. Resultados de propiedades mecánicas como probeta lisa.

Identificación	Espesor (mm)	σ_y (Ksi)	σ_{UTS} (Ksi)	% el	Valor n
Muestra 1	0.36	33	50	34	0.20
Muestra 2	0.37	32	52	31	0.20
Muestra 3	0.38	32	51	32	0.20
Muestra 4	0.40	32	47	34	0.20
Muestra 5	0.46	34	54	34	0.22
Muestra 6	0.49	32	52	35	0.22
Muestra 7	0.50	30	51	35	0.22
Promedio	0.42	32	51	33	0.20

Como se observa en las figuras 12 y 13, las tendencias de las propiedades mecánicas de resistencia a la cedencia (σ_y) y tensión máxima (σ_{UTS}) con respecto al cambio de espesor fueron típicas y se encontraron de los rangos establecidos para estos grados, además no se visualiza una variación destacable debido a la diferencia de espesores de 0.14 mm entre el espesor más alto (0.5 mm) contra el más bajo (0.36 mm), este comportamiento también se explica debido a que todos los materiales se fabricaron bajo condiciones similares dentro de los límites de las variables establecidas para grado comercial. Los rangos por especificación van de 25 – 55 ksi para σ_y y 35 y 65 ksi para σ_{UTS} . En los gráficos de las Figuras 14 y 15, se aprecia una tendencia con mayor pendiente para el caso del % de elongación y valor n observando que para espesores más delgados se obtiene menor valor de elongación. En el caso del valor n o coeficiente de endurecimiento por deformación, el valor disminuye también para los espesores delgados debido a que, en materiales laminados en frío, el porcentaje de reducción suele ir acompañado de un aumento en la deformación previa por trabajo en frío, lo que puede reducir la capacidad del material para seguir endureciéndose bajo deformación adicional.

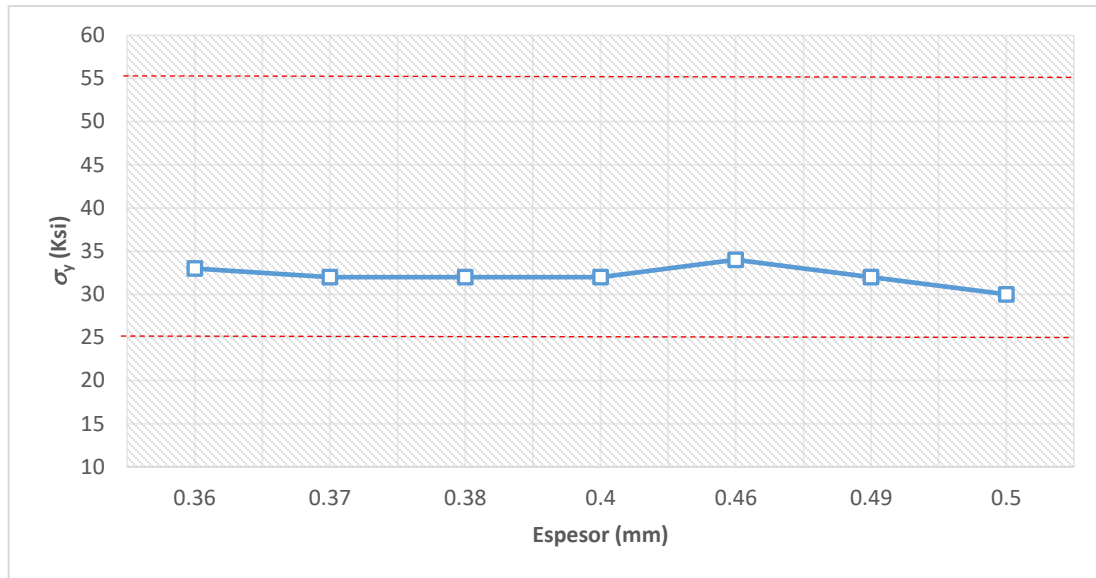


Figura 12. Variación de la resistencia a la cedencia, σ_y , con respecto al cambio de espesor en probeta lisa.

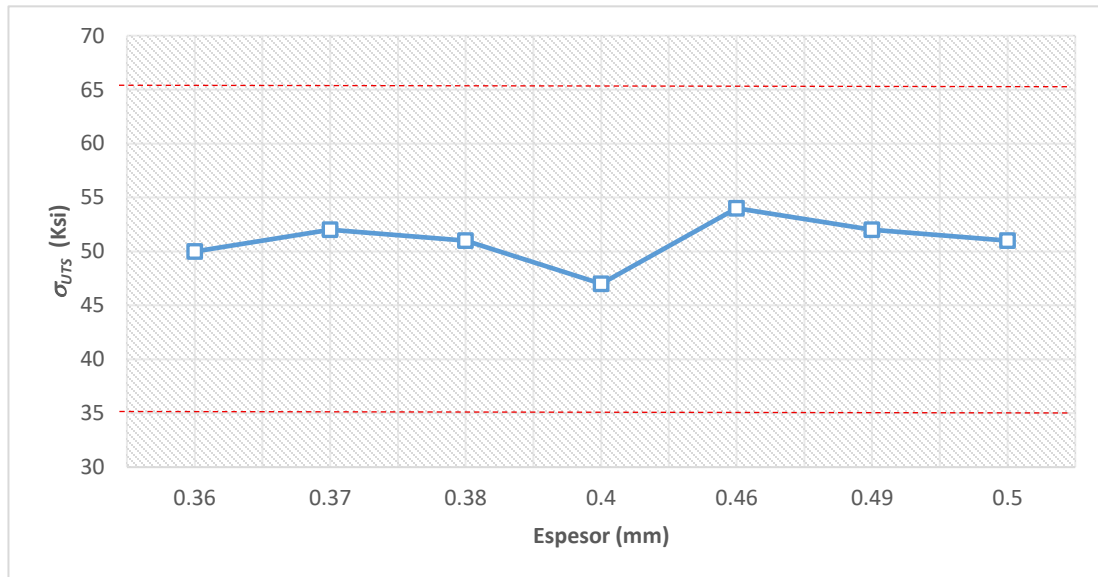


Figura 13. Variación de la resistencia a la tensión, σ_{UTS} , con respecto al cambio de espesor en probeta lisa.

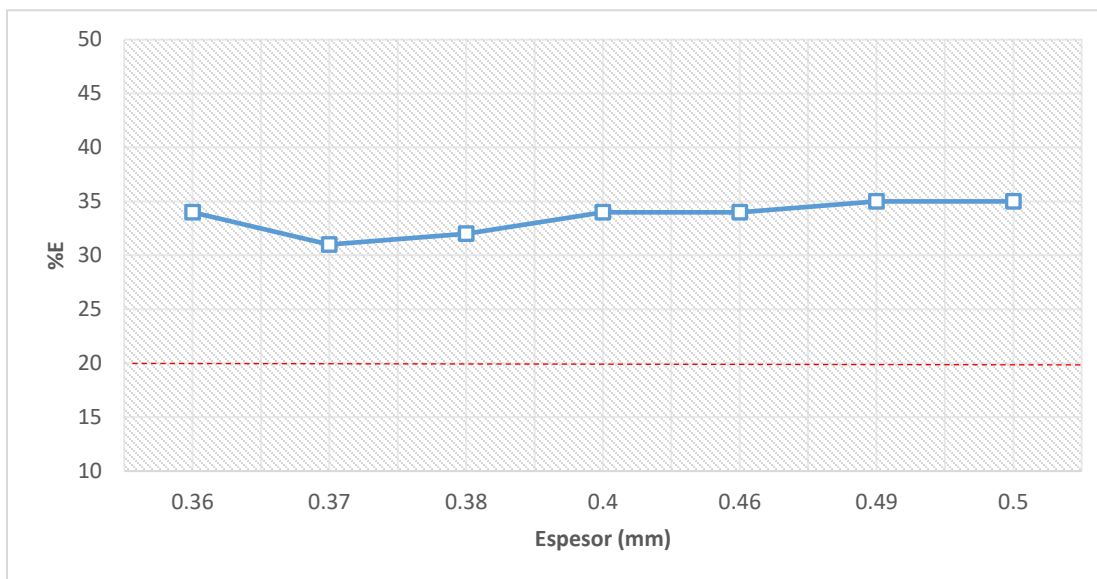


Figura 14. Variación del % de elongación con respecto al cambio de espesor en probeta lisa.

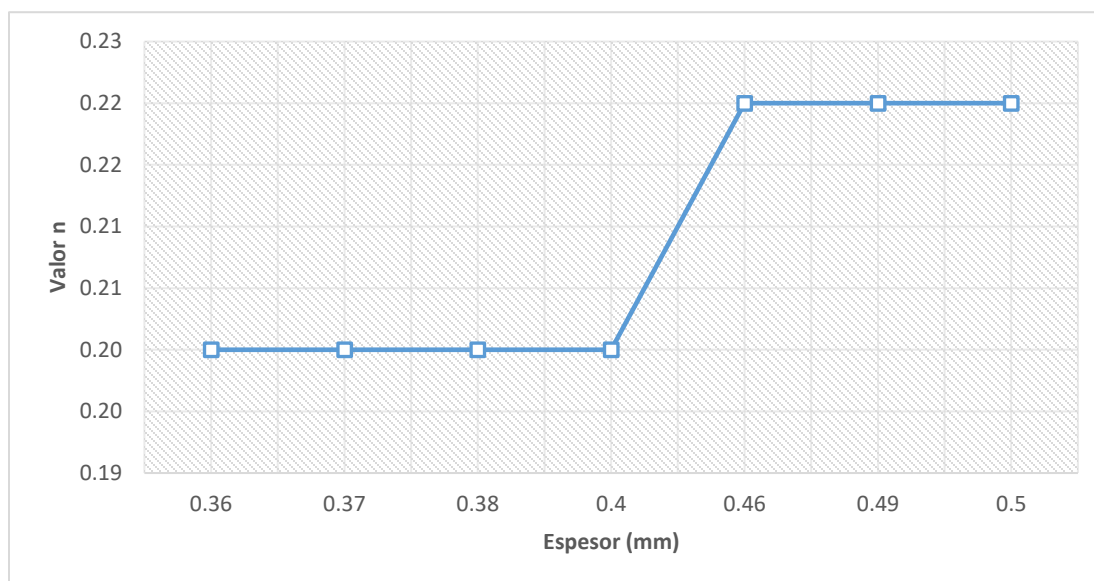


Figura 15. Variación del valor n con respecto al cambio de espesor en probeta lisa.

Al realizar una extrapolación con base en resultados históricos de espesores por arriba de 0.5 mm y hasta 1.5 mm se observa en la figura 16 una tendencia pronunciada en donde con mayor espesor, mayor será el valor de elongación. Cuando un material más grueso se somete a una carga uniaxial, las tensiones se distribuyen de manera más gradual a través del espesor, lo que puede ayudar a que el material se deforme de manera más uniforme antes de llegar al punto de fractura, incrementando la elongación total; adicional a que conforme se incrementa el espesor, es posible que la microestructura sea más homogénea en la dirección de la carga debido a una mayor capacidad para ajustar el proceso de enfriamiento o la fabricación, lo que puede influir en la ductilidad. Un acero más grueso puede tener un tamaño de grano diferente u optimizado para elongarse, lo que contribuye a una mayor deformación plástica.

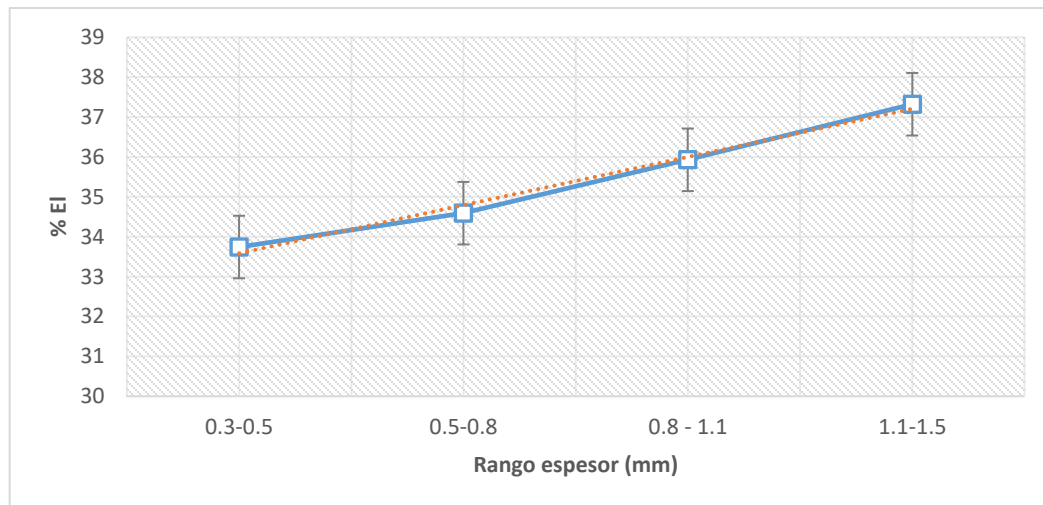


Figura 16. Variación del porcentaje de elongación con respecto al cambio de espesor en probeta lisa utilizando datos históricos.

4.1.2 Probeta embozada

Enseguida se discuten los resultados de propiedades mecánicas obtenidos de los ensayos de tensión realizados a las probetas embozadas bajo el mismo patrón y profundidad de embozado de 0.05 mm. Para todas las probetas ensayadas se validó y fotografió la zona de fractura para asegurar que los ensayos fueran adecuados para la investigación, debido al riesgo de ruptura en los bordes de la sección calibrada, el cual es atribuido a posible endurecimiento por deformación heterogénea generado por el embozado. En este estudio, todas las probetas tuvieron un comportamiento normal de falla por esfuerzo cortante a 45°, como se ilustra en la Figura 17. Estos resultados se compararon contra los resultados de material liso para caracterizar los efectos del embozado que serán discutidos a continuación.



Figura 17. *Probeta embozada posterior a ensayo de tensión, comportamiento normal de falla por esfuerzo cortante a 45° observado para todos los materiales ensayados.*

Tabla 8. Resultados de propiedades mecánicas de acero grado comercial embozado

Identificación	Espesor (mm)	σ_y (Ksi)	σ_{UTS} (Ksi)	%E	Valor n
Muestra 1	0.36	29	45	27	0.18
Muestra 2	0.37	39	53	24	0.13
Muestra 3	0.38	33	48	32	0.17
Muestra 4	0.40	34	43	34	0.16
Muestra 5	0.46	44	58	26	0.11
Muestra 6	0.49	37	51	28	0.16
Muestra 7	0.50	38	52	28	0.15
Promedio	0.42	36	50	29	0.15

4.1.3 Análisis comparativo de las probetas lisas y embozadas.

De acuerdo con los resultados obtenidos para las probetas lisas (Tabla 7) y embozadas (Tabla 8) y realizando comparativa de propiedades mecánicas, en general para el caso de la resistencia a la cedencia se observa un incremento promedio del 12 %, pasando de 32 ksi (221 MPa) para las probetas sin embozar a 36 ksi (248 MPa) para las probetas embozadas. Realizando revisiones particulares por espesor como es mostrado en la figura 18, el incremento en los espesores más delgados entre 0.36 y 0.40 mm es del 4.6%, para el espesor intermedio de 0.46 mm fue del 6.2% y para los más gruesos entre 0.49 y 0.50 mm, fue de 21% como se muestra en la figura 18. Estos incrementos en resistencia a la cedencia están relacionados con la deformación por trabajo en frío inducida por el rodillo embozador a la superficie del acero, esta deformación origina generación y movimiento de dislocaciones y reacondo de los granos creando superficies más compactas o con mayor densidad de

dislocaciones reduciendo el espacio para que se muevan libremente traducido en un incremento de la resistencia de cedencia.

Como era de esperarse, debido a la deformación localizada inducida por el embozado y a la relación inversa típica entre cedencia y elongación para este tipo de aceros, el valor del porcentaje de elongación total se vio reducido en promedio un 12%, pasando de 33% en probeta sin embozar a 29% para las probetas embozadas. Analizando cada caso como se muestra en la figura 19, la disminución en los espesores más delgados en el rango de 0.36 a 0.40 mm fue de un 10.7% siendo el menos pronunciado, mientras que para el espesor intermedio de 0.46 mm la disminución fue del 23.5% y finalmente para los espesores más gruesos de 0.49 a 0.50 mm de, el decremento fue de 15.7%. Estos resultados indican que, debido al endurecimiento por deformación, el material se volvió menos capaz de deformarse plásticamente, lo que se traduce en una menor capacidad de elongación o ductilidad.

Para el caso de la resistencia a la tensión se observó una ligera disminución del 1.9 % en promedio, para todos los casos con probeta embozada siendo esta la diferencia menos marcada. El comportamiento general para todos los espesores es graficado en la figura 20. Si bien es cierto que es inusual que el límite de cedencia aumente sin que también haya un incremento en la resistencia la tensión, en el caso de un acero deformado por un proceso de embozado metalúrgicamente esta estabilidad en la resistencia a la tensión puede deberse a que al ser el embozado una deformación superficial, la estructura interna de la matriz no experimenta un cambio significativo en términos de endurecimiento en todo el volumen del material. Esto significa que el aumento en el límite de cedencia proviene más de un endurecimiento localizado, afectando solamente esta propiedad sin producir un cambio

significativo en la resistencia a la tensión del material porque no hay una transformación metalúrgica completa que refuerce el material en toda su sección. Realizando una comparativa con lo reportado en literatura, en el estudio de Walzer (2019) el valor de resistencia a la tensión tuvo un incremento muy inferior (menor al 50%) comparado con el cambio observado para la resistencia a la cedencia.

Finalmente, para el coeficiente de endurecimiento por deformación o valor n , se encuentra una variación significativa del 25% pasando de 0.20 como probeta lisa a 0.15 como probeta embozada como se observa en la Figura 21, esto puede ser atribuido a que debido a la naturaleza del proceso de embozado donde se introducen deformaciones plásticas en el material que terminan disminuyendo su capacidad para seguir endureciéndose en una prueba de tensión. Además de que la geometría irregular de la probeta embozada provoca concentraciones de esfuerzo y puede inducir deformación localizada más rápida que en la probeta lisa. Por las características de la profundidad de embozado aplicado de 0.05 mm, esta reducción efectiva de espesor en ciertas zonas de la muestra, puede influir en el valor n , ya que como se vio anteriormente en el análisis de la probeta lisa, materiales más delgados tienden a mostrar valores más bajos de endurecimiento por deformación.

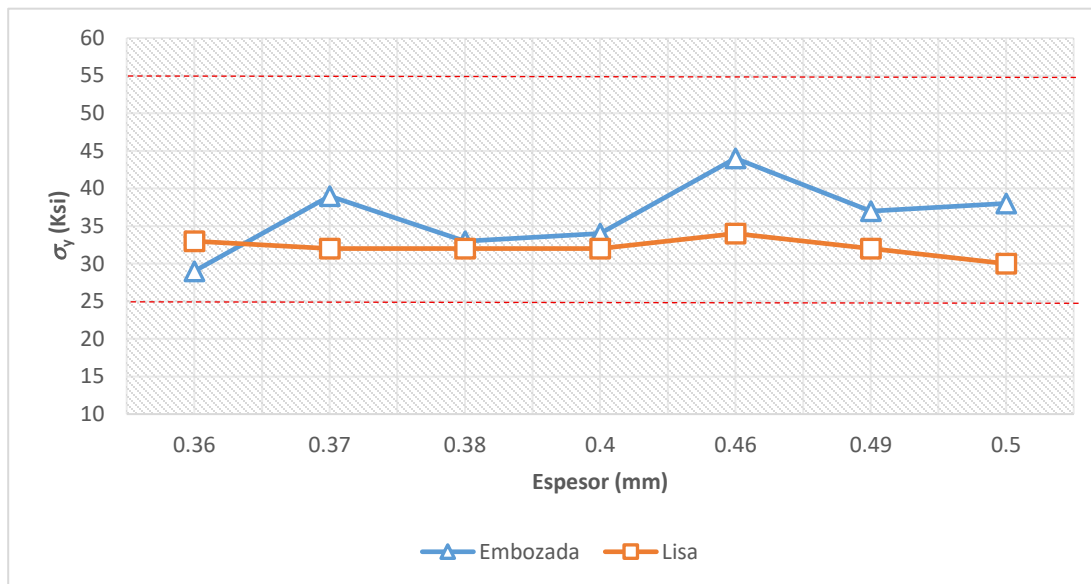


Figura 18. Variación comparativa entre probeta embozada y lisa de la resistencia a la cedencia, σ_y , contra espesor de probeta

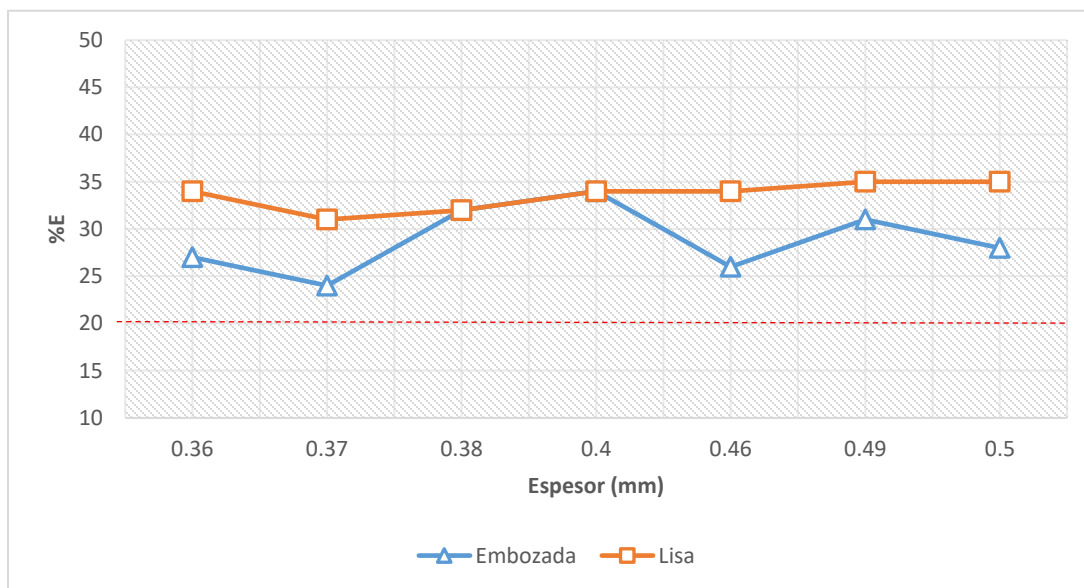


Figura 19. Variación comparativa entre probeta embozada y lisa del % de elongación contra espesor de probeta.

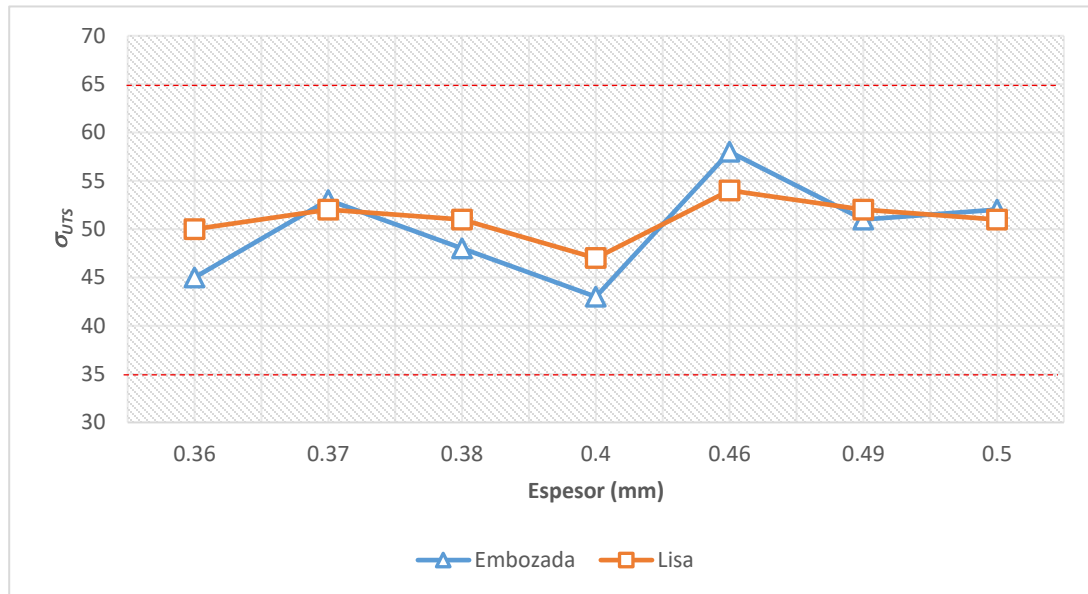


Figura 20. Variación comparativa entre probeta embozada y lisa de la resistencia a la tensión, σ_{urs} , contra espesor de probeta.

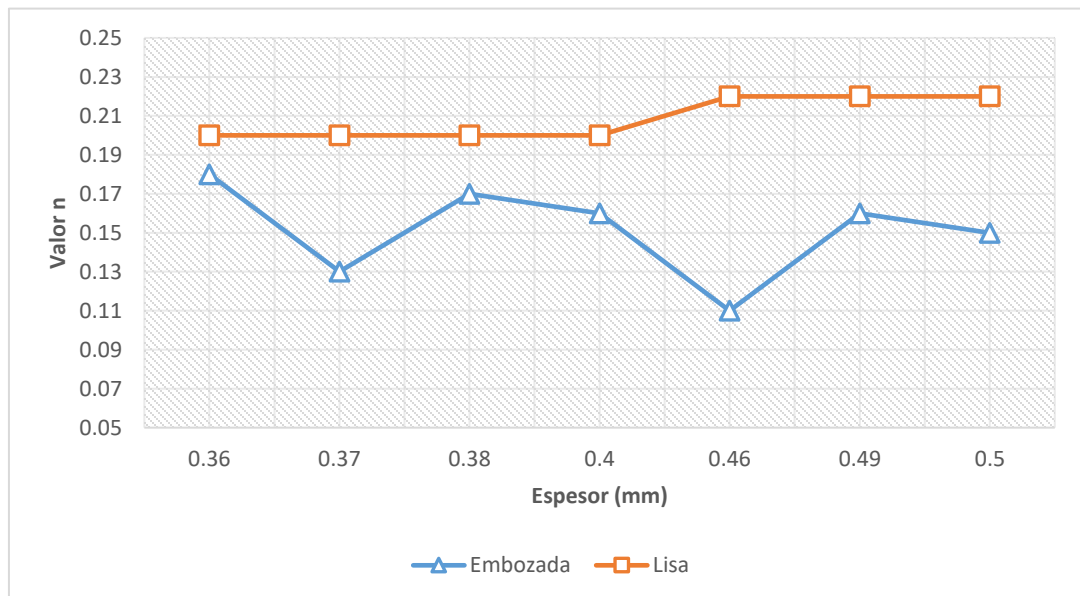


Figura 21 Variación comparativa entre probeta embozada y lisa del valor n contra espesor de probeta.

4.2 Microdureza Vickers

La figura 22 muestra la distribución comparativa entre probeta lisa y embozada de dureza Vickers agrupando los espesores en bajo (0.37 mm) intermedio (0.45 mm) y alto (0.5 mm), la gráfica se subcategoriza por espesor de probeta, y posición de ensayo. Inicialmente es destacable el incremento promedio de un 11.8 % para los valores de microdureza Vickers de la probeta embozada. Este aumento considerable en microdureza valida el endurecimiento por deformación que fomentó el embozado atribuido a una deformación plástica superficial. Realizando un análisis puntual por espesores, para los más delgados de 0.37 mm no se observan grandes diferencias, tendencias que cambian significativamente conforme aumenta el espesor encontrando valores mucho más contrastantes para los espesores de 0.45 mm y 0.5 mm. Esta baja variación para espesores delgados se puede explicar debido a que existe menos volumen de material disponible para acumular dislocaciones, el material pudo haber alcanzado un estado de saturación de endurecimiento más rápido, limitando el incremento en microdureza. De manera general, se puede atribuir a que el acero más delgado tiene menos capacidad de endurecimiento adicional en comparación con espesores mayores.

En general se observa mayor valor de microdureza para las zonas superior e inferior que son las que se encuentran más externas y reciben la principal deformación del rodillo embozador. Este incremento era esperado debido a la deformación localizada del embozado en las caras externas. La ligera diferencia entre los valores por cada posición de ensayo puede atribuirse al tamaño de la indentación que prácticamente cubre 1/3 del espesor por posición,

así como a la distancia entre indentación que fue de 0.1 mm como se puede visualizar en la figura 19.

En cambio, para la muestra lisa, la microdureza presenta menos variación por posición representado por las barras de error. Esto se explica debido a que la muestra sin embozar tiene una estructura más homogénea con menor presencia de dislocaciones. Al provenir ambas muestras de mismo grado de acero y condiciones de fabricación, las diferencias en dureza serán explicadas más adelante por las variaciones en microestructura y tamaño de grano.

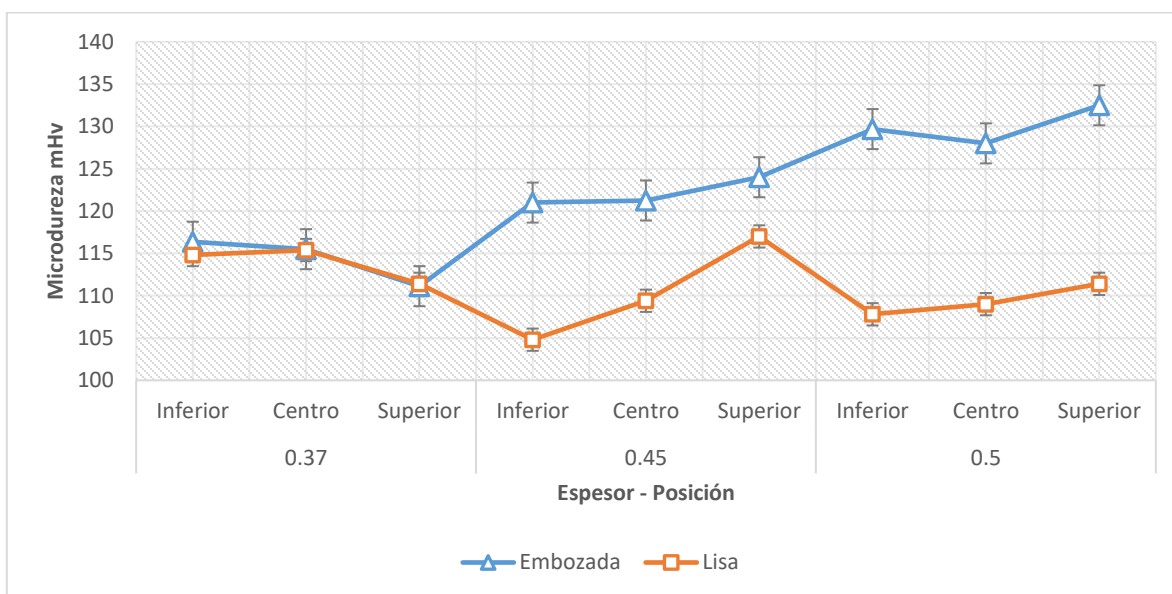


Figura 22 Distribución de microdureza Vickers entre probeta lisa y embozada para los espesores 0.37, 0.45 y 0.5 mm. Se muestran los valores de acuerdo con la zona de indentación: inferior, centro y superior.

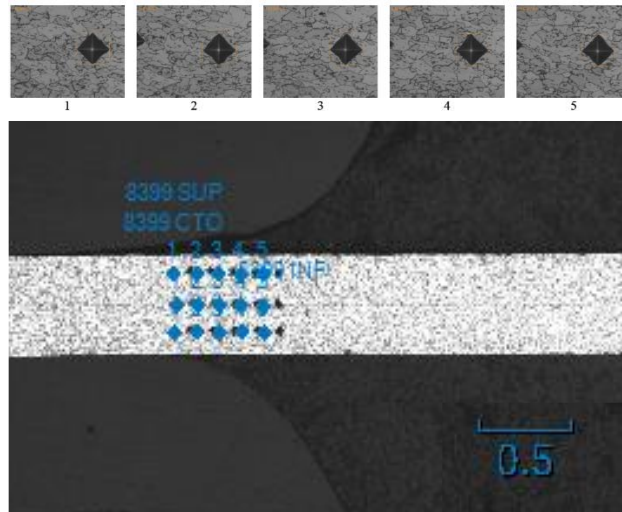


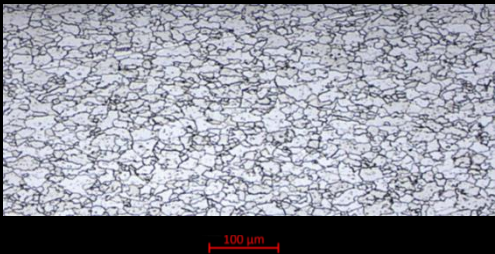
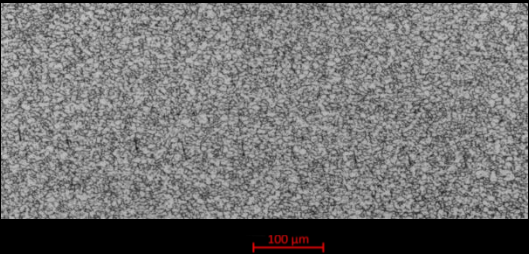
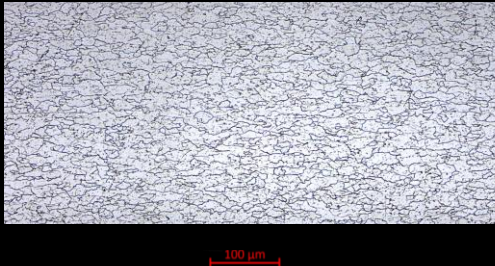
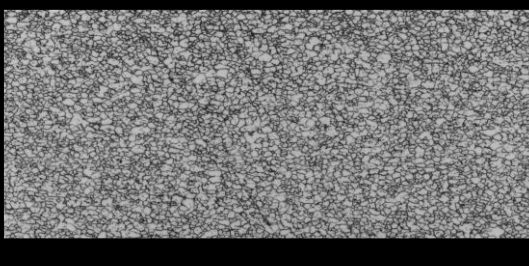
Figura 23. Micrografías de microdureza Vickers realizadas en corte transversal, huellas de indentación señaladas en azul. Por muestra se realizaron 5 indentaciones por cara: superior, centro e inferior.

4.3 Tamaño de grano

Para el caso del tamaño de grano se realizan mediciones comparativas de las probetas lisas sin embozar contra las probetas embozadas en los espesores de 0.37, 0.45 y 0.5 mm. De manera general, se observa una disminución aparente del tamaño de grano ASTM, de un 22% para las probetas embozadas. Dado que el embozado se realiza en frío, no existen las condiciones para que se lleve a cabo la recrystalización, por lo que el comportamiento detectado sugiere que el embozado provoca una distorsión en los granos en la región cercana a las superficies, lo que es consistente con la deformación plástica que introduce. Como se aprecia en la Figura 24, para el espesor de 0.37 mm, el tamaño de grano aparente es mayor en la probeta lisa (~ 7.5 ASTM) y aún más fino en la embozada (~ 10 ASTM). Para 0.45 mm, ambos materiales tienen valores similares ($\sim 7.5 - 8$ ASTM), indicando que el efecto del embozado no generó tanta distorsión de grano en este espesor o afectó mayormente las

superficies más externas comprobando que el efecto del embozado sobre el tamaño de grano se limita a una fracción muy delgada del espesor. Para 0.5 mm, el tamaño de grano aparente vuelve a reducirse más en la condición embozada (~ 10 ASTM), mientras que la probeta lisa solo muestra un ligero refinamiento (~ 8 ASTM). Con estos resultados puede concluirse que el embozado produce un refinamiento aparente del grano en la superficie, lo cual contribuye también a mayor microdureza en comparación con la probeta lisa. De acuerdo a la teoría de dislocaciones, la distorsión de la estructura granular en las probetas embozadas, está asociada al incremento en la densidad de dislocaciones. Este fenómeno puede interpretarse como una subestructura de deformación y puede observarse en las imágenes incluidas en la Tabla 9.

Tabla 9. Micrografías comparativas entre probeta lisa y embozada para los espesores de 0.37, 0.45 y 0.45 mm observando la medición de tamaño de grano ASTM

Espesor (mm)	Condición	
	Lisa	Embozada
0.37		
Tamaño de grano ASTM	7	11
0.45		
Tamaño de grano ASTM	8	9
0.5		
Tamaño de grano ASTM	7	11

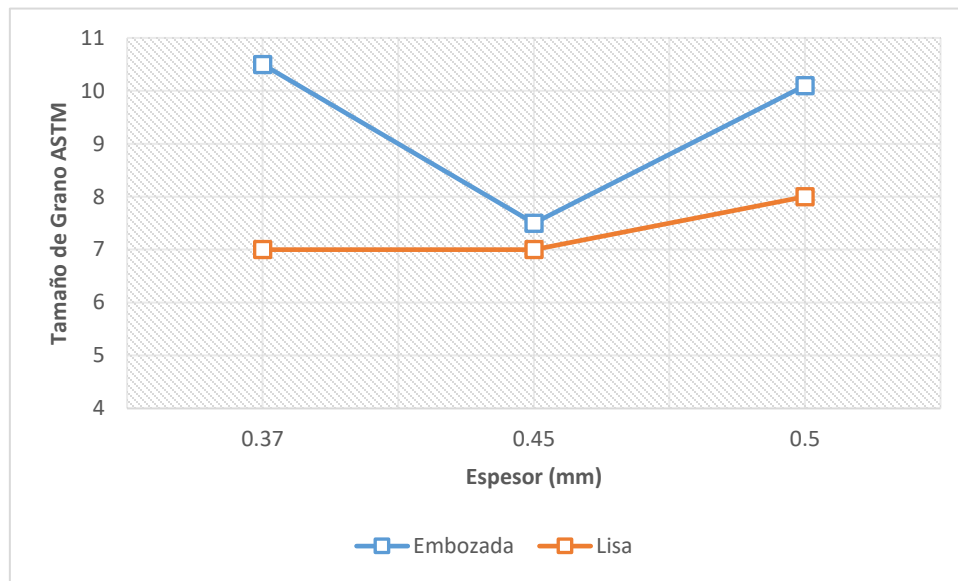


Figura 24. *Tamaño de grano promedio comparativo entre probeta lisa y embozada para los espesores 0.37, 0.45 y 0.5 mm*

4.4 Modelación y simulación

Primero se modeló la carcasa o gabinete de refrigerador considerando las siguientes dimensiones: 1714 x 781.27 x 763.67 (mm) variando espesores de lámina 0.40, 0.41, 0.42, 0.43, 0.44, 0.45, 0.46, 0.47, 0.48, 0.49, 0.50 (mm). A la carcasa o gabinete se le integró un componente interior de espuma de poliestireno con espesor de 60 mm, rodeando todos los laterales; se integró el respaldo y la base de acero galvanizado de espesor de 0.35 mm. El modelo de cada componente modelado se muestra en la Figura 21.

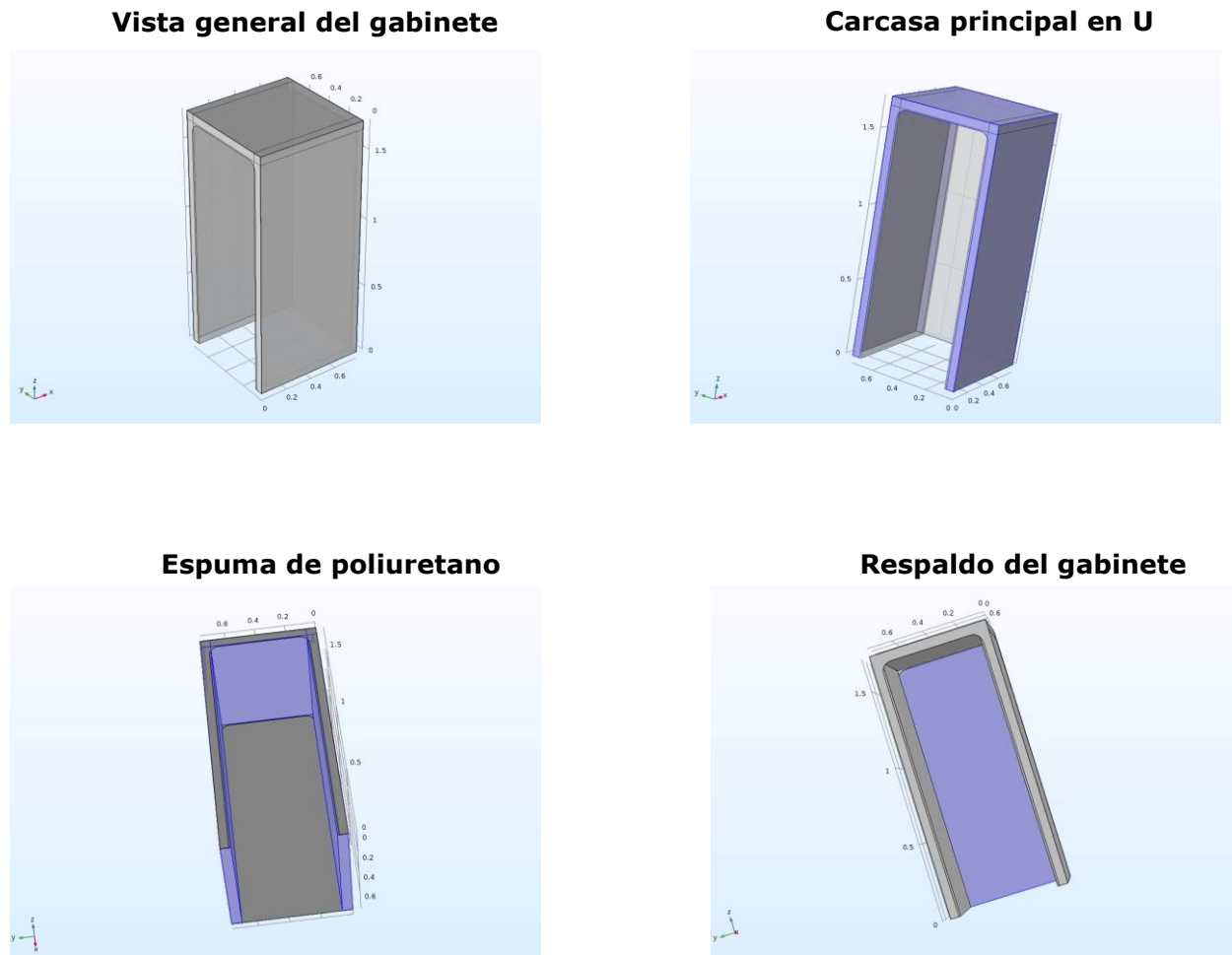


Figura 25. Componentes del gabinete considerados para modelación: Carcasa en U con espesor variable, espuma interior de poliuretano, respaldo y fondo de gabinete.

Para la simulación se utilizó un mallado fino y las condiciones de carga fueron de compresión, simulando el apilamiento realizado en el almacenaje evaluando 3800 lb (1723.65 kg) con el fin de evaluar el % de desplazamiento y el esfuerzo de von Mises.

Los estudios de simulación arrojaron que conforme disminuía el espesor, sería mayor el desplazamiento o afectación por carga, como puede apreciarse en las Figuras 26 y 27. Adicionalmente, se calculó el esfuerzo de von Mises, Figuras 28 y 29, obteniendo valores más altos para los espesores más delgados, indicando que estos están más cerca de alcanzar su límite de cedencia o de entrar en el régimen plástico, lo que puede traducirse en una falla para este tipo de aplicaciones. Estos comportamientos encontrados subrayan la importancia de incrementar la resistencia a la cedencia de los aceros con espesor delgado utilizados para estas aplicaciones y prevenir fallas, colapsos, pandeamientos o golpes propiciados por el procesamiento, manejo y almacenamiento de estos productos.

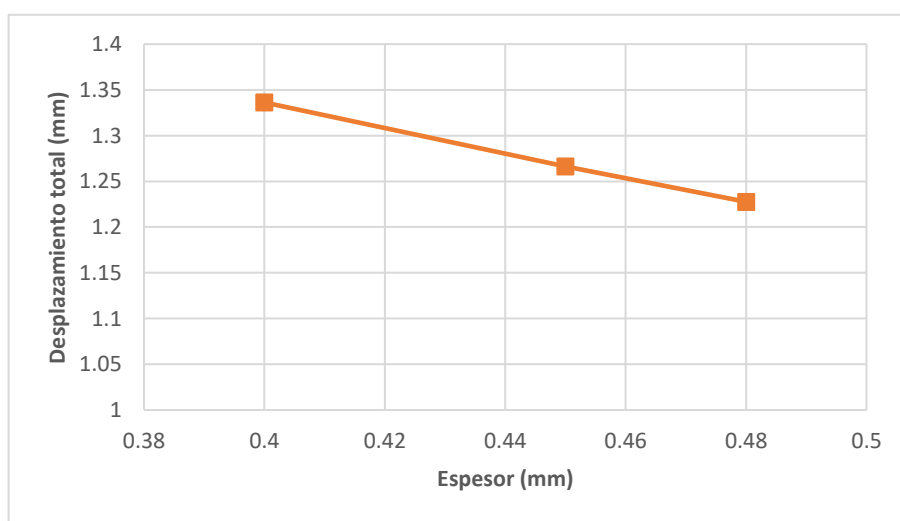


Figura 26. Desplazamiento total en mm contra espesor (mm)

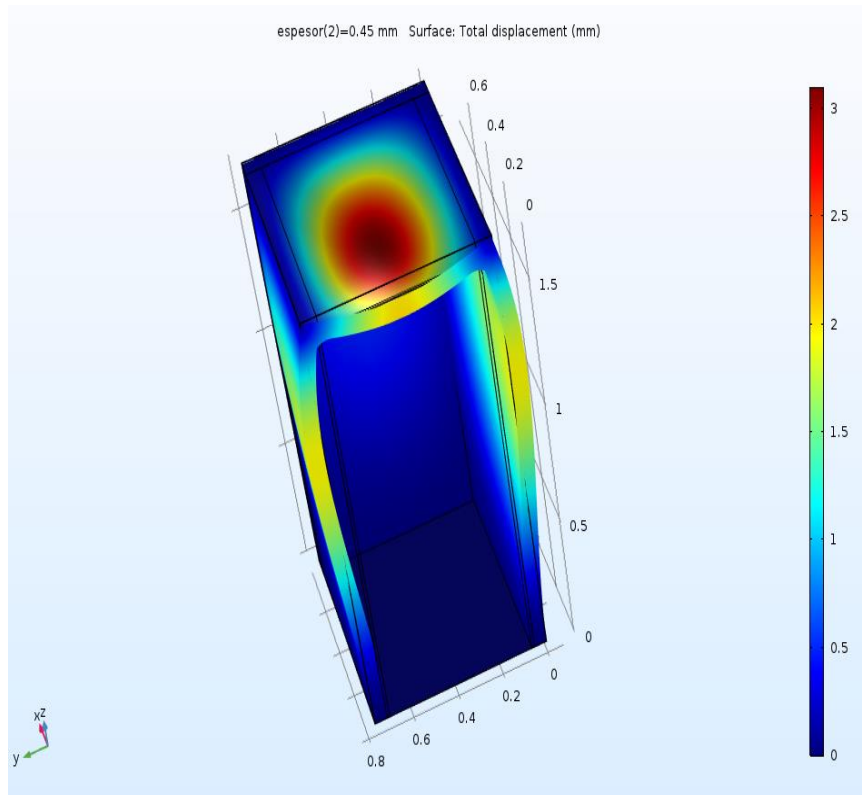


Figura 27. Resultado de simulación para espesor 0.45 mm observando el desplazamiento total en mm considerando carga de 3,800 lb (1723.65 kg).

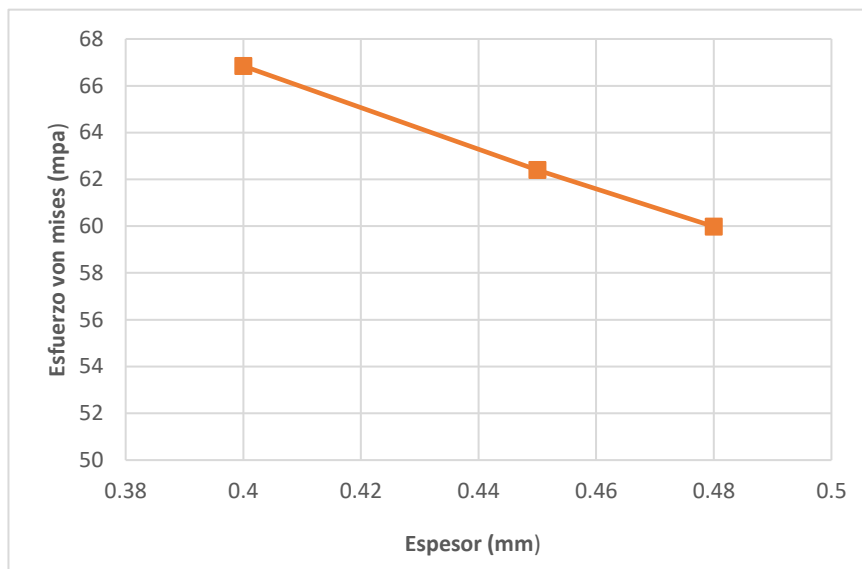


Figura 28. Esfuerzo de von Mises (MPa) contra el espesor (mm)

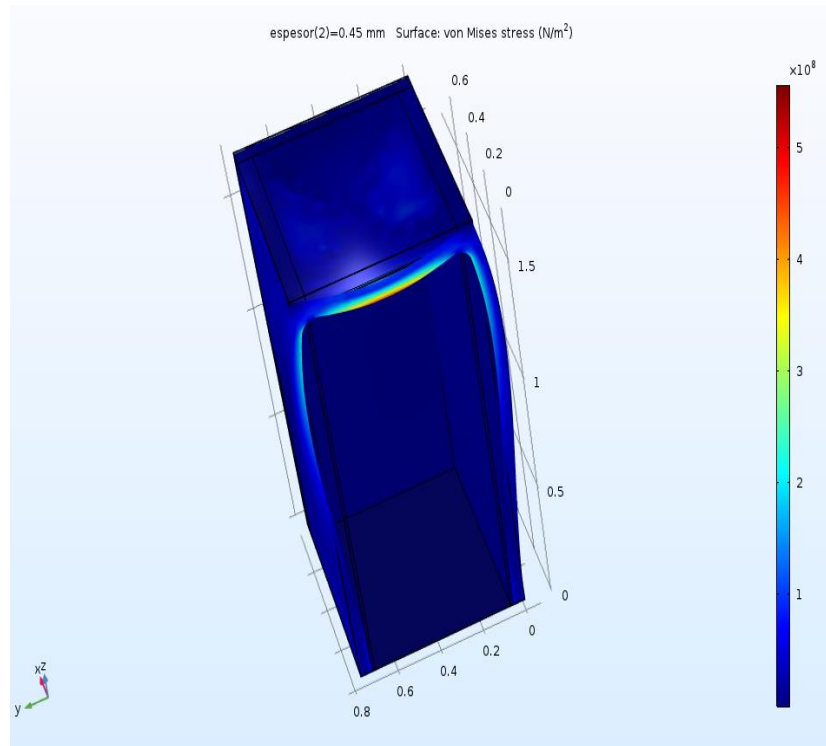


Figura 29. Resultado de simulación para el espesor de 0.45 mm, observando el esfuerzo de von Mises, considerando una carga de 3,800 lb (1723.65 kg).

Capítulo 5.- Conclusiones y recomendaciones

En este estudio se evaluaron los efectos del embozado sobre las propiedades mecánicas y la estructuralidad de aceros comerciales con espesores comprendidos entre 0.35 y 0.50 mm.

De manera general, se confirmó un efecto positivo del embozado sobre las propiedades mecánicas de los aceros comerciales utilizados en la fabricación de gabinetes para línea blanca. Todas las muestras embozadas mostraron un incremento significativo en la resistencia a la cedencia, con un aumento promedio del 12 %, acompañado de una disminución del 12 % en el porcentaje de elongación. Sin embargo, esta reducción en ductilidad no superó en ningún caso los límites de especificación típicos requeridos por el sector de línea blanca.

No obstante, resulta pertinente realizar investigaciones más profundas en aplicaciones donde se requieran piezas con grados de conformado más complejos, y donde el porcentaje de elongación tenga una mayor relevancia funcional.

La propiedad menos afectada por el proceso de embozado fue la resistencia a la tensión, lo que indica que la deformación superficial localizada atribuida al embozado no impactó significativamente el interior o la matriz completa del material. Esto explica que el aumento en la resistencia a la cedencia provenga principalmente del endurecimiento por deformación localizado en la superficie.

Se observó un incremento notable en la microdureza Vickers promedio, del orden del 11.8 % en las probetas embozadas. Este aumento sustancial valida el endurecimiento por deformación superficial inducido por el proceso de embozado, atribuido a la deformación

plástica localizada. El embozado también provocó una distorsión en la microestructura, asociada a la deformación de los granos cercanos a las superficies de la lámina de acero.

Finalmente, para evaluar la estructuralidad del acero, se modeló un gabinete estándar utilizado en línea blanca y se simularon condiciones típicas de carga por compresión o apilamiento. Se analizó el porcentaje de desplazamiento en función del espesor, encontrando que a menor espesor corresponde un mayor desplazamiento o afectación por carga. Además, el esfuerzo de von Mises calculado fue mayor en los espesores más delgados, lo que indica que estos están más próximos a alcanzar su límite de cedencia o a entrar en el régimen plástico.

Estos hallazgos subrayan la importancia de incrementar la resistencia a la cedencia en aceros de espesor reducido para estas aplicaciones, con el fin de evitar fallas, colapsos, pandeamientos o daños provocados durante el procesamiento, manejo y almacenamiento de los productos, finalmente se puede concluir que los objetivos planteados al inicio de este trabajo fueron satisfactoriamente alcanzados.

Referencias

- A1008, A. (2001). *Standard Specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy and High-Strength Low-Alloy with Improved Formability*.
- A653, A. (2020). *Standard Specification for Steel Sheet, Zinc Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process*.
- Blickwede, D. (1968). Micrometallurgy by the Millions. In *ASM*, Vol 61 (pp. 653-679).
- Boardman, B. (2005). Fatigue Resistance of Steels. In *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. Section: Service Characteristics of Carbon and Low-Alloy Steels* (p. 1052).
- C.S. Namoco Jr. a, T. I. (2007). Influence of Embossing and Restoration on the Mechanical Properties of Aluminum Alloy Sheets. *Journal of Materials Processing Technology*.
- David Hudok, J. M. (2005). Carbon and Low-Alloy Steels. In *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys* (p. 344).
- EPC, W. R. (2022). *Willingint*. Retrieved from Willingint: <https://www.willingint.com/machinery-equipment/embossing-machine/>
- Granzow, W. (2005). Formability Characteristics. In *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. Section: Fabrication Characteristics of Carbon and Low-Alloy Steels* (pp. 888-890).
- Granzow, W. (2005). Sheet Formability of Steels. In *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys. Section: Fabrication Characteristics of Carbon and Low-Alloy Steels*. (pp. 875-880).
- Jonas, R. G. (2005). Steel Processing Technology. In *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys* (pp. 197-209).
- K. Yamaguchi, N. T. (1988). In *J. Jpn. Soc. Technol. Plast* 29 (pp. 1145-1151).
- Leonard, R. W. (2005). Precoated Steel Sheet. In *ASM Handbook, Volume 1, Properties and Selection: Irons, Steels, and High Performance Alloys* (pp. 355-360).
- Petch, N. (1959). The Ductile-Cleavage Transition in Alpha-Iron, Fracture. *Technology Press*.
- Stefan Walzer, M. L. (2019). Studies on the influence of Embossing on the Mechanical Properties of High-strenght Sheet Metal. *AIP Conference Proceedings*.
- Subramanian, K. (2005). Influence of Work Material Properties on Finishing Methods. In *ASM Handbook, Volume 5* (pp. 352-354).
- Walter Stefan, L. M. (2020). Novel Approach to Decrease Sheet Thinning during Sheet Metal Forming by using Embossing Technique. *Procedia manufacturing*.
- Yohei Abe, K.-i. M. (2019). Improvement of Sheet Metal Formability by Local Work-hardening with Punch Indentation. *Production Engineering*.