

**DESARROLLO DE MATERIAL LAMINADO EN FRÍO PARA EMBUTICIÓN
PROFUNDA A PARTIR DE UN “ACERO IF” RECOCIDO EN CAMPANA CON
ATMÓSFERA 100% HIDRÓGENO**

ALEJANDRA PATRICIA ALICIA CABALLERO PINILLA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2008

**DESARROLLO DE MATERIAL LAMINADO EN FRÍO PARA EMBUTICIÓN
PROFUNDA A PARTIR DE UN “ACERO IF” RECOCIDO EN CAMPANA CON
ATMÓSFERA 100% HIDRÓGENO**

ALEJANDRA PATRICIA ALICIA CABALLERO PINILLA

Trabajo de grado realizado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director:

Jairo Alfonso Gómez Rodríguez
Coordinador Gestión de Tecnología

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2008

A Dios por darme el regalo más preciado, a mi madre por ser mi fuente de inspiración, por enseñarme a creer en mis sueños, y a ser todo lo que soy hoy, a mis hermanas: Alicia por ser mi mejor amiga, mi confidente, mi gran apoyo, Vale, por darme tantos momentos de felicidad con solo una sonrisa y a Oscar: mi amor por ser mi ángel de la guarda, por acompañarme y darme fuerza en el recorrido de este camino.

El futuro pertenece a quien cree en la belleza de sus sueños.

Eleanor Roosevelt

La sabiduría suprema era tener sueños bastante grandes para no perderla de vista mientras se persiguen.

William Faulkner

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de grado no hubiese podido ser realizado, de no ser por el apoyo ilimitado de tantas personas, que estuvieron a mi lado durante el transcurso de su desarrollo.

En primera instancia, le agradezco a Dios por su incondicionalidad, por no abandonarme en ningún momento y por darme sabiduría y discernimiento en los momentos apropiados para recorrer el camino que culmina parcialmente con este logro.

El más sincero agradecimiento a la empresa Acerías de Colombia S.A. – ACESCO- cuyo apoyo técnico, financiero y humano fue vital para la investigación. Contando siempre con personas dispuestas a colaborar en cualquier momento.

Mis más sinceros agradecimientos al Ingeniero Jairo Gómez, tutor y director del proyecto. Sus conocimientos y pasión por la metalurgia contribuyeron de manera significativa al proceso de aprendizaje, investigación y culminación de esta etapa como estudiante e inicio de la profesional.

Miles de gracias al Profesor Luis Emilio Forero, su apoyo, sus consejos y su gran conocimiento durante el desarrollo de la practica, contribuyeron a la realización del proyecto.

Como poder dejar de agradecer a la Universidad Industrial de Santander, específicamente a la Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de los Materiales encabezada por el Director de la escuela y sus colaboradores como profesores, técnicos, personal administrativo, quienes en su oportunidad me ofrecieron su ayuda.

Gracias a mis amigos, mis compañeros, mi equipo incondicional de trabajo, su gran importancia radica en que durante el tiempo de estudio me acompañaron en los momentos de evasión convirtiéndolos en momentos maravillosos. Además de escucharme y apoyarme en los momentos difíciles.

Finalmente, Gracias a mis padres especialmente a mi madre, mi gran fuente de inspiración quien con gran esfuerzo, perseverancia y lucha, hoy esto que ayer era un sueño se convierte en realidad. Gracias a mis hermanas y a mi novio por su amor y apoyo en todos los momentos.

Por si me hace falta alguien, Gracias a todos!!!

CONTENIDO

| | pág. |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 17 |
| 1. OBJETIVOS | 20 |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL | 20 |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 20 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 21 |
| 3. JUSTIFICACIÓN | 23 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 24 |
| 4.1 GENERALIDADES | 24 |
| 4.2 MATERIA PRIMA: ACERO IF (INTERSTITIAL FREE STEEL) | 26 |
| 4.2.1 Aplicaciones | 27 |
| 4.2.2 Producción | 28 |
| 4.3 PROCESO DE TRANSFORMACION DE LA MATERIA PRIMA | 31 |
| 4.3.1 Proceso de decapado químico de la lámina en caliente (Hot Strip Pickling) | 32 |
| 4.3.2 Proceso de reducción o laminación en frío (Cold Reduction) | 33 |
| 4.3.3 Recocido (Annealing) | 34 |
| 4.3.4 Laminado de temple (Temper Rolling) | 39 |
| 4.3.5 Embobinado, preparación del rollo y corte (Coil preparation and Shearing) | 40 |

| | |
|--|------------|
| 4.4 EMBUTICIÓN | 40 |
| 5. METODOLOGÍA | 44 |
| 5.1 DISEÑO DE EXPERIMENTO | 46 |
| 5.2 CARACTERIZACIÓN | 49 |
| 5.2.1 Propiedades fundamentales | 49 |
| 5.2.2 Ensayos simulativos | 55 |
| 5.2.3 Otros | 57 |
| 5.3 EQUIPOS | 62 |
| 6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS | 71 |
| 6.1 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE R | 73 |
| 6.2 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE N | 79 |
| 6.3 DETERMINACIÓN PROPIEDADES MECÁNICAS | 81 |
| 6.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA | 84 |
| 6.5 ENSAYO ERICHSEN | 86 |
| 6.6 ENSAYO DE COPADO | 88 |
| 6.7 ENSAYO DE ABOCARDADO | 92 |
| 6.8 ENSAYO DE DUREZA | 93 |
| 6.9 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE DE LA LÁMINA | 95 |
| 6.10 ANÁLISIS METALOGRAFICO | 97 |
| 6.10.1 Acero IF | 98 |
| 6.10.2 Acero importado calidad de embutición profunda | 102 |
| 6.11 SEGUIMIENTO | 104 |
| 7. CONCLUSIONES | 105 |

8. RECOMENDACIONES

107

BIBLIOGRAFIA

109

LISTA DE TABLAS

| | pág. |
|--|-----------|
| Tabla 1. Rangos típicos de las propiedades mecánicas para chapas de acero laminadas en frío | 25 |
| Tabla 2. Composición química para chapas de acero laminadas en frío | 25 |
| Tabla 3. Historial de Laminación acero IF | 46 |
| Tabla 4. Condiciones experimentales prueba de recocido | 47 |
| Tabla 5. Condiciones laminado de temple | 48 |
| Tabla 7. Anisotropía acero IF 0.60 mm | 73 |
| Tabla 8. Anisotropía acero SAE 1006 0.46 mm | 73 |
| Tabla 9. Anisotropía acero SAE 1006 0.61 mm | 74 |
| Tabla 10. Exponente de endurecimiento por deformación para acero IF, 0.60 mm | 79 |
| Tabla 11. Exponente de endurecimiento por deformación para acero SAE 1006, 0.46 mm | 80 |
| Tabla 12. Exponente de endurecimiento por deformación para acero SAE 1006, 0.61 mm | 80 |
| Tabla 13. Propiedades mecánicas acero IF | 81 |
| Tabla 14. Propiedades mecánicas acero SAE 1006. DDQ, espesor 0.46 mm | 82 |
| Tabla 15. Propiedades mecánicas acero SAE 1006. DDQ, espesor 0,61 mm | 82 |
| Tabla 16. Composición química acero IF. Porcentaje en peso (wt %) | 85 |

| | |
|---|------------|
| Tabla 17. Composición química acero SAE 1006, 0.46 mm. Porcentaje en peso (wt %) | 86 |
| Tabla 18. Composición química acero SAE 1006, 0.61 mm. Porcentaje en peso (wt %) | 86 |
| Tabla 19. Resumen del ensayo Erichsen Acero “IF” 0.60 mm | 87 |
| Tabla 20. Resumen del ensayo Erichsen SAE 1006. 0.46 mm | 87 |
| Tabla 21. Resumen del ensayo Erichsen SAE 1006. 0.61 mm | 88 |
| Tabla 22. Ensayo de copado Acero IF. 0.60 mm | 89 |
| Tabla 23. Ensayo de copado Acero SAE 1006. 0.46mm | 90 |
| Tabla 24. Ensayo de copado Acero SAE 1006. 0.61 mm | 90 |
| Tabla 25. Resumen ensayo de abocardado para Acero IF. Espesor: 0.60 mm | 92 |
| Tabla 26. Resumen ensayo de abocardado para Acero SAE 1006. Espesor: 0.46 mm | 93 |
| Tabla 27. Resumen ensayo de abocardado para Acero SAE 1006. Espesor: 0.61mm | 93 |
| Tabla 28. Valores de dureza para lámina de acero IF | 94 |
| Tabla 29. Valores de dureza para lámina de acero SAE 1006, espesor 0.46 mm | 94 |
| Tabla 30. Valores de dureza para lámina de acero SAE 1006, espesor 0.61mm | 95 |
| Tabla 31. Rugosidad superficial, Ra. Acero “IF” 0.60 mm | 95 |
| Tabla 32. Rugosidad superficial, Ra . Acero SAE 1006. 0.46 mm | 96 |
| Tabla 33. Rugosidad superficial, Ra . Acero SAE 1006. 0.61 mm | 96 |
| Tabla 34. Diseño de experimentos recomendado | 107 |

LISTA DE FIGURAS

| | pág. |
|--|-----------|
| Figura 1. Red cristalina de un acero convencional | 26 |
| Figura 2. Aplicaciones generales del acero IF | 28 |
| Figura 3. Ruta de producción Acero IF | 29 |
| Figura 4. Desgasificación al vacío de tipo RH-KTB | 30 |
| Figura 5. Flujo de proceso ACESCO | 32 |
| Figura 6. Recocido en campana | 35 |
| Figura 7. Etapas básicas del recocido | 36 |
| Figura 8. Distribución de los rollos al interior del cobertor del horno de recocido en campana del tipo convector | 39 |
| Figura 9. Etapas de embutición profunda | 41 |
| Figura 10. Deformaciones que experimenta la copa durante la embutición | 42 |
| Figura 11. Perfil de espesores de la copa formada | 43 |
| Figura 12. Diagrama de flujo metodología acero importado con calidad de embutición profunda | 44 |
| Figura 13. Diagrama de flujo metodología desarrollo de calidad de embutición profunda (DDQ) | 45 |
| Figura 14. Curva teórica esperada | 47 |
| Figura 15. Esquema montaje experimental de la prueba de recocido | 48 |
| Figura 16. Exponente de endurecimiento por deformación | 52 |

| | |
|---|-----------|
| Figura 17. Curva esfuerzo - deformación | 53 |
| Figura 18. Proceso de embutido Erichsen | 55 |
| Figura 19. Proceso de embutido en forma de copa o copado | 56 |
| Figura 20. Ensayo de abocardado por embutición profunda | 57 |
| Figura 21. Equipo y mecanismo de penetración para ensayo de dureza | 58 |
| Figura 22. Campana de recocido | 62 |
| Figura 23. Maquina de ensayos universales | 63 |
| Figura 24. Espectrómetro de emisión óptica | 64 |
| Figura 25. Espectrómetro de emisión óptica | 65 |
| Figura 26. Maquina Erichsen | 66 |
| Figura 27. Máquina cortadora | 66 |
| Figura 28. Montadora de baquelita | 67 |
| Figura 29. Debastadora | 68 |
| Figura 30. Pulidora metalográfica | 68 |
| Figura 31. Microscopio óptico | 69 |
| Figura 32. Rugosímetro | 70 |
| Figura 33. Curva experimental prueba de recocido. Perfil de temperaturas | 71 |
| Figura 34. Análisis de la anisotropía en copas embutidas | 74 |
| Figura 35. Angulo entre la dirección de ensayo y la dirección de laminación (°) vs el coeficiente de anisotropía (r) para Acero IF estado recocido | 75 |
| Figura 36. Angulo entre la dirección de ensayo y la dirección de laminación (°) vs el coeficiente de anisotropía (r) para Acero IF estado templado | 76 |
| Figura 37. Angulo entre la dirección de ensayo y la dirección de laminación (°) vs el coeficiente de anisotropía (r) para SAE 1006 , espesor 0.46 mm | 77 |

| | |
|---|------------|
| Figura 38. Angulo entre la dirección de ensayo y la dirección de laminación (°) vs el coeficiente de anisotropía (r) para SAE 1006 , espesor 0.61 mm | 78 |
| Figura 39. Relación teórica existente el índice n y la relación TS /YS (Tensile Stregth/ Yield Strength) | 81 |
| Figura 40. Elongación del punto de fluencia | 83 |
| Figura 41. Eliminación de la elongación del punto de fluencia por laminado de temple | 84 |
| Figura 42. Ensayo de las orejas. Copa embutida | 88 |
| Figura 43. Copas embutidas usando acero IF 0.60 mm sin temple. | 91 |
| Figura 44. Copas embutidas usando acero IF 0.60 mm con temple. | 91 |
| Figura 45. Copas embutidas usando SAE 1006 0.46 mm | 91 |
| Figura 46. Copas embutidas usando SAE 1006 0.61 mm | 92 |
| Figura 47. Micrografías Rollo 1: 97751 | 98 |
| Figura 48. Micrografías Rollo 2: 97749 | 99 |
| Figura 49. Micrografías Rollo 3: 97750 | 99 |
| Figura 50. Micrografías Rollo 4: 97752 | 100 |
| Figura 51. Diagrama de equilibrio de fases Fe- Fe₃C | 102 |
| Figura 52. Micrografías AISI/SAE 1006, espesor: 0,46 mm | 102 |
| Figura 53. Micrografías AISI/SAE 1006, espesor: 0,61 mm | 103 |

RESUMEN

TITULO: DESARROLLO DE MATERIAL LAMINADO EN FRÍO PARA EMBUTICIÓN PROFUNDA A PARTIR DE UN “ACERO IF” RECOCIDO EN CAMPANA CON ATMÓSFERA 100% HIDRÓGENO*

AUTORES: CABALLERO PINILLA ALEJANDRA PATRICIA ALICIA**

PALABRAS CLAVES: Acero libre de elementos intersticiales (IF), Calidad de embutición profunda (DDQ), Recocido en campana, Formabilidad, Índice r, Índice n, Lámina.

RESUMEN: En este trabajo se propuso obtener un acero IF con calidad de embutición profunda(DDQ), para ser comercializado a nivel nacional e internacional por Acerías de Colombia S.A -ACESCO- en el mercado de filtros, electrodomésticos, auto-partes y cerrajería, entre otros.

Para lograr éste objetivo la materia prima fue sometida a un proceso de decapado, laminación en frío, recocido, y laminado de temple, en el cual se hizo necesario el diseño del recocido en campana donde fueron ajustadas las principales variables que afectan la formabilidad de una lamina de tal calidad. Con el fin de caracterizar el comportamiento mecánico del acero desarrollado y compararlo con el importado y comercializado a nivel nacional, se realizó análisis de composición química por espectrometría de emisión óptica y ensayos de: anisotropía, endurecimiento por deformación, tensión, Erichsen, copado, expanding, dureza, metalografía, y determinación de rugosidad.

Los resultados logrados, otorgan la calidad deseada al acero, cuyas especificaciones se encuentran en la norma ASTM A 1008, donde el parámetro principal de clasificación corresponde a la anisotropía normal de la lámina, seguido de la fluencia, porcentaje de elongación y endurecimiento por deformación del material. Además de comprobarse la superioridad del acero producido con respecto al importado.

* Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Jairo Alfonso Gómez Rodríguez

ABSTRACT

TITLE: DEVELOPMENT OF COLD ROLLED MATERIAL FOR DEEP DRAWING USING "IF STEEL" BATCH ANNEALED IN 100% HYDROGEN ATMOSPHERE.

AUTHORS: CABALLERO PINILLA ALEJANDRA PATRICIA ALICIA**

KEY WORDS: Interstitial free steel (IF), Deep Drawing Quality (DDQ), Batch annealing, Formability, Value r, Value n, Sheet.

ABSTRACT: In this work was proposed to obtain an IF steel with Deep Drawing Quality (DDQ), to be marketed nationally and internationally by Acerías de Colombia S.A. -ACESCO- in the market of filters, household-electric, auto-parts, and locksmith, among others.

To achieve this objective the raw stock was subjected to a process of pickling, cold rolling, annealing, and temper rolling, in which it became necessary to design a batch annealing process adjusting the main variables that affect the formability of DDQ steel sheet. In order to characterize the mechanical behavior of steel developed and compare with imported and marketed nationally steel, was analyzed by chemical composition by optical emission spectrometry and tests of: measure of anisotropy, strain-hardening exponent, tension, Erichsen, cup drawing, expanding, hardness, metallography, and roughness determination.

The results achieved give the desired quality steel, which requirements are found in specification ASTM A 1008, where the main parameter of classification corresponds to the normal anisotropy of the sheet, followed by yield strength, elongation percentage and strain-hardening exponent. Furthermore, checking the superiority of produced steel with respect to imported steel.

* Work of Degree

**Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Jairo Alfonso Gómez Rodríguez

INTRODUCCIÓN

La presente investigación fue realizada con el fin de desarrollar un acero con calidad de embutición profunda, mediante la modificación y/o ajuste de los parámetros de fabricación, lo cual permitió reconocer todas las propiedades requeridas para su utilización en procesos de conformado de láminas metálicas.

Actualmente, los aceros con calidad de embutición profunda son de gran demanda en el mercado, debido a sus aplicaciones en la industria automotriz, fabricación de filtros, electrodomésticos (línea blanca), utensilios de cocina, ferretería, entre otros. Específicamente, en Colombia esta necesidad se sule con material importado de Brasil, Venezuela y Japón en su mayoría. Razón por la cual, Acerías de Colombia S.A.-ACESCO- enfocó sus esfuerzos hacia la investigación y desarrollo de dicha calidad a partir de aceros IF laminados en frío.

La obtención de un material con calidad de embutición profunda bien sea a partir de aceros calmados al aluminio o de acero IF, (libre de elementos intersticiales) han sido desarrollado a partir de tratamientos térmicos de recocido en campana con atmósferas 100% H₂ o una combinación de H₂ y N₂ (HNX)^{16, 17, 19}, con el fin de proveer a la lamina formabilidad adecuada para que durante el proceso de embutición soporte la severidad de la operación.

Para llevarse a cabo lo anterior, se realizan modificaciones y/o ajustes en las variables del proceso, que involucran la fabricación de chapas a partir de procesos de laminación, para su posterior caracterización y clasificación. Paralelo a esto se caracteriza el acero AISI/SAE 1006 calidad de embutición profunda que se importa y comercializa a nivel nacional.

Todo lo anterior se describe detalladamente en cada uno de los capítulos de este trabajo de grado denominado “DESARROLLO DE MATERIAL LAMINADO EN FRÍO PARA EMBUTICIÓN PROFUNDA A PARTIR DE UN ACERO IF RECOCIDO EN CAMPANA CON ATMÓSFERA 100% HIDRÓGENO” .

Con el propósito de obtener un acero IF con calidad de embutición profunda, fue necesario agotar las etapas de identificación e investigación de las normas y procesos relacionados con la obtención de un acero apto para la embutición, caracterización del material mediante análisis de composición química por espectrometría de emisión óptica y ensayos de: anisotropía, endurecimiento por deformación, tensión, Erichsen, copado, expanding, dureza, metalografía, y determinación de rugosidad; durante seis meses lo cual permitió identificar la evolución del acero hasta otorgarle la calidad de embutición profunda y seguir su comportamiento en la industria.

El desarrollo de las practicas profesionales realizadas en el área de investigación y desarrollo en la empresa ACESCO, ubicada en el Municipio de Malambo, Departamento del Atlántico, la cual permitió el acceso a sus plantas, laboratorios y equipos donde junto con la participación del equipo de ingenieros, técnicos y operadores, se forjaron en su mayoría todos los ensayos realizados, para llevar a cabo con éxito la realización de este trabajo.

Como autora de este trabajo de grado, encuentro que la importancia principal de éste, radica en obtener la calidad deseada, lo cual aumentaría la productividad y competitividad de ACESCO a nivel nacional e internacional, beneficiando los costos nacionales del material, además de realizar aporte investigativos en esta área que en Colombia, hasta el momento había sido ignorada.

Finalmente, se demostró la posibilidad de desarrollar acero IF con calidad de embutición profunda, sin embargo se recomienda continuar con etapas de

optimización de los procesos empleados, con el fin mejorar la calidad del producto obtenido.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un material laminado en frío para embutición profunda a partir de un acero IF recocido en campana con atmósfera 100 % hidrógeno, con el fin de sustituir las importaciones del mismo en la industria de filtros para automóviles.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar las normas y procesos relacionados con la obtención de un acero apto para la embutición.
- Caracterizar el material con calidad de embutición (“DQ” drawing quality o “DDQ” deep drawing quality) comercializado a nivel nacional.(índice r (anisotropía plástica), índice n (endurecimiento por deformación), erichsen, metalografía convencional, ensayos mecánicos, ensayos de copado y expanding, dureza HRB, espectrometría de emisión óptica).
- Diseñar los experimentos para el recocido en campana.
- Definir las curvas de recocido para la obtención de la calidad de embutición.
- Caracterizar y clasificar el material recocido en campana por medio de pruebas metalográficas, pruebas de tipo físico y químico.
- Realizar un seguimiento a las pruebas del material desarrollado en operaciones de embutición profunda a nivel industrial.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, todas las empresas dedicadas a la comercialización de materia prima con calidad de embutición o embutición profunda para la fabricación de filtros de aceite para automóviles en Colombia, la importan en su gran mayoría del Brasil, Venezuela y Japón; debido a que ninguna planta o empresa en este país produce láminas con calidad de embutición, mientras que otras se dedican a comprarlas en el exterior y distribuir las a nivel nacional para el conformado de chapas metálicas, con destino de manera especial hacia el mercado de filtros, electrodomésticos, auto-partes y cerrajería, afectando de manera negativa los costos y los niveles de producción de este sector de la industria nacional.

Anteriormente, se utilizaba en la producción de algunas piezas metálicas, procesos que requerían del ensamble de partes múltiples, hoy en día han sido reemplazados por troquelados complejos que condicionan la calidad del material a formar, denominado Embutición y Embutición profunda, entre otros.

El embutido es una operación de formado de láminas metálicas que se usa para hacer piezas de forma de copa y otras formas huecas más complejas, el cual se realiza colocando una lámina de metal sobre la cavidad de un dado y empujando el metal hacia la cavidad de éste con un punzón. Es por esta razón que el material a embutir debe cumplir con ciertos requerimientos (comportamiento mecánico), para la formación de piezas entre las cuales se destacan: latas de bebidas, casquillos de municiones, lavabos, utensilios de cocina y partes para carrocería de automóviles.

La calidad de embutición es posible lograrla mejorando sustancialmente la resistencia mecánica (Resistencia a la fluencia y a la tracción) y la formabilidad (r y n) de chapas de acero para estampado modificando la composición química, controlando los procesos de laminación en caliente y en frío y/o adecuando los tratamientos térmicos.

Por estas razones, es necesario que se fabrique un material con calidad de embutición profunda para ser utilizado en el sector automotriz satisfaciendo las necesidades de producción para filtros de aceites, siendo el aspecto fundamental de esta investigación y con la pretensión de desarrollar el material requerido en la producción industrial:

¿Qué normas y procesos son determinantes para la obtención de un acero apto para la embutición?

¿Será indispensable especificar el material con calidad de embutición comercializado a nivel nacional?

¿Por qué son convenientes el diseño de los experimentos y la precisión de las curvas de recocido en campana para la obtención de la calidad de la embutición?

¿Que pruebas metalográficas, pruebas de tipo físico y químico son necesarias para caracterizar y clasificar el material recocido en campana?

¿Cuál será el impacto del material desarrollado en la fabricación de filtros para automóviles?

3. JUSTIFICACIÓN

Debido a la gran demanda del mercado de filtros en Colombia, Acerías de Colombia S.A. (ACESCO) ha enfilado sus esfuerzos al desarrollo de un acero laminado en frío con calidad de embutición profunda, partiendo de un "IF" (Interstitial Free Steel). La introducción de este material en el mercado nacional e internacional, incrementaría la producción y competitividad de la empresa.

Para Colombia resulta interesante este proyecto, teniendo como fuente de información los registros de importación suministrados por la DIAN, en enero de 2004, se importaron 112 Ton de material para uso en la embutición de carcasa de filtros, en octubre de ese mismo año 368 Ton, en forma de bobinas en los siguiente espesores: 0.45, 0.46, y 0.61. Estos índices nos evidencian la creciente demanda de este material en Colombia.

Como se puede observar, renunciar a la importación de este material en Colombia disminuiría el volumen total de las compras al exterior, y se generaría de manera significativa valor agregado a la producción de acero laminado en frío con grandes ventajas frente a la competitividad internacional. Además el resultado del proyecto desprende una consecuencia directa en el ahorro de divisas.

Por todas las razones descritas anteriormente, Acesco S.A. desarrolla el material con calidad de embutición profunda mejorando las características de conformado, modificando y/ o controlando las variables principales del tratamiento térmico de recocido en campana.

Mediante el desarrollo de la calidad de embutición para este material, se adquirieron conocimientos tanto teóricos como prácticos, cumpliendo con los estándares de calidad establecidos mediante normas internacionales.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 GENERALIDADES

Para operaciones de embutición profunda es necesario que la chapa que se emplee en la operación ofrezca la máxima garantía de buenos resultados, para esto en su fabricación se debe cumplir con ciertos requisitos fundamentales, los cuales se indican a continuación.

- Las superficies deben presentarse pulidas exentas de arrugas, marcas, surcos, etc.
- El espesor debe ser constante en toda la extensión de la misma
- El material que compone la chapa debe ser homogéneo, sin impurezas ni escorias incrustadas.
- El material que compone la chapa, por las fuertes tensiones que experimenta durante el embutido, debe ser maleable y resistente.
- La calidad de la chapa debe elegirse en la relación a la profundidad del embutido.

Para desarrollar un material con calidad de embutición profunda es importante tener en cuenta cada uno de los anteriores requisitos, es por esto que para éste trabajo se utilizó la Norma ASTM A 1008, **“Standard Specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy and High-Strength Low-Alloy with Improved Formability”**², la cual especifica las propiedades mecánicas y composición química de un acero con calidad de embutición profunda (DDS), ver tabla 1 y 2.

Tabla 1. Rangos típicos de las propiedades mecánicas para chapas de acero laminadas en frío.

| Designation | Yield Strength ^C | | Elongation in 2 in. [50 mm] % ^C | r_m Value ^D | n -Value ^E |
|----------------------|-----------------------------|--------------|--|--------------------------|-------------------------|
| | ksi | MPa | | | |
| CS Types A, B, and C | 20 to 40 | [140 to 275] | ≥ 30 | F | F |
| DS Types A and B | 22 to 35 | [150 to 240] | ≥ 36 | 1.3 to 1.7 | 0.17 to 0.22 |
| DDS | 17 to 29 | [115 to 200] | ≥ 38 | 1.4 to 1.8 | 0.20 to 0.25 |
| EDDS | 15 to 25 | [105 to 170] | ≥ 40 | 1.7 to 2.1 | 0.23 to 0.27 |

Norma ASTM A 1008²

Tanto las propiedades mecánicas como la composición química del material, juegan un papel muy importante en la calidad del material a obtener. Por ejemplo para el caso de la composición química, recordemos que existen sustancias que componen los aceros, que ejercen una sensible influencia sobre el comportamiento de los aceros de embutición; en efecto, es suficiente la presencia del 0,2% de silicio para disminuir la deformabilidad en frío. También el manganeso y el cromo tienen este mismo efecto.

Es importante resaltar que el rango que establece la norma es muy amplio, dentro de la cual se acomoda perfectamente la composición química del acero IF.

Tabla 2. Composición química para chapas de acero laminadas en frío.

| Designation | Composition, % Heat Analysis (Element Maximum Unless Otherwise Shown) | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|--|------|-------|-------|----------|-----|-------------------|-----------------|-------------------|-----------------|-------|-------|--------------------|-----|
| | C | Mn | P | S | Al | Si | Cu ^B | Ni ^B | Cr ^{B,C} | Mo ^B | V | Cb | Ti | N |
| CS Type A ^{D,E,F,G} | 0.10 | 0.60 | 0.030 | 0.035 | ... | ... | 0.20 ^H | 0.20 | 0.15 | 0.06 | 0.008 | 0.008 | 0.008 ^I | ... |
| CS Type B ^D | 0.02 to 0.15 | 0.60 | 0.030 | 0.035 | ... | ... | 0.20 ^H | 0.20 | 0.15 | 0.06 | 0.008 | 0.008 | 0.008 ^I | ... |
| CS Type C ^{D,E,F,G} | 0.08 | 0.60 | 0.10 | 0.035 | ... | ... | 0.20 ^H | 0.20 | 0.15 | 0.06 | 0.008 | 0.008 | 0.008 ^I | ... |
| DS Type A ^{E,J} | 0.08 | 0.50 | 0.020 | 0.030 | 0.01 min | ... | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.06 | 0.008 | 0.008 | 0.008 ^I | ... |
| DS Type B | 0.02 to 0.08 | 0.50 | 0.020 | 0.030 | 0.02 min | ... | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.06 | 0.008 | 0.008 | 0.008 ^I | ... |
| DDS ^{F,G} | 0.06 | 0.50 | 0.020 | 0.025 | 0.01 min | ... | 0.20 | 0.20 | 0.15 | 0.06 | 0.008 | 0.008 | 0.008 ^I | ... |
| EDDS ^K | 0.02 | 0.40 | 0.020 | 0.020 | 0.01 min | ... | 0.10 | 0.10 | 0.15 | 0.03 | 0.008 | 0.10 | 0.15 | ... |

ASTM A 1008²

4.2 MATERIA PRIMA: ACERO IF (INTERSTITIAL FREE STEEL)

Su nombre obedece a un acero libre de elementos intersticiales como los son los átomos de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno y boro en la estructura de la red cristalina de una aleación, estos elementos presentes en un acero convencional como se muestra en la figura, son extraídos de la matriz por medio de técnicas específicas para su producción.

Figura 1. Red cristalina de un acero convencional



<http://www.krakatausteel.com>

Este acero fue introducido por primera vez en Japón en los años 70's. Un importante objetivo de la industria automotriz es disminuir el peso de los paneles exteriores de los carros manteniendo buena formabilidad y resistencia a las abolladuras. El uso de aceros de alta resistencia permite componentes mucho más delgado lo cual reduce el peso total. Sin embargo, los aceros convencionales de alta resistencia tienen insuficiente formabilidad para los requerimientos de embutición de paneles de formas complejas.

Es por esto que se descubrieron comercialmente los aceros IF, los cuales poseen gran formabilidad comparable con los aceros de calidad de extra embutición profunda, luego de la introducción de la tecnología de desgasificado al vacío.

Ese tipo de acero cuenta con niveles muy bajos de carbono (menor a 80 ppm) y la presencia de elementos microaleantes como Ti y/o Nb , los cuales son adicionados para estabilizar átomos intersticiales de carbono y de nitrógeno precipitándolos como carburos y nitruros. Excesivas cantidades de Ti y o Nb fueron usadas para combinarse con el C y N pero se quedó en solución sólida, haciendo el acero más caro y afectando sus propiedades mecánicas. Es por esta razón que la adición de estos elementos se hace de forma estequiometrica de acuerdo con:

- Si se utiliza sólo titanio como agente estabilizador, entonces el contenido de Ti se calcula a partir de la siguiente formula: $Ti = 4 \times \%C + 3,42 \times \%N + 1,5 \times \%S + 0,02$.
- Si también se utiliza niobio entonces el contenido de Ti = $3,42 \times \%N + 1,5 \times \%S$ y Nb = $7,75 \times \%C$

4.2.1 Aplicaciones. Actualmente, este acero es conocido ampliamente como el acero de más alta calidad para las aplicaciones de embutición profunda. Ha sido usado en un amplio rango de aplicaciones desde el cuerpo de lo automóviles hasta componentes electrónicos, tanto como las esmaltadoras para aplicaciones de casa como se muestra en la figura 2.

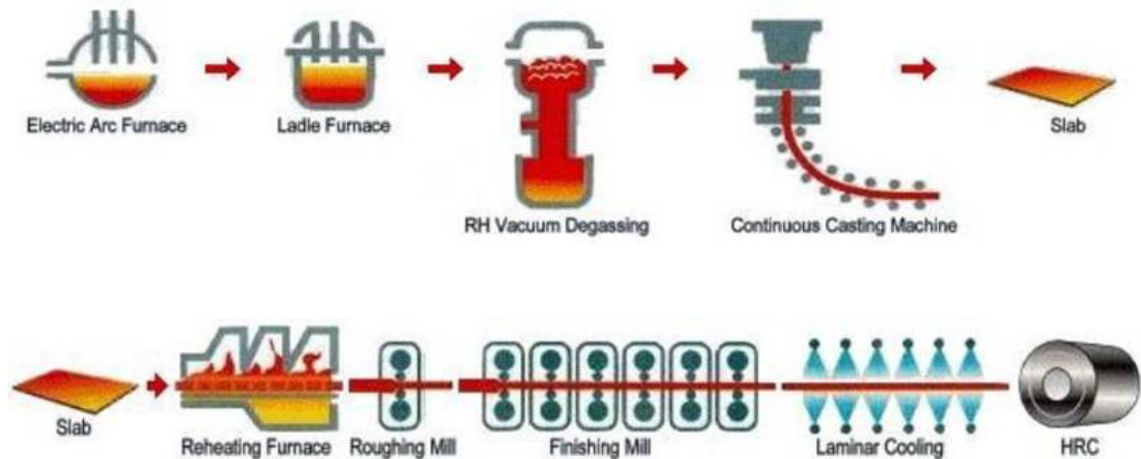
Figura 2. Aplicaciones generales del acero IF



<http://www.krakatausteel.com>

4.2.2 Producción. La ruta de producción de este tipo de acero involucra un proceso adicional en la fabricación siderúrgica de un acero convencional como se muestra en la figura 3. La práctica de desgasificado al vacío constituye el proceso clave en la producción de éste tipo de acero; ya que al someter el metal fundido al vacío se remueve el hidrogeno y el carbono, prowenido la calidad deseada y reduciendo los tiempos del proceso.

Figura 3. Ruta de producción Acero IF



<http://www.krakatausteel.com>

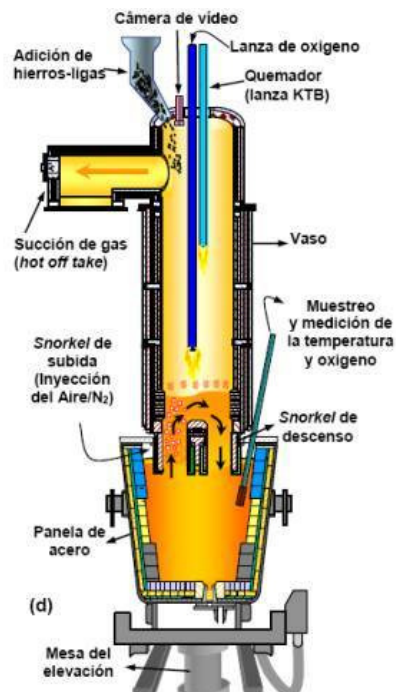
Los sistemas de desgasificado al vacío, más comunes caen en dos categorías. La primera y en la que se hará muchos más énfasis, desgasificadores recirculantes tipo RH; inventados por Heraeus-Rheinstahl en Alemania, el cual involucra insertar dos piernas o snorkels, de una cámara de vacío dentro de una cuchara de acero líquido. El metal es estirado en la cámara por medio de un tubo que inyecta argón para promover la turbulencia; este es expuesto al vacío para remover los gases y se recircula de vuelta a través del otro snorkel. El otro sistema, un desgasificador de tanque, es un convertidor dentro del cual la cuchara es enviada y girada por la inyección de argón. La cámara es despresurizada para remover los gases, y la cuchara es finalmente removida.

Una de las principales diferencias entre estas dos categorías es el hecho de que en los procesos de tipo tanque, la escoria participa activamente en el proceso, estando en contacto con el acero durante todo el tratamiento bajo vacío, lo que favorece esencialmente. Entre tanto, se considera que la cinética de las

reacciones es un poco más lenta de que en el proceso con recirculación del acero, pero la inversión en equipo es menor.

El proceso RH es caracterizado por la circulación continua del acero a través de un recipiente revestido de refractarios, donde se promueve el vacío. Esta circulación es hecha a través de dos tubos también denominados **snorkels**, que están inmersas en el baño metálico. La presión atmosférica que actúa en la superficie de la panela, causa una elevación del acero en el recipiente del tratamiento. Forzado por el aumento de la temperatura, disminución de la presión y por la liberación de gases del acero en la parte superior del tubo, el acero líquido adquiere un movimiento circulatorio en el sistema panela/recipiente. Una representación esquemática de los principales equipos de una unidad de refino secundario por desgasificación al vacío de tipo **RH** es el que se muestra en la siguiente figura 4.

Figura 4. Desgasificación al vacío de tipo RH-KTB



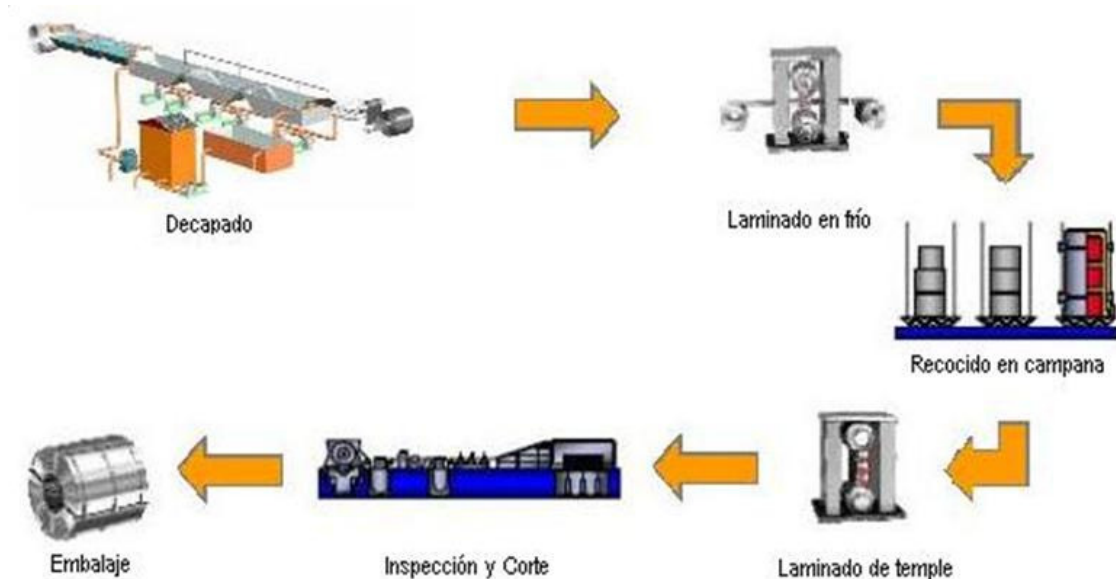
El posicionamiento de una lanza para soplo de oxígeno en la superficie del recipiente de recirculación del proceso **RH**, procesos **RH-TOP** o **RH-KTB**, permiten combinar el soplo de oxígeno buscando el calentamiento o la formación de bolas de **CO** para descarburizar el acero, con un calentamiento adicional debido a la posterior combustión del **CO** desprendido por el acero líquido para **CO₂**.

Considerando que el objetivo primordial de la desgasificación es el de producir un acero líquido con el mínimo posible de gases disueltos en el baño, el metal líquido es colocado en el recipiente y a través de la aplicación de vacío ocurre la flotación de gases como hidrógeno, nitrógeno y oxígeno (en forma de CO). Por el hecho de ser un equipo que exige una inversión más alta que las estaciones de refino secundario de tipo de calentamiento químico, es que se utiliza este equipo para la elaboración de aceros que no pueden ser procesados en éstas últimas unidades, particularmente los aceros IF.

4.3 PROCESO DE TRANSFORMACION DE LA MATERIA PRIMA

La obtención de láminas con calidad de embutición profunda es llevada a cabo en diferentes pasos, los cuales ameritan su estudio al poseer las variables que modifican propiedades que clasifican las láminas en determinadas calidades.

Figura 5. Flujo de proceso ACESCO



Autor

Cabe resaltar que no solo los procesos mostrados en la figura 5, conllevan a variaciones de las características del material. Ya que, la producción del acero base, comprende todos los procesos de transformación a partir de las placas o planchas de acero laminadas en caliente obtenidas a partir de la producción de los lingotes, aunque este último proceso siderúrgico, también ejerce una gran influencia sobre los subsecuentes debido a los requerimientos en cuanto a la composición química, propiedades metalúrgicas e impurezas que se puedan obtener. No obstante, desde el punto de vista de las posibilidades de la planta, el desarrollo del material con calidad de embutición profunda comienza con los procesos mostrados en la figura 5, los cuales se explican a continuación:

4.3.1 Proceso de decapado químico de la lámina en caliente (Hot Strip Pickling). La materia prima, es decir el acero laminado en caliente por su proceso de producción, trae una capa de óxido superficial que debe ser removida antes de pasar a la laminación en frío.

El decapado es un proceso químico mediante el cual el acero laminado en caliente se sumerge en cubas con ácido clorhídrico a una temperatura y concentración determinada. El ácido reacciona con el óxido dejando la superficie limpia pero con algunos residuos ácidos, los cuales son eliminados en cubas de enjuagues con sprays de agua caliente. Adicionalmente en esta etapa del proceso se cortan los bordes laterales los cuales presentan grietas y fallas en su uniformidad. Por último, previo al rebobinado, se aplica una fina capa de aceite para la protección del material ya decapado, durante el almacenamiento temporal.

4.3.2 Proceso de reducción o laminación en frío (Cold Reduction). El acero laminado en caliente una vez ha sido desoxidado y aceitado, pasa a un proceso de reducción de espesor en frío a temperatura ambiente, para lograrlo, el material se somete a una tensión longitudinal entre dos desbobinadoras, obligándolo a fluir entre un par de cilindros de laminación, que aplican una fuerza de compresión reduciendo el espesor y aumentando su longitud sin modificar el ancho original.

El laminador de cuarto reversible (four high) está compuesto por un bastidor único con un juego de dos cilindros de apoyo y dos de reducción. Su característica principal consiste en someter el material a un determinado número de pasadas e un proceso reversible para obtener los espesores finales. El acero corre en un sentido hasta completar la primera pasada, y luego se regresa en sentido contrario completando la siguiente y así sucesivamente hasta llegar al número requerido de pasadas, en cada una de ellas se aplica un porcentaje de reducción del espesor. Para controlar la fricción y las altas temperaturas generadas por el alargamiento del material se utilizan emulsiones refrigerantes.

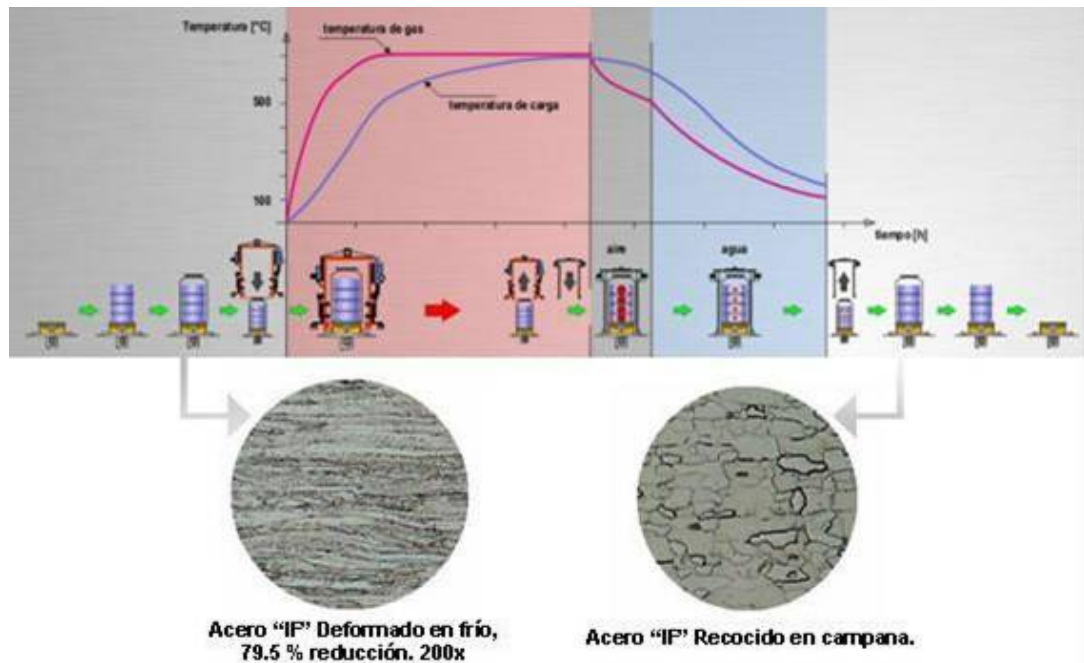
Los cilindros de apoyo y de reducción deben ser rectificadas permanentemente para garantizar la calidad superficial de la lámina. Se utiliza la rectificadora de

cilindros con ruedas abrasivas, maquina equipada con control numérico y detectores de grietas superficiales.

4.3.3 Recocido (Annealing). El material laminado en frío es duro, severamente resistente y poco dúctil, por lo cual requiere un tratamiento térmico de recocido de recristalización para impartirle el grado adecuado de conformabilidad. El material puede ser recocido, introduciendo los rollos de lámina en hornos del tipo campana.

En esta etapa se utilizan bases de recocido de alta convección térmica. Los rollos de acero se apilan con el eje vertical sobre esta base y se confinan en una atmósfera reductora con un contenido de 100% hidrogeno dentro de una campana protectora con sellado hermético. Posteriormente se coloca una campana de calentamiento a gas durante aproximadamente 36-42 horas; una vez se ha cumplido el tiempo necesario sosteniendo la temperatura de recocido (650-710 °C), se retira la campana de calentamiento y se coloca la de enfriamiento por aire y agua .Terminado el ciclo de enfriamiento se retiran las campanas de enfriamiento y de protección y se mueven los rollos de acero ya recocidos (figura 6). El ciclo de recocido en total puede tardar entre 2 y 3 días.

Figura 6. Recocido en campana. Imagen Izquierda: Microestructura material laminado en frío. Derecha: Microestructura tipo pancake.



ACESCO-Autor

En este proceso se va a hacer mucho más énfasis que en los demás, ya que basándonos en la modificación de la curva de recocido, se desarrollara este proyecto. Controlar las principales variables de este proceso es de gran importancia para este trabajo, por lo cual se hace necesario conocer las condiciones y etapas que presenta:

Recocido de recristalización.

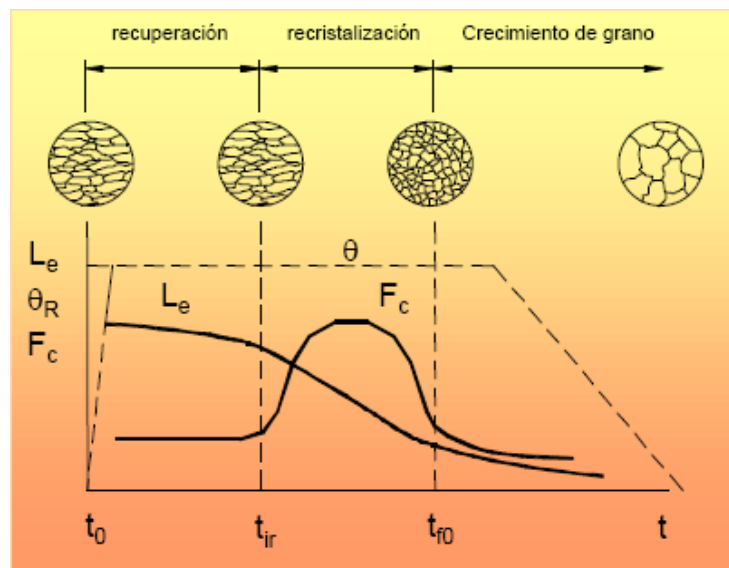
Durante la deformación plástica ocurrida debido a la reducción en frío de la lámina, los cristales son deformados causando una concentración de esfuerzos la cual produce un incremento en la resistencia mecánica y una disminución de la ductilidad. La deformación plástica puede ser explicada en términos de la teoría de dislocaciones, donde la aplicación de la carga sobre la estructura del material obliga a que ciertos planos preferenciales de este se desplacen con respecto a los

otros. Este fenómeno recibe el nombre de endurecimiento por deformación plástica.

Adicionalmente a los cambios de fase que ocurren en el acero cuando se calienta por encima de la temperatura de transformación, otros cambios pueden ocurrir durante un proceso sub-crítico o de recocido, el cual modifica los efectos producidos por la deformación plástica, afectando de esta manera las propiedades mecánicas.

En las condiciones mencionadas, el material se somete a un proceso de recocido, mediante el cual evoluciona hacia la ordenación y/o la anulación de defectos introducidos durante la deformación, donde el material posee una menor energía interna. Los cambios microestructurales asociados a dicha disminución de energía almacenada se deben a los mecanismos de recuperación, recristalización y crecimiento de grano, más conocidos como las etapas en que se divide este proceso (figura 7), explicadas a continuación:

Figura 7. Etapas básicas del recocido.



- Recuperación; en la que se observa un ligero descenso de la dureza sin cambio en la conformación de los cristales. La recuperación es la primera etapa del proceso de recocido. Por una parte, con mayor temperatura se produce el alivio de esfuerzos internos causados por el trabajo en frío, (tensiones residuales), y por otra parte, se producen cambios microestructurales. La recuperación comprende una serie de fenómenos que ocurren a temperaturas más bien bajas, con respecto a la temperatura de fusión del material, entre los que se pueden destacar: Aniquilación de defectos puntuales, Poligonización y Caída de la resistividad eléctrica (R). La aniquilación de defectos puntuales consiste en la difusión, mediante la adición de calor, de las vacancias hacia las dislocaciones y bordes de granos, así se logra disminuir su cantidad hasta el número de equilibrio a la temperatura correspondiente. La poligonización consiste en la readecuación de un cristal flexionado para la cual éste se descompone en cierto número de pequeños segmentos cristalinos con leves diferencia de orientación íntimamente ligados, logrando que las dislocaciones se redispongan en una configuración de menor energía, formando subgranos y bordes de grano de ángulo pequeño. La caída de la resistividad eléctrica (R) se ve afectada por las vacancias, cuyo campo de deformaciones interfiere con el flujo de los electrones; al disminuir el número de vacancias disminuye, también, R.
- Recristalización; denota la pérdida de las características conseguidas en la acritud y la reconstrucción cristalina. Si un metal previamente deformado en frío, es recocido a una temperatura suficientemente alta, (temperatura de recristalización), aparecen nuevos cristales en la microestructura, los que tienen idéntica composición y estructura reticular que los antiguos granos no deformados. Estos nuevos cristales surgen en zonas con alta densidad de dislocaciones. La fuerza impulsora de la recristalización proviene de la energía almacenada del trabajo en frío. La temperatura de recristalización corresponde

a la temperatura aproximada a la que un material altamente trabajado en frío se recristaliza por completo en una hora. La recristalización es sensible a cambios en la temperatura a la que se realiza, más que a variaciones de tiempo a temperatura constante.

- Crecimiento de grano: alternativa si se dilata el tiempo del tratamiento, el cual hace descender las características resistentes.

Cualquiera de los tipos de recocido que existen comercialmente (recocido en campana, recocido en continuo y recocido en continuo del tipo rollo abierto), constan de las etapas especificadas anteriormente. El desarrollo de nuestra investigación se basa en el proceso de recocido en campana por lo cual a continuación se dará una descripción más detallada.

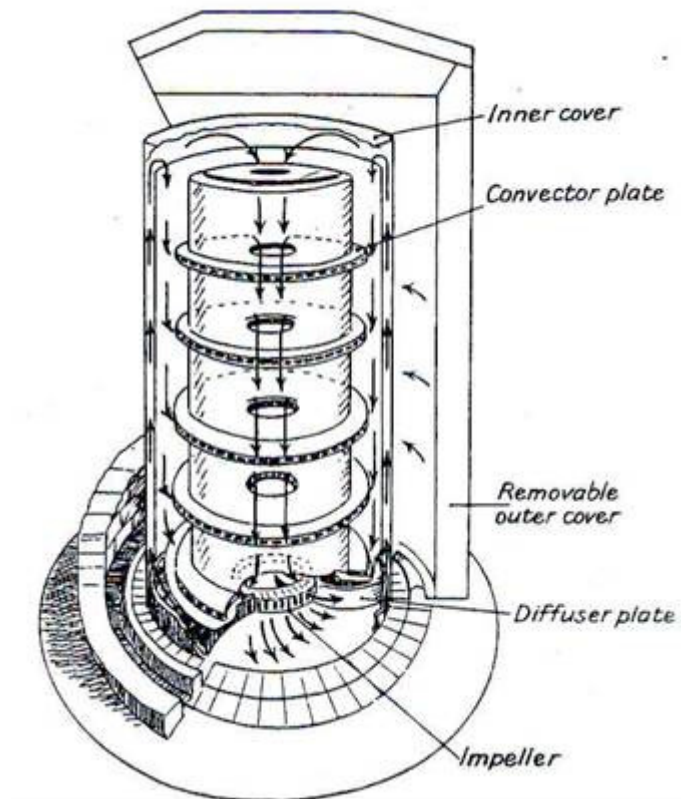
Recocido en campana.

El recocido en horno del tipo campana, es diseñado para asegurar la máxima uniformidad de las condiciones a través de la carga de material que contiene durante el ciclo de calentamiento, sostenimiento y enfriamiento, así como para proteger al acero de la oxidación superficial y la contaminación proveyendo una atmósfera apropiada alrededor de la carga. Estas funciones deben ser llevadas a cabo con el máximo control posible en cuanto a la eficiencia térmica del sistema y el proceso debe ser correctamente instrumentado para proveer un estricto control durante el ciclo de operación.

El equipo del que consta un sistema de horno en campana del tipo convector, consiste de una o varias bases fijas, en las cuales, los rollos de lámina de acero que van a ser recocidos son apilados unos encima de otro, separados por una placa llamada placa convectora. De igual forma, un cobertor es transportado y

ubicado sobre los rollos apilados, mediante el uso de un puente grúa. Luego es ubicada sobre el cobertor la unidad de calentamiento, la cual por medio de unos sistemas de quemadores, calienta el gas protector que rodea a los rollos generándose un proceso de transferencia de calor por convección. En la figura 8, se puede apreciar la distribución de los rollos de acero en el horno, así como las distintas partes que componen el sistema.

Figura 8. Distribución de los rollos al interior del cobertor del horno de recocido en campana del tipo convector.



ACESCO

4.3.4 Laminado de temple (Temper Rolling). Después del recocido, se suele someter a la lámina a una pequeña deformación mediante otra operación no

lubricada de laminación en frío, esta le imparte forma y suavidad superficial a la lámina. Por otro lado, también se logra obtener la ductilidad y propiedades finales últimas requeridas por el material. El grado de reducción obtenido durante este proceso, también llamado “*skin-pass*” es de alrededor del 1% al 4%, pero normalmente no excede al 2%. Otras veces los efectos conseguidos por el laminado de temple, pueden ser logrados mediante una operación de tensio-nivelado.

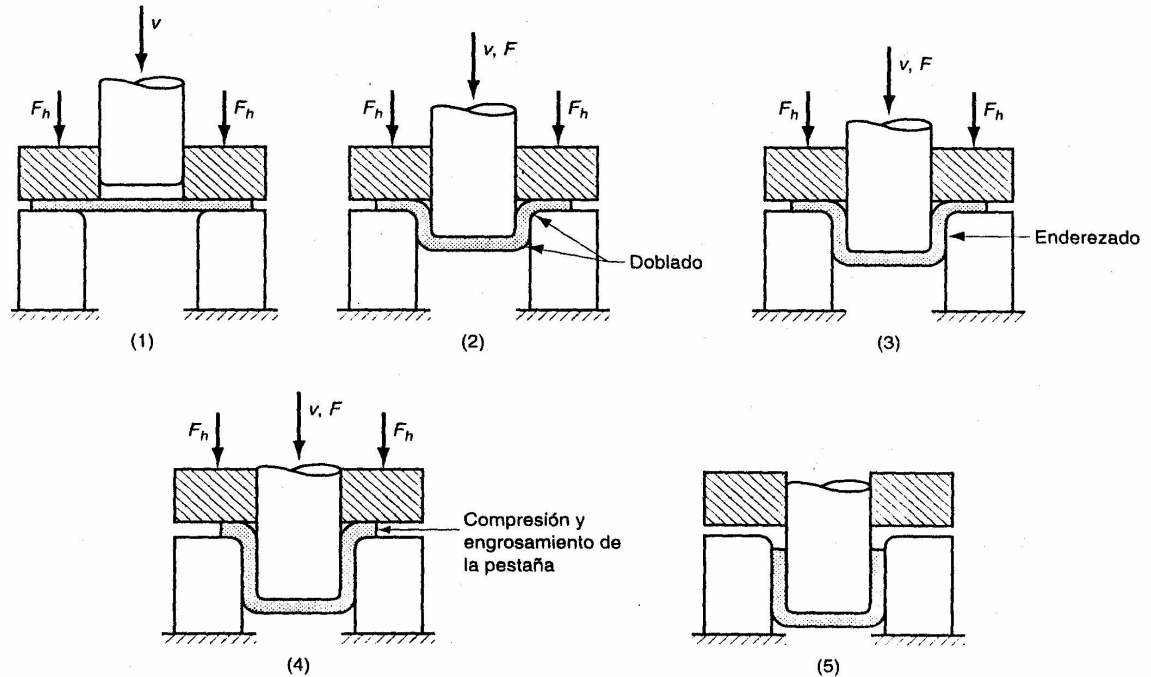
4.3.5 Embobinado, preparación del rollo y corte (Coil preparation and Shearing). La preparación del rollo, la cual es llevada a cabo mediante la utilización de máquinas de embobinado especialmente diseñadas, se compone de operaciones de recorte de bordes, corte de los extremos los cuales no tienen los requerimientos adecuados así como la posible unión de varios rollos para obtener otros más grandes o corte de rollos en varias bobinas para obtener otros mas pequeños, dependiendo de los requerimientos del cliente.

4.4 EMBUTICIÓN

Es un proceso de conformado mediante el cual, el material de forma originalmente plana, se transforma en un cuerpo hueco por medio del alargamiento, y en parte por medio de recalado. El disco de la chapa queda cogido entre el aro de embutir y el pisón de sujeción de la chapa, el cual presenta un agujero en el centro con el fin de permitir el paso del punzón de embutir que al ejercer presión sobre el disco de la chapa, lo hunde y lo transforma en un cuerpo hueco.

En la simple operación no se debe modificar el espesor de la chapa; se deduce que la superficie de la pieza producida ha de ser teóricamente equivalente a la de la chapa plana empleada. En la práctica esto no se verifica con exactitud.

Figura 9. Etapas de embutición profunda. (1) el punzón entra en contacto con el trabajo, (2) doblado, (3) enderezado, (4) fricción y compresión, y (5) forma final de la copa. Los símbolos indican: v movimiento del punzón, F = fuerza del punzón, F_h = fuerza del sujetador de formas.



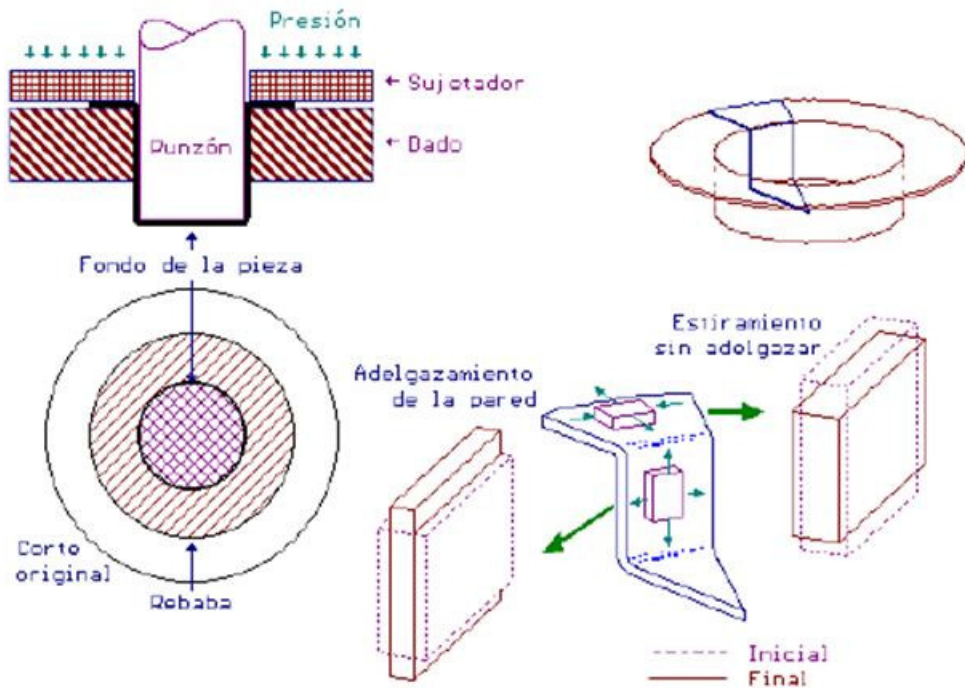
<http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-333.pdf>

La explicación de este proceso se ha considerado a partir de la obtención de una copa cilíndrica a partir de una pieza bruta en forma de disco. Por tal motivo nos limitaremos a tratar únicamente este caso, con lo cual no indicamos que nos sea posible trasladarnos a partir de este, a casos de embutición de formas más complejas.

En la embutición profunda de una copa el metal está sujeto a tres tipos diferentes de deformación. La figura 10 representa las deformaciones y tensiones en un trozo cortado de la copa durante la embutición, que corresponde a un sector del disco inicial. El metal del centro del disco queda bajo la cabeza del punzón y se estira, adaptándose a la forma del punzón, para lo cual ocurre adelgazamiento. El metal

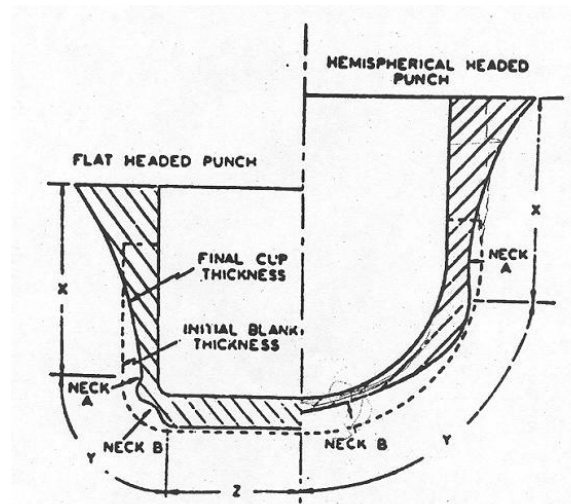
de esta región está sometido a un estirado biaxial de tensiones de tracción. El metal de la pestaña del disco tiene que embutirse a través de la boca de la matriz y, al hacerlo, su circunferencia externa disminuye continuamente de longitud, desde la inicial, D_0 , a la final de la copa acabada, D_p . Esto significa que está sometido a una deformación de tracción en la dirección radial. El resultado de estas dos deformaciones principales es el aumento continuo del espesor cuando el metal se desplaza hacia el interior, pero cuando el metal pasa por el borde de la matriz, primero es doblado y luego enderezado, mientras simultáneamente está sometido a una tensión de tracción. Este doblado plástico bajo tensión va acompañado de un considerable adelgazamiento, que modifica el engrosamiento debido a la contracción de la circunferencia periférica. El metal de la región de la pestaña está sometido únicamente a esfuerzos de tracción pura durante toda la operación de embutición.

Figura 10. Deformaciones que experimenta la copa durante la embutición.



El mayor aumento de espesor suele presentarse en el borde externo de la copa, que es la zona en que solo han actuado tensiones tangenciales de compresión. A su vez la mayor disminución de espesor se produce alrededor del borde del punzón y puede dar lugar también a un adelgazamiento en el fondo de la copa si las tensiones de tracción llegan a ser suficientemente elevadas, como se observa en la figura 11. Es efecto es aún más notable cuando la reducción es grande y el punzón es de diámetro pequeño.

Figura 11. Perfil de espesores de la copa formada.

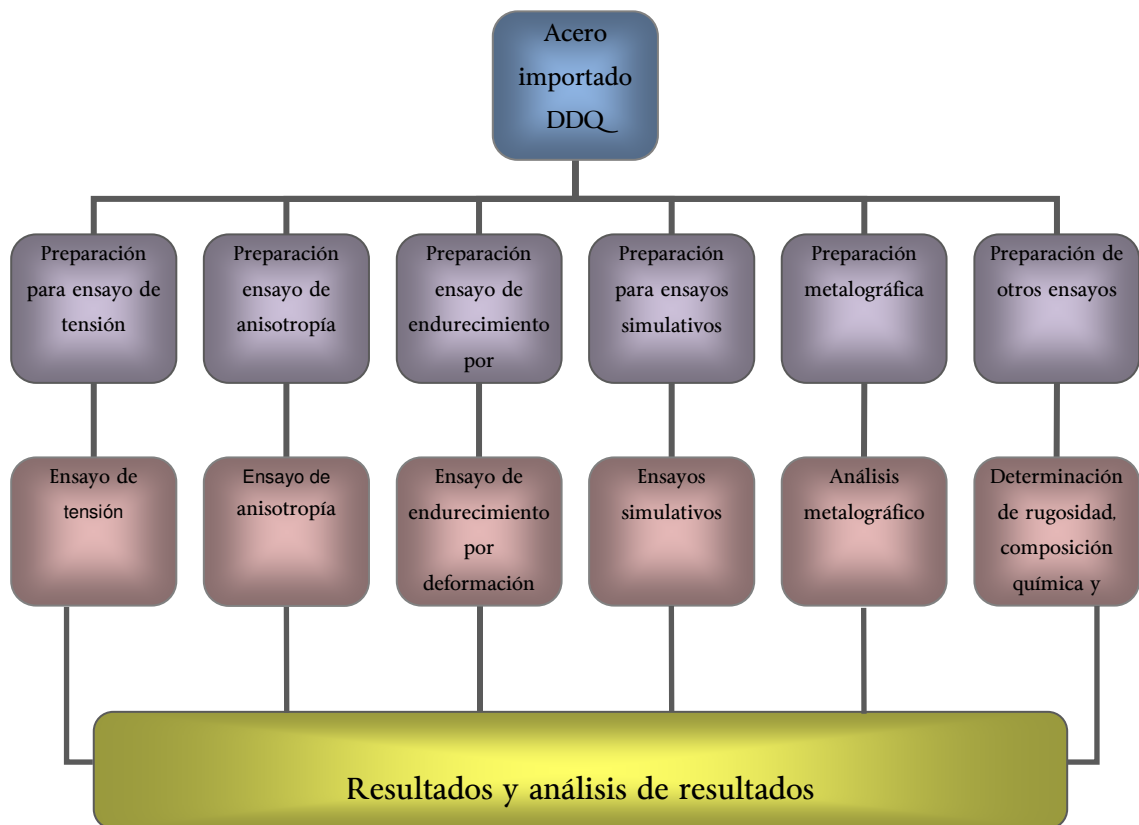


<http://www.me.mtu.edu/~mhmillar/me2500/cdrawing.pdf>

5. METODOLOGÍA

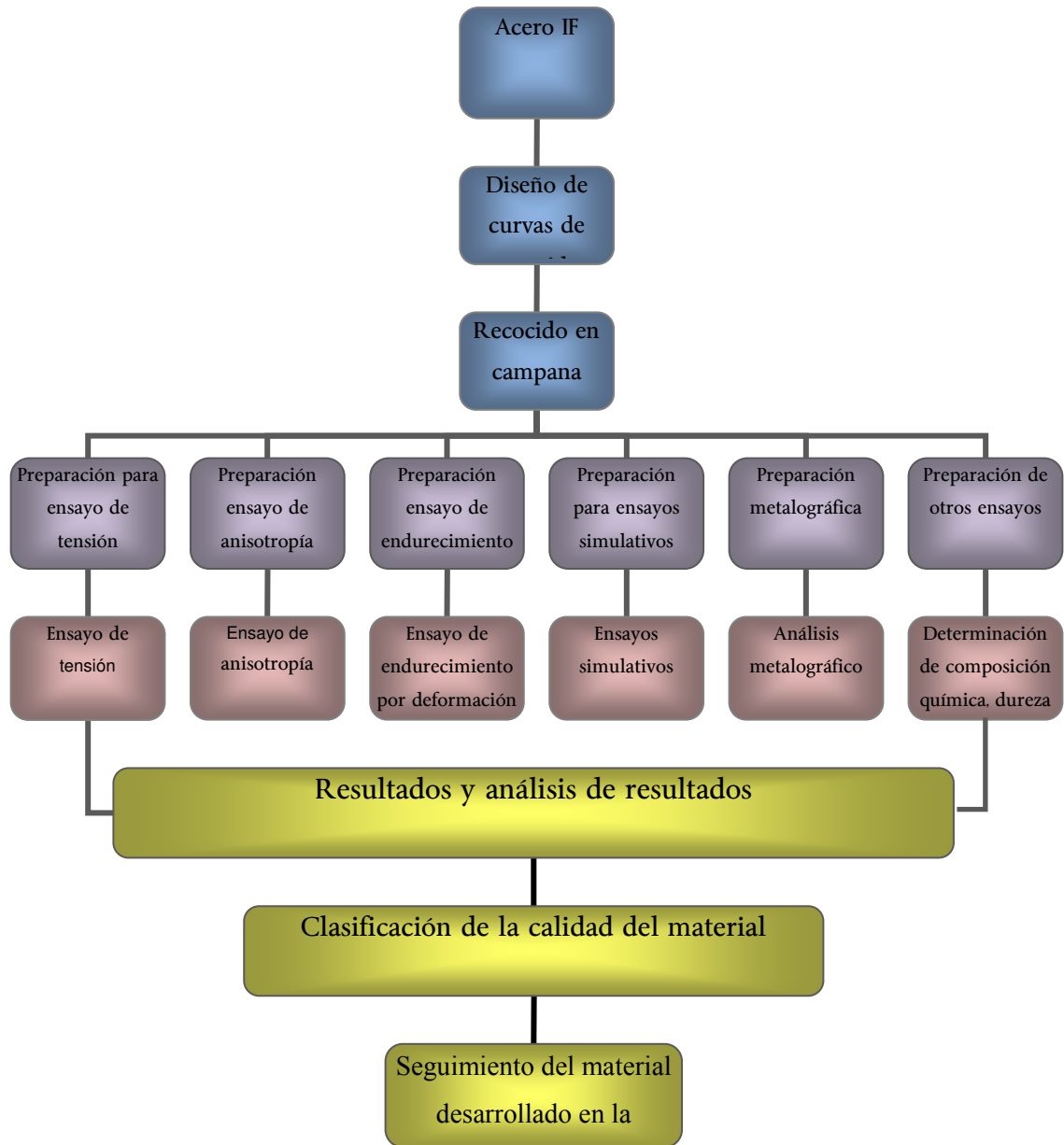
- 1- Estudio de normas que rigen este tipo de materiales y ensayos de laboratorio requeridos para evaluar y clasificar la calidad DDQ.
- 2- Caracterización de material que se importa y se comercializa a nivel nacional, en espesores de 0.46 mm y 0.60 mm. (ver figura12)

Figura 12. Diagrama de flujo metodología acero importado con calidad de embutición profunda.



3- Obtención de la calidad de embutición a partir de un acero IF y caracterización de dicho material con el fin de clasificarlo. La figura 13 muestra las etapas realizadas para llevar a cabo el objetivo principal de este trabajo.

Figura 13. Diagrama de flujo metodología desarrollo de calidad de embutición profunda (DDQ).



Es de importancia resaltar que la caracterización se realizó en cada una de las etapas de transformación del material en su paso por cada uno de los procesos que conllevan a obtener una lámina con calidad de embutición profunda, es decir en estado laminado en caliente, laminado en frío, recocido y templado.

5.1 DISEÑO DE EXPERIMENTO

Tomando como base el historial de pruebas en la búsqueda del desarrollo de la calidad de embutición profunda efectuadas para materiales de espesores mayores (0.70 y 1.65 mm) y comparándolos con la teoría^{8, 16, 17, 19}, se diseñó la siguiente prueba:

- 1- El material de espesor inicial de 3.0 mm fue sometido a un proceso de laminación donde se redujo el espesor un 79.5%. (Tabla 3)

Tabla 3. Historial de Laminación acero IF.

| Bobina | Dimensión inicial (Espesor x Ancho) mm ² | Dimensión final (Espesor x Ancho) mm ² | % Reducción | Peso (Kg) |
|--------|---|---|----------------|--------------|
| 97749 | 3.00 x 1220 | 0.615 x 1220 | 79,5 | 22355 |
| 97750 | 3.00 x 1220 | 0.615 x 1220 | 79,5 | 20870 |
| 97751 | 3.00 x 1220 | 0.615 x 1220 | 79,5 | 22895 |
| 97752 | 3.00 x 1220 | 0.615 x 1220 | 79,5 | 22140 |
| | | | $\Sigma=$ | 88260 |

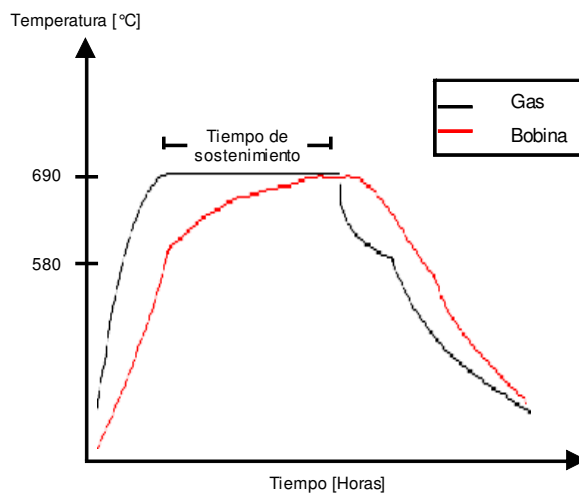
- 2- Se identificaron las variables principales que afectan el tratamiento térmico de recocido (temperatura y tiempo de sostenimiento), con el fin de optimizar sus condiciones, asegurándonos de proveer recristalización completa con el uso de temperaturas altas (690 °C) y homogeneidad en las propiedades mecánicas de la bobina a través de su radio por medio de la incursión de

tiempos de sostenimiento (mínimo, 3 horas). Por tal motivo se fijaron las condiciones del recocido en campana (tabla 4), estableciéndose una curva teórica de la prueba (figura 14) para el gas durante el proceso.

Tabla 4. Condiciones experimentales prueba de recocido.

| Diseño de experiencia | |
|--|-----------|
| Temperatura de sostenimiento(°C) | 690 |
| Gradiente de temperatura entre gas y termocupla en centro de bobina (°C) | 5-10 |
| Tiempo de sostenimiento (Horas) | 3, minimo |
| Temperatura de cambio de Horno a campana de enfriamiento (°C) | 580 |

Figura 14. Curva teórica esperada.



- 3- Con el fin de garantizar que las condiciones de la prueba fijadas se llevaran a cabalidad, fueron insertadas en puntos estratégicos termocuplas para un monitoreo permanente de las temperaturas en cada una de las bobinas, las cuales mediante un sistema de adquisición de datos (data Q) registraron las temperatura para cada una de las anteriormente mencionadas.

Figura 15. Esquema montaje experimental de la prueba de recocido.



Los puntos rojos presentes en la figura 15, indican la presencia de una termocupla. I, C, E insertada en una zona interna, central y externa de la bobina, respectivamente. También se insertó una termocupla en el interior de la campana para monitorear la temperatura del gas.

4- A su vez, las condiciones del laminado de temple fueron establecidas previamente. (tabla 5)

Tabla 5. Condiciones laminado de temple

| Espesor inicial (mm) | Espesor final (mm) | Reducción (%) |
|----------------------|--------------------|---------------|
| 0,615 | 0,600 | 2,44 |

El en diseño de la prueba se contemplo como último paso, la caracterización de las láminas de acero.

5.2 CARACTERIZACIÓN

Como se mencionó anteriormente, la etapa de caracterización de las muestras se efectuó al realizar alguno o todos los ensayos descritos a continuación, a las bobinas en estado laminado en caliente (estado de recepción luego de ser decapada), laminado en frío, recocido y templado (Producto final).

La caracterización y evaluación de la formabilidad de una lámina con calidad de embutición profunda implica tres categorías principales:

- a) Ensayos de los cuales se derivan las propiedades fundamentales
- b) Ensayos simulativos
- c) Otros

5.2.1 Propiedades fundamentales

Ensayo de anisotropía (Norma ASTM E517) ⁴. Con el fin de cuantificar el fenómeno de anisotropía normal presente en una lámina de acero se emplea típicamente el coeficiente de anisotropía o coeficiente de Lankford o índice r. Este coeficiente se obtiene de la razón entre las deformaciones en el ancho y en el espesor (1). En las mediciones experimentales se considera la relación de volumen constante (2), debido a que se pueden cometer errores relativos muy grandes en la medición de espesores.

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (1)$$

$$\varepsilon_w + \varepsilon_l + \varepsilon_t = 0 \rightarrow \varepsilon_t = -(\varepsilon_w + \varepsilon_l) \quad (2)$$

De lo anterior resulta que el coeficiente anisotropía puede ser escrito de la siguiente forma (3):

$$r = \frac{\varepsilon_w}{-(\varepsilon_w + \varepsilon_l)} = \frac{\ln\left(\frac{w_o}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f w_f}{l_o w_o}\right)} \quad (3)$$

Donde:

ε_w , ε_l y ε_t , son la deformación en el ancho, longitud y espesor de la probeta, respectivamente.

W_o y W_f son el ancho inicial y final de la probeta, respectivamente.

l_o y l_f son la longitud inicial y final de la misma (distancia entre marcas), respectivamente.

Dado que el índice informa de la anisotropía del material, la norma ASTM E517, aconseja realizar la determinación del índice sobre probetas cortadas a 0° , 45° y 90° respecto a la dirección de laminación. Así, se obtiene el valor de r en cada caso y un valor promedio \bar{r} definido por la ecuación (4), donde r_0 , r_{45} y r_{90} son los parámetros de Lankford, asociados a las orientaciones de 0° , 45° y 90° , respectivamente.

$$\bar{r} = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \quad (4)$$

En general, el índice medido en ensayos de tracción para las distintas direcciones sobre el plano de la lamina toma diferentes valores, por lo cual se habla de anisotropía planar (Δr), la cual hace referencia a la máxima variación de r sobre el plano de la lamina. Esta es calculada mediante la ecuación (5).

$$\Delta r = \frac{(r_0 + r_{90} - 2r_{45})}{2} \quad (5)$$

Ensayo de coeficiente de endurecimiento por deformación (Norma ASTM E646) ⁵. La primera parte del diagrama esfuerzo-deformación es una región lineal que representa el comportamiento elástico del metal. Dicha región está descrita por la ley de Hook. Después de superar el límite o esfuerzo de fluencia, el material entra en lo que se conoce como el comportamiento plástico, mostrando una región curva en el diagrama esfuerzo-deformación. A medida que la deformación plástica del metal va aumentando cada vez se hace más difícil su deformación, es decir, el material se va endureciendo. La razón para que esto ocurra se debe al movimiento y agrupamiento de las dislocaciones, las cuales son las responsables que los metales y aleaciones como el acero se pueden deformar plásticamente.

De acuerdo con el enunciado anterior, se define el “coeficiente de endurecimiento por deformación (Índice n)”. Este factor se relaciona con la ductilidad y/o conformabilidad de los metales y aleaciones.

La ecuación de Holloman (6) define la deformación plástica, en el diagrama de esfuerzo-deformación:

$$\sigma = k\varepsilon^n \quad (6)$$

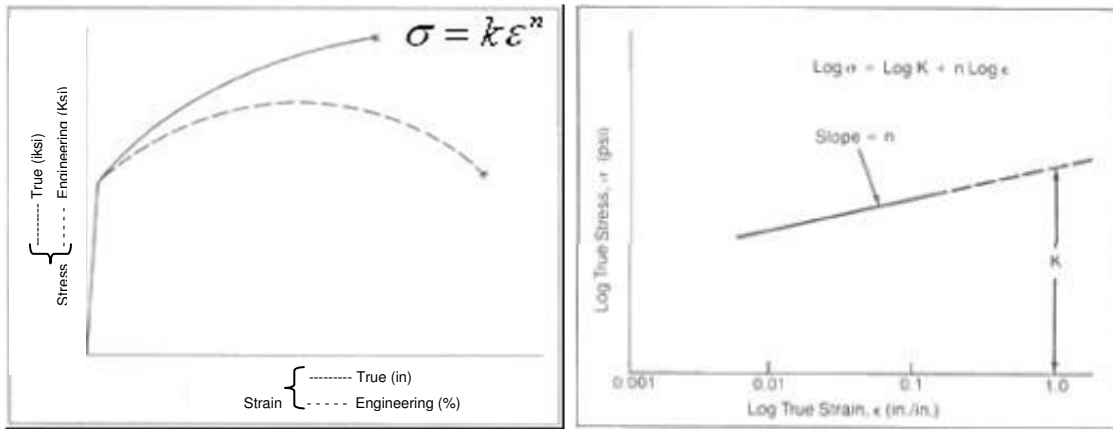
Donde:

σ representa el esfuerzo,

k es una constante propia del material,

ε es la deformación real y n es el coeficiente de endurecimiento por deformación.

Figura 16. Exponente de endurecimiento por deformación. a) Curva esfuerzo-deformación y b). Forma de representación para la cual n es una pendiente.



(a)

(b)

<http://www.a-sp.org/database/viewsec.asp?sec=246>

De la figura 16. b) se puede observar que la pendiente para esa ecuación de la recta representa el valor de n.

Experimentalmente, según la norma ASTM E646, la cual reglamenta la realización del ensayo para calcular el índice n; éste se determina graficando los valores de los logaritmos naturales del esfuerzo y de la deformación obtenidos en una ensayo de tensión y calculando por el método de ajuste de los mínimos cuadrados la pendiente de la recta resultante.

Ensayo de tensión (Norma ASTM E 8M) ⁶. Este ensayo se utiliza para evaluar la mayoría de las propiedades de los metales y aleaciones, entre ellas el acero. Este ensayo consiste es someter una muestra, denominada probeta, de sección uniforme y conocida, a una fuerza de tracción que va aumentando progresivamente. En esta prueba se trata de hacer que la muestra metálica (probeta) se rompa en un periodo relativamente corto y a una velocidad constante. La realización de éste ensayo se encuentra estandarizado en la norma ASTM E 8M.

Las propiedades más importantes en la determinación de la calidad del acero son:
Esfuerzo de fluencia convencional o límite elástico

Resistencia máxima a la tensión

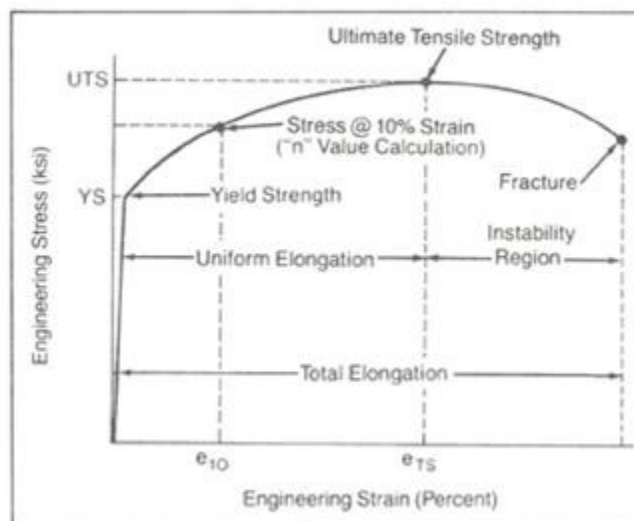
Porcentaje de elongación a la fractura

- Esfuerzo de fluencia convencional o límite elástico: (YS)

El esfuerzo de fluencia es una de las propiedades más importantes para el uso en diseño de ingeniería estructural, ya que es la fuerza a la que un metal o aleación muestra una deformación plástica significativa.

Debido a que no hay un punto definido en la curva esfuerzo- deformación (figura 17) donde termine la deformación elástica y empiece la deformación plástica, el esfuerzo de fluencia se elige como aquel esfuerzo para el que se produce una cantidad definida de deformación plástica. Internacionalmente se acepta elegir el punto de fluencia (Yield Point, YP) cuando ha tenido lugar una deformación plástica del 0.2%, y se determina a partir de la curva producto del ensayo de tracción.

Figura 17. Curva esfuerzo - deformación



<http://www.a-sp.org/database/viewsec.asp?sec=246>

- Resistencia máxima a la tensión:

Es la máxima fuerza alcanzada en la curva esfuerzo- deformación. Normalmente los materiales de gran deformabilidad, como el caso específico del acero laminado en frío, después de un cierto grado de deformación plástica se produce una localización o concentración de la deformación, lo cual implica una disminución del área de la sección transversal (comúnmente llamada estricción). A partir de ese momento, el esfuerzo disminuirá a medida que se continúe la deformación hasta alcanzar la rotura. Una vez se alcanza la estricción, se considera que el material ha fallado, puesto que la fractura final se alcanzará a esfuerzos mucho más bajos. No debe confundirse pues la resistencia máxima a la tensión, denominada también UTS (Ultimate Tensile Strength) con el esfuerzo de rotura, que como su nombre lo indica se trata del esfuerzo alcanzado en el momento de la fractura, que para el caso de materiales dúctiles como el acero laminado en frío y recocido, siempre es más bajo que el UTS.

- Porcentaje de elongación:

La cantidad de elongación que una muestra experimenta durante la prueba proporciona un valor de ductilidad del metal. La ductilidad de los metales usualmente se expresa como % de elongación. En el caso de los materiales en forma de lámina, se empieza con una longitud calibrada de 50 mm. En general, a mayor ductilidad, mayor es el porcentaje de elongación.

El porcentaje de elongación a la fractura de un metal es de gran importancia no solo como medida de ductilidad, sino también como un índice de calidad del metal. Por ejemplo, si hay porosidad o inclusiones en el metal o si ha ocurrido un daño debido al sobrecalentamiento, el porcentaje de elongación de la muestra tratada disminuiría por debajo de lo normal.

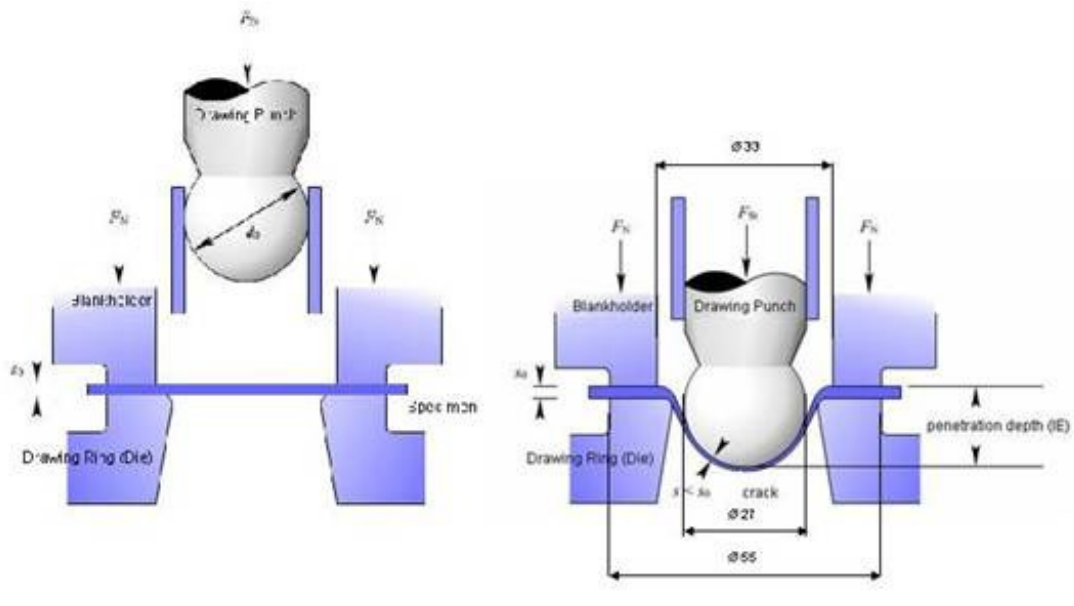
5.2.2 Ensayos simulativos

Ensayo Erichsen de embutición: (DIN 50101). Este método es empleado para conocer la aptitud de una chapa para ser sometida a embutición profunda.

El ensayo Erichsen consiste en estampar una bola o un punzón con un extremo esférico sobre una chapa sujeta por todos sus lados. La magnitud de la embutición producida de la chapa, hasta que la chapa empiece a desgarrarse, es una medida de la aptitud de la chapa para la embutición profunda (figura 18).

Como material de ensayo se emplean chapas y flejes de hasta 2 mm de espesor. Estos deben tener un ancho mínimo de 70 mm, y ser regularmente planos.

Figura 18. Proceso de embutido Erichsen

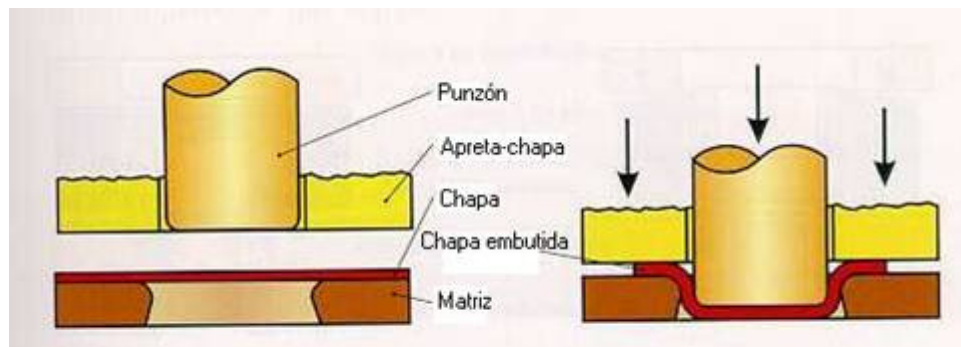


<http://aluminium.matter.org.uk/>

Ensayo de la copa o copado (Cup drawing test). Este ensayo se constituye en una variante del ensayo Erichsen, en este caso se partiendo de discos de chapa, se embuten diversas copas con herramientas especiales y un punzón de diámetro uniforme como se muestra en la figura 19.

Los discos son estirados en este caso en toda su dimensión con la herramienta de embutir, resultando un cuerpo hueco cilíndrico.

Figura 19. Proceso de embutido en forma de copa o copado.



<http://www.dim.udec.cl/cursos/pdp/embutido/embutido1.htm>

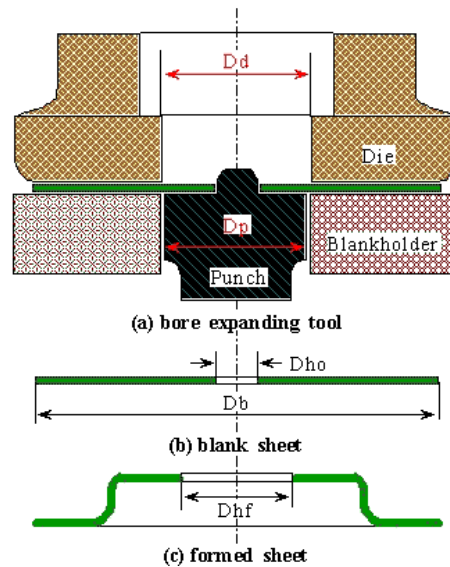
Ensayo de abocardado (Bore Expanding test). En este tipo de ensayo se sujeta una chapa con un agujero circular y por medio de un punzón con su extremo de ataque recto se le embute hasta formar una copa con lo que se ensancha considerablemente el diámetro del agujero inicial. Este ensanchamiento conseguido hasta la aparición de la primera fisura e una medida de la capacidad del material para la embutición profunda. El ensanchamiento se define como λ , relación de expansión del agujero, expresado como porcentaje:

$$\lambda = \frac{D_{hf} - D_{ho}}{D_{ho}} \times 100 \quad (7)$$

Donde:

D_{hf} es el diámetro final del agujero, es decir después de la embutición y D_{ho} es el diámetro inicial del agujero, antes del ensayo.

Figura 20. Ensayo de abocardado por embutición profunda



5.2.3 Otros

Ensayo de dureza. El ensayo de dureza mide la resistencia de un material a la penetración de un punzón o una cuchilla. Este penetrador es también llamado durómetro.

El durómetro usualmente consta de una bolita, pirámide o un cono de un material mucho más duro que el acero que se está midiendo.

La profundidad hasta la cual penetra este material nos entrega un valor, el que está tabulando, obteniéndose así una medida de la dureza del acero.

Su uso está ampliamente extendido, especialmente dentro de las áreas de conformado y de tratamiento térmico de los aceros.

Dado que el ensayo de dureza puede hacerse fácilmente, la información obtenida puede ser evaluada inmediatamente. Por estas razones y por su carácter no destructivo se le usa ampliamente para control de calidad en producción.

Los ensayos de dureza más utilizados en el campo ingenieril, son el Rockwell y el Brinell.

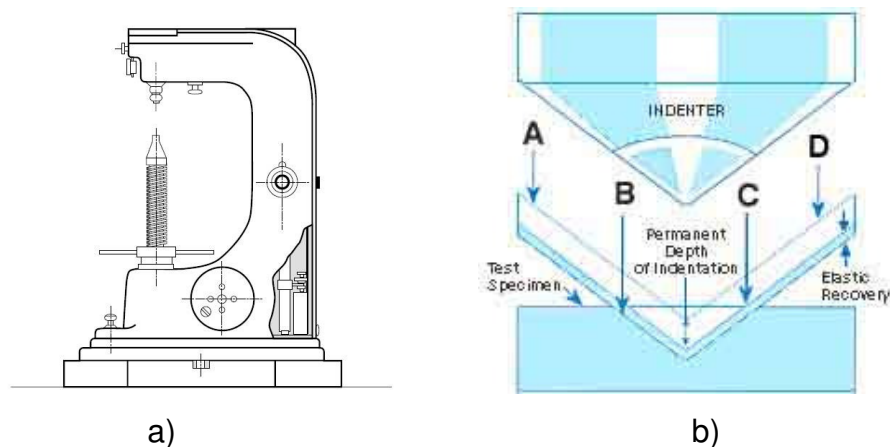
Comprender el método Rockwell es de gran importancia debido a que las medidas de dureza para este proyecto fueron registradas en esta escala, específicamente, Rockwell B (HRB).

En general este método se puede realizar con 2 tipos de penetradores:

- 1) Bolas de 1/8" y 1/16"
- 2) Conos de 120° ángulo en el vértice.

Este método se encuentra definido en la norma ASTM E 18, mide la profundidad permanente de la indentación producida por la fuerza del indentador. El mecanismo de penetración ocurre como en la figura 21.b. Primero, una fuerza preliminar (A), llamada precarga o carga menor, es aplicada a la muestra usando un penetrador. Este es el cero o posición referencia la cual reduce los efectos del acabado superficial. Luego, una carga adicional o carga mayor (B) es aplicada para alcanzar la fuerza total requerida. Esta fuerza es sostenida por una determinada cantidad de tiempo para permitir la recuperación elástica del metal (C). La fuerza adicional es descargada y la posición final (D) es medida contra la posición preliminar y convertida a un número de dureza Rockwell.

Figura 21. Equipo y mecanismo de penetración para ensayo de dureza. a) Durómetro y b) Mecanismo de ensayo Rockwell



<http://www.hardnesstesters.com/rockwell-hardness-tester.htm>

Ensayo Metalográfico . En el análisis metalográfico sin duda alguna es posible decir, que la etapa más importante es la observación y análisis microscópico. Con lo anterior no se subestima las etapas previas a esto, ya que de las anteriores depende la confiabilidad de los resultados. Entre las etapas básicas encontramos:

1. Corte: El tamaño de la muestra siempre que se pueda debe ser tal que su manejo no encierre dificultad en la operación.
2. Montaje de muestras: Con frecuencia, la muestra a preparar, por sus dimensiones o por su forma, no permite ser pulida directamente, sino que es preciso montarla o embutirla en una pastilla. El material del que se componen estas puede ser Lucita (resina termoplástica) o Bakelita (resina termoendurecible).
3. Desbaste: Después de montada la probeta, se inicia el proceso de desbaste sobre una serie de hojas de esmeril o lija con abrasivos más finos, sucesivamente. El proceso de desbaste se divide en 3 fases: Desbaste grosero, Desbaste intermedio y Desbaste final. Cada etapa de preparación de probetas metalográficas debe realizarse muy cuidadosamente para obtener al final una superficie exenta de rayas.
 - Desbaste Grosero: Es el desbaste inicial, que tiene como objetivo planear la probeta, lo cual puede hacerse a mano y aun mejor con ayuda de una lijadora de banda. El papel de lija utilizado es de carburo de silicio con granos de 240 o papel de esmeril # 1. En cualquier caso, la presión de la probeta sobre la lija o papel de esmeril debe ser suave, para evitar la distorsión y rayado excesivo del metal.

- Desbaste Intermedio: Se realiza apoyando la probeta sobre el papel de lija o de esmeril, colocado sobre una mesa plana o esmeriladora de banda fija. En esta fase se utilizan los papeles de lija No. 320/340 y 400 o de esmeril # 1/O y 2/O.
- Desbaste Final: Se realiza de la misma forma que los anteriores, con papel de lija No. 600 ó de esmeril # 3/O.

En todo caso, en cada fase del desbaste debe tomarse siempre en cuenta el sistema refrigerante. Cada vez que se cambie de papel, debe girarse 90 grados, en dirección perpendicular a la que se seguía con el papel de lija anterior, hasta que las rayas desaparezcan por completo. Se avanza y se facilita mucho las operaciones descritas utilizando una pulidora de discos, a las que se fija los papeles de lija adecuado en cada fase de la operación. Las velocidades empleadas varían de 150 a 250 rpm. En otro caso se pueden utilizar debastadoras fijas o de bandas giratorias.

4. Pulido fino: La última aproximación a una superficie plana libre de ralladuras se obtiene mediante una rueda giratoria húmeda cubierta con un paño cargado con partículas abrasivas seleccionadas en su tamaño. En éste sentido, existen muchos abrasivos, prefiriendo a gamma del oxido de aluminio para pulir metales ferrosos, los basados en cobre u oxido de cerio para pulir aluminio, magnesio y sus aleaciones. Otros abrasivos son la pasta de diamante, oxido de cromo y oxido de magnesio. La selección del paño para pulir depende del material que se va a pulir y el propósito del estudio metalográfico.
5. Ataque: Permite poner en evidencia la estructura del metal o aleación. Existen diversos métodos de ataque pero el más utilizado es el ataque químico. El ataque químico puede hacerse sumergiendo la muestra con cara pulida hacia

arriba en un reactivo adecuado, o pasar sobre la cara pulida un algodón embebido en dicho reactivo. Luego se lava la probeta con agua, se enjuaga con alcohol o éter y se seca en corriente de aire. El fundamento se basa en que el constituyente metalográfico de mayor velocidad de reacción se ataca más rápido y se verá más oscuro al microscopio, y el menos atacable permanecerá más brillante, reflejará más luz y se verá más brillante en el microscopio.

6. Observación y Análisis: esta etapa conlleva a la identificación de las características microestructurales del material y en algunos casos la determinación del tamaño de grano de acuerdo a la norma ASTM E 112, la cual, especifica gran variedad de métodos, de los cuales se usó el procedimiento de comparación o método directo. La clasificación del tamaño de grano en observaciones microscópicas con este método, se hace mediante la comparación de los granos con patrones, cartas o graficas pertenecientes a una clasificación establecida por la A.S.T.M.
7. Fotomicrografía: Mediante ciertos dispositivos es posible obtener un registro de la observación microscópica.

Rugosidad. Dentro del mundo de la tecnología, se observan gran cantidad de piezas que han de ponerse en contacto con otras y rozarse a altas velocidades. El acabado final y la textura de una superficie es de gran importancia e influencia para definir la capacidad de desgaste, lubricación, resistencia a la fatiga y aspecto externo de una pieza o material, por lo que la rugosidad es un factor importante a tener en cuenta. La determinación de la rugosidad, en general se realiza mediante un equipo, (rugosímetro), el cual consta de un palpador piezoeléctrico, donde el desplazamiento de la aguja del palpador deforma elásticamente un material piezoeléctrico, que responde a dicha deformación generando una señal eléctrica, que a su vez es enviada y se registra en el dispositivo como Ra (rugosidad superficial).

5.3 EQUIPOS

Campana de recocido HICON/H2 EBNER. La tecnología de recocido en atmósferas HICON/H2 de las campanas EBNER para chapas de acero combinan dos factores que son muy importantes para chapas laminadas en frío, las propiedades mecánicas y el acabado superficial. Lo cual resulta en bajos costos por tonelada recocida.

Figura 22. Campana de recocido



Máquina Universal de ensayos Tinius Olsen. La máquina Universal de ensayos TINIUS-OLSEN, modelo 129 de construcción modular con capacidad máxima de 150 KN , se acoge a la norma ASTM E 4 y E 83, dotada de extensómetros marca TINIUS-OLSEN, consistente de dos mordazas, una fija y otra móvil.

En esta máquina, se pueden obtener registros de la carga aplicada en cada instante y del alargamiento que vaya sufriendo la probeta, para este último. El registro del alargamiento se realiza a partir de una señal procedente de un extensómetro conectado a la probeta.

Los registros de carga y alargamientos mencionados anteriormente, se pueden convertir a valores de esfuerzo y deformación respectivamente, y construir con ellos una gráfica, que representa el esfuerzo mecánico respecto a la deformación obtenida. Este proceso se ve beneficiado con el uso del Software para Windows versión #6.03.33., con el cual cuenta la máquina.

Figura 23. Máquina de ensayos universales



Espectrómetro de emisión óptica BAIRD. El espectrómetro de emisión óptica modelo DV-6 utiliza una chispa de alta energía generada a través del espacio llenado con argón, entre un electrodo y la muestra de material que se va a analizar. La chispa crea una emisión de radiación desde la superficie de la muestra excitada generando longitudes de onda características de su composición química.

El análisis rápido y simultáneo de los elementos deseados cumple con los requisitos de muchos sectores de las industrias de los metales, desde la clasificación de chatarra, revisión del material de entrada, control de la producción, Investigación y desarrollo o pruebas de entrega de productos finales. Entre las aplicaciones típicas se encuentran la determinación del contenido de hierro, acero, aluminio, cobre, níquel, cinc, plomo y muchos otros metales y aleaciones.

Figura 24. Espectrómetro de emisión óptica



Durómetro Wilson/ Rockwell serie 600. El durómetro modelo 643T de la serie 600, está provisto de un display digital, donde se ofrece la posibilidad de convertir los resultados a otras escalas de dureza, un menú de opciones con teclas suaves para configurar el equipo, posibilidad de tomar durezas superficiales. Fácil selección de las cargas y aplicación de las mismas.

Figura 25. Espectrómetro de emisión óptica



Erichsen modelo 129. La máquina Erichsen modelo 129, con carga para rangos bajos 18.5 KN y rangos altos 80 KN acogiéndose a la Norma ISO/R 149-60 para láminas de espesores entre 0.2 y 2 mm; mide el avance de una cabeza desde que toca la chapa hasta que se rompe ésta chapa. Esta máquina es manejada electro-hidráulicamente, donde los ensayos pueden ser controlados automáticamente o manualmente. La prensa del blanco se encuentra integrada en la cabeza del ensayo, se pueden controlar las variables de velocidad de embutición y fuerza del anillo prensachapas, independiente de la carga aplicada. El display muestra el desplazamiento del punzón, mientras que la fuerza de embutición se observa directamente en el equipo por medio de una aguja. En este equipo se pueden llevar a cabo los siguientes ensayos:

- Ensayo de copado Erichsen
- Ensayo de embutición profundidad de una copa
- Ensayo de expansión del agujero o abocardado

Figura 26. Máquina Erichsen



La caracterización metalográfica fue llevada a cabo por medio de los equipos mostrados a continuación:

Cortadora de discos BUEHLER. Este tipo de cortadoras se utiliza en general para realizar rutinas de corte de laboratorio de grandes volúmenes. Dependiendo del tipo de disco usado, es posible realizar el corte a diferentes materiales. En este caso metales ferrosos.

Figura 27. Máquina cortadora



Montadora de baquelita Simplimet 2-BUEHLER. En la Simplimet 2 se pueden hacer montajes de materiales de laboratorio con un requerimiento de volúmenes de muestras que varíe de bajo a medio. Su uso es muy fácil; ya que esta prensa manual esta provista de un sistema hidráulico que provee la compresión necesaria para producir un rango de tamaños de especímenes.

Figura 28. Montadora de baquelita



Debastadora BUEHLER. Una vez, la muestra se encuentre montada en baquelita es necesario eliminar la primera capa de material de la probeta; Para lo cual se provee la debastadora con papel lija No. 80.

En este equipo se lleva acabo la etapa de desbaste grueso comprendido en la preparación metalográfica.

Figura 29. Debastadora



Pulidora METASERV 2000- BUEHLER. La Metaserv 2000 ofrece una combinación de desempeño, economía y fiabilidad en aplicaciones del análisis microestructural. Esta diseñada para realizarse el desbaste manual y/o para el pulido.

Provista de un disco de 12 pulgadas de diámetro. Al cual se le adhiere en este caso en particular, el paño de pulido.

Figura 30. Pulidora metalográfica



Microscopio óptico OLYMPUS modelo PMES. El microscopio óptico marca Olimpos, modelo PMES con aumentos de 5X, 10X, 20X, 50X, 100X con ocular de 10X , viene dotado con una cámara modelo C-35 de 35 mm, luz halógena de 12 voltios y 50 watts. La amplificación total es igual al producto de las amplificaciones del objetivo y ocular. La amplificación máxima obtenida con el microscopio óptico es de unos 2000 x.

Mediante éste, se pueden definir características estructurales, como el tamaño de grano, se puede conocer el tamaño, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras heterogeneidades que tan profundamente pueden modificar las propiedades mecánicas y el comportamiento general de un metal.

Figura 31. Microscopio óptico



Medidor de rugosidad de superficie TR100. Es un instrumento de destacable calidad, útil para medir superficies planas y diámetro exterior de cilindro exterior, entre otros. Puede medir tanto en parámetro Ra, como Rz. Trabaja con un largo de trazado de 6mm, y una velocidad de trazado de 1.0 mm/seg. Tiene una repetitividad de las mediciones de <12%.

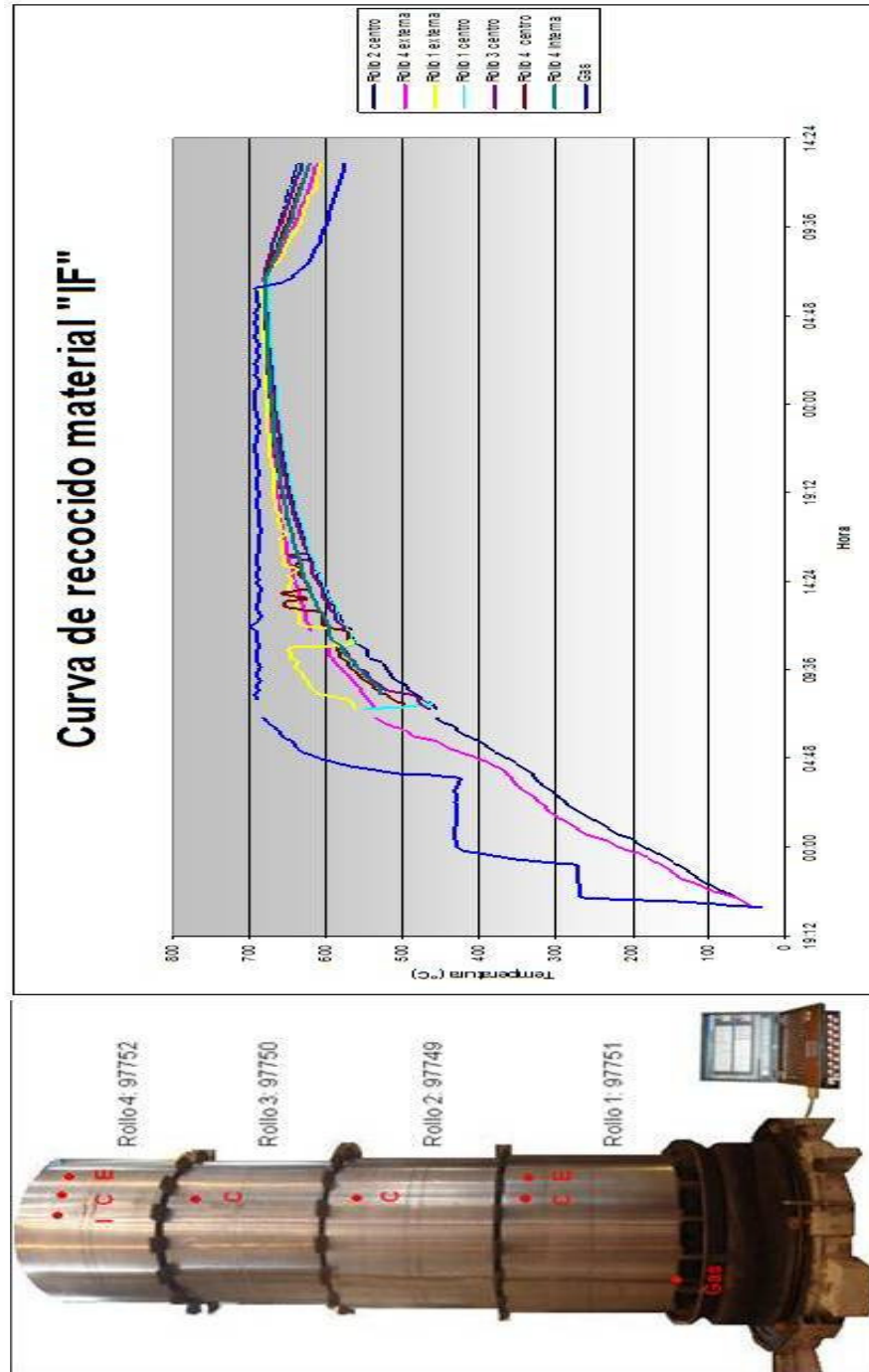
Puede ser utilizado en la industria para rectificaciones planas, acabado superficial en general y para trabajar sobre tapas de válvulas. También es apto para medir ejes partir de 50 mm.

Figura 32. Rugosímetro



6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

Figura 33. Curva experimental prueba de recocido. Perfil de temperaturas



La Figura 33, es el resultado del registro permanente de las temperaturas de la bobinas, en posiciones específicas durante el ciclo de recocido. Por medio de la curva obtenida se aseguró que tanto el gas como la bobina siguieran el diseño de la prueba sugerida.

Las propiedades mecánicas del producto final y condiciones del tratamiento térmico realizado, se encuentran reportadas en la tabla 6. Su análisis y comparación con la tabla 1, conlleva a afirmar la obtención de un acero con calidad de embutición profunda, la cual es el resultado de la modificación y control de un sin número de variables, donde al manejarse correctamente producen óptimos resultados.

Tabla 6. Resumen caracterización material IF

| Posición | Temperatura máxima (°C) | Tiempo de calentamiento (h) | ΔT (°C) | No Tamaño de grano ASTM (G) | Fluencia (MPa) | % de Elongación | Índice r (rm 20%) | Índice n |
|----------|-------------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|----------------|-----------------|-------------------|----------|
| GAS | 690,0 | 11,25 | - | - | - | - | - | - |
| 4 | 680,8 | 33,0 | 8,8 | 8 | 203,0 | 37,4 | 1.81 | 0,19 |
| 3 | 680,8 | 33,3 | 8,9 | 8 | 202,0 | 45,0 | 1.82 | 0,20 |
| 2 | 679,6 | 33,8 | 10,2 | 8 | 185,5 | 43,2 | 1.78 | 0,21 |
| 1 | 676,3 | 33,8 | 13,3 | 8 | 200,0 | 38,8 | 1.98 | 0,20 |

Como parte de la metodología empleada, las bobinas fueron caracterizadas en cada una de sus etapas en el proceso de obtención de la calidad DDQ. Las tablas reportadas registran los resultados de cada uno de estos ensayos, en las cuales es usada la siguiente nomenclatura para identificar la etapa en la que se encuentra el material:

A: Laminación en caliente y decapado.

AA: Laminación en frío.

AAA: Recocido.

AAAA: Laminado de temple → Producto final.

Es de gran importancia mencionar que alguno de estos ensayos no fueron aplicados por motivos de tolerancias de la máquinas empleadas o simplemente por que no son aplicados para láminas en tales estados.

Junto al reporte de los resultados de la prueba, se encuentran los resultados de las bobinas importadas cuya calidad corresponde a embutición profunda, comercializadas a nivel nacional.

6.1 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE R

En las tablas 7, 8, 9, se encuentran reportados los resultados del ensayo de anisotropía practicado a las láminas de acero IF y al AISI/SAE 1006, de acuerdo al procedimiento especificado en la norma ASTM E 517.

Tabla 7. Anisotropía acero IF 0.60 mm

| Bobina | r_{0}^{20} | r_{45}^{20} | r_{90}^{20} | r_{m}^{20} | Δr |
|-----------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------|
| 97749AAA | 1,33 | 1,30 | 1,35 | 1,32 | 0,04 |
| 97749AAAA | 1,71 | 1,62 | 2,31 | 1,81 | 0,39 |
| 97750AAA | 1,50 | 1,20 | 1,78 | 1,42 | 0,44 |
| 97750AAAA | 1,74 | 1,65 | 2,23 | 1,82 | 0,33 |
| 97751AAA | 1,29 | 1,40 | 1,68 | 1,44 | 0,08 |
| 97751AAAA | 1,62 | 1,70 | 2,11 | 1,78 | 0,17 |
| 97752AAA | 1,36 | 1,28 | 1,45 | 1,34 | 0,12 |
| 97752AAAA | 1,68 | 1,93 | 2,39 | 1,98 | 0,11 |

Tabla 8. Anisotropía acero SAE 1006 0.46 mm

| Bobina | r_{0}^{20} | r_{45}^{20} | r_{90}^{20} | r_{m}^{20} | Δr |
|--------|--------------|---------------|---------------|--------------|-------------|
| 11120 | 1,53 | 1,34 | 1,42 | 1,41 | 0,14 |
| 12063 | 1,55 | 1,37 | 1,85 | 1,53 | 0,33 |
| 11136 | 1,50 | 1,28 | 1,90 | 1,49 | 0,42 |

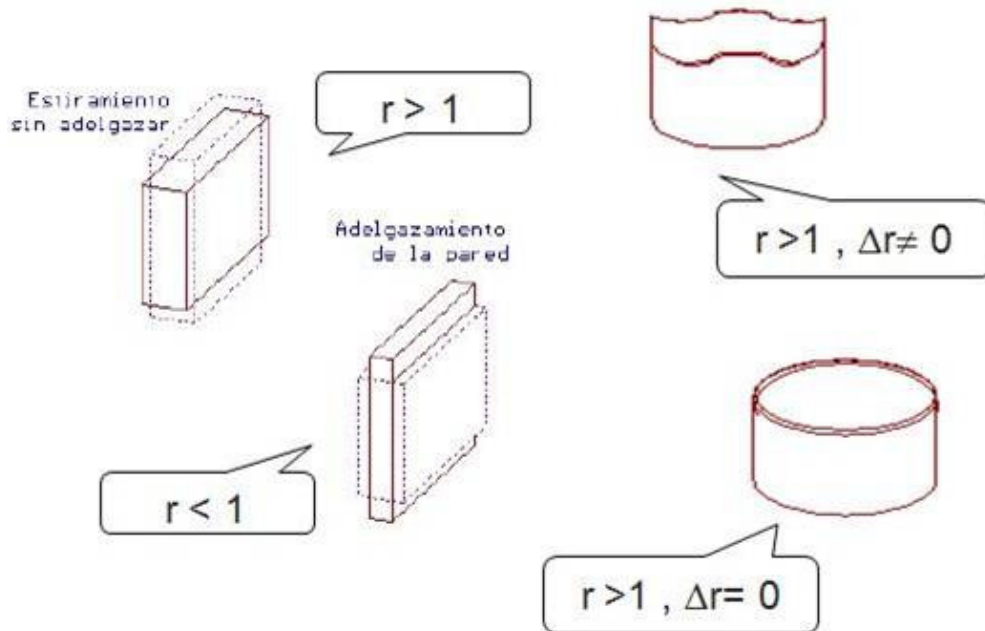
Tabla 9. Anisotropía acero SAE 1006 0.61 mm

| Bobina | r^{20}_0 | r^{20}_{45} | r^{20}_{90} | r^{20}_m | Δr |
|--------|------------|---------------|---------------|-------------|-------------|
| 11178 | 1,98 | 1,42 | 1,96 | 1,70 | 0,55 |
| 11195 | 1,82 | 1,44 | 2,20 | 1,73 | 0,57 |
| 11196 | 1,91 | 1,37 | 2,04 | 1,68 | 0,60 |
| 11204 | 1,32 | 1,14 | 1,67 | 1,32 | 0,36 |

Los resultados obtenidos a partir de la determinación de los parámetros de anisotropía del material, es decir anisotropía normal (r^{20}_m) y anisotropía planar(Δr), es posible indicar lo siguiente:

Como se muestra en la figura 34, cuando r es mayor que 1 el material se estirará mucho más que lo que reducirá su espesor, por lo tanto el material podrá fluir en una matriz de embutido sin excesivo adelgazamiento. Si r es menor que 1, lo que ocurrirá es el material se adelgazará más que lo que estirará, lo cual puede dar lugar al desgarre cuando el material esta siendo embutido.

Figura 34. Análisis de la anisotropía en copas embutidas



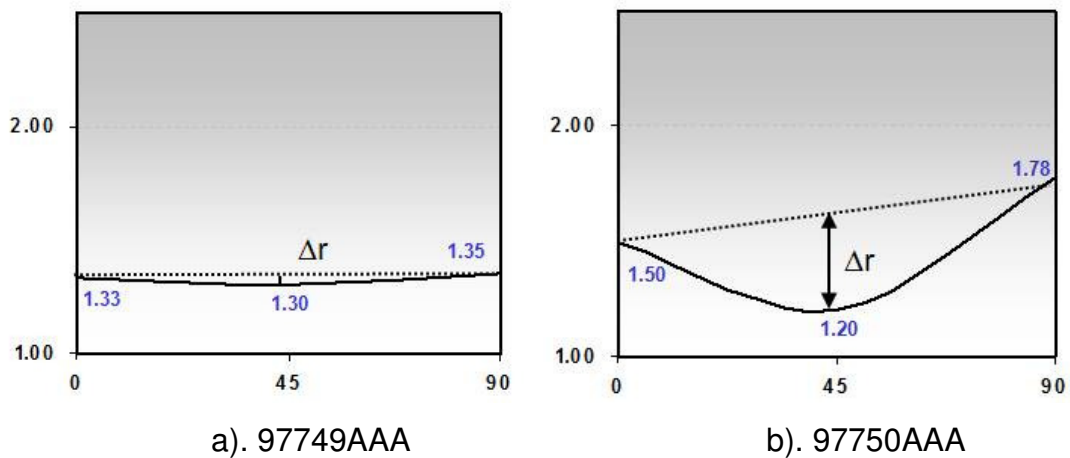
Es por esta razón que se prefieren para aplicaciones de embutición profunda materiales con alto valor de r , y el Δr lo más cercano a cero.

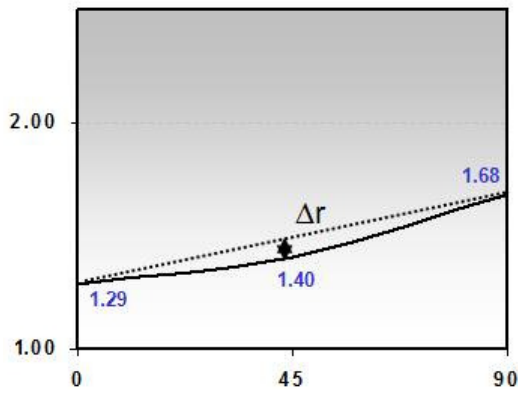
Con base en el análisis anterior es posible indicar que el acero IF en estado recocido y templado presenta valores más altos de anisotropía normal con respecto al material que se comercializa nacionalmente para fines de embutición profunda.

Además se observa que al comparar la tendencia a formar orejas, es decir la anisotropía planar del material del acero IF con el SAE 1006 es mayor en este último. A su vez, comparando el acero IF en sus etapas, vemos que en estado recocido (AAA) el material posee menor tendencia al orejamiento, que el acero cuando ya ha sido templado (AAAA).

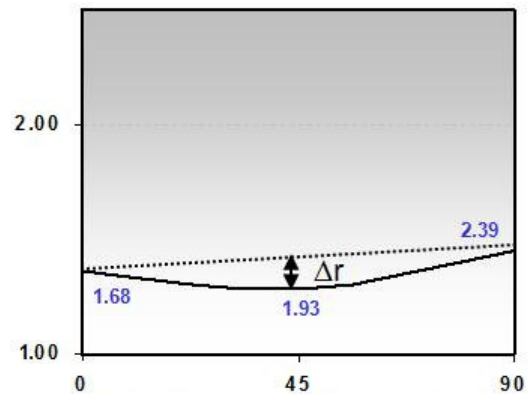
Para fines de análisis, y realizar predicciones teóricas, se determinó la orientación de las orejas presentes en operaciones de embutido de copas, la cual es posible definirla al graficar el Angulo entre la dirección de ensayo y la dirección de laminación ($^\circ$) vs el coeficiente de anisotropía (r) tal como se muestra en las figuras 35, 36, 37, 38.

Figura 35. Angulo entre la dirección de ensayo y la dirección de laminación ($^\circ$) vs el coeficiente de anisotropía (r) para Acero IF estado recocido



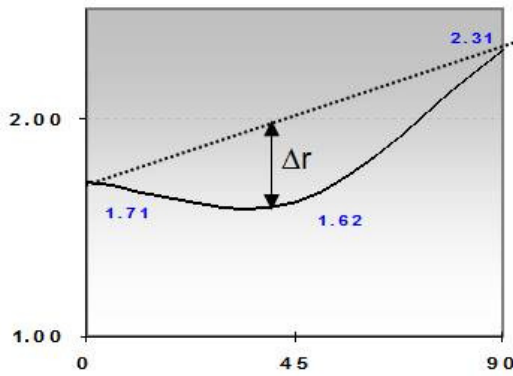


c). 97751AAA

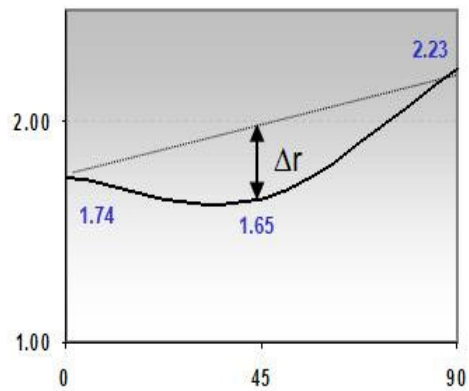


d). 97752AAA

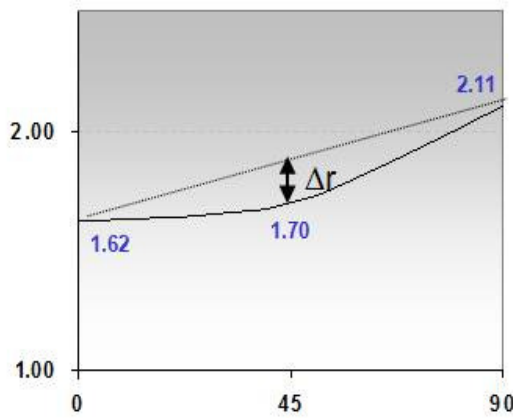
Figura 36. Angulo entre la dirección de ensayo y la dirección de laminación (°) vs el coeficiente de anisotropía (r) para Acero IF estado templado



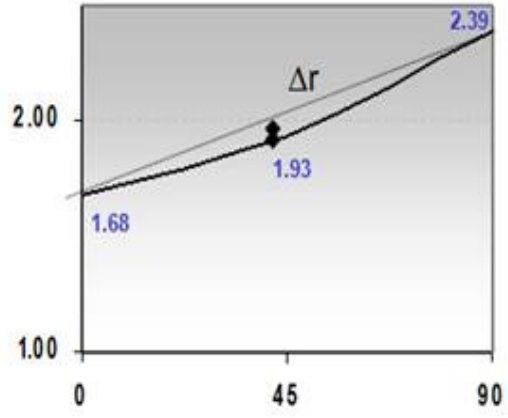
a). 97749AAAA



b). 97750AAAA



c). 97751AAAA



d). 97752AAAA

Figura 37. Angulo entre la dirección de ensayo y la dirección de laminación (°) vs el coeficiente de anisotropía (r) para SAE 1006 , espesor 0.46 mm

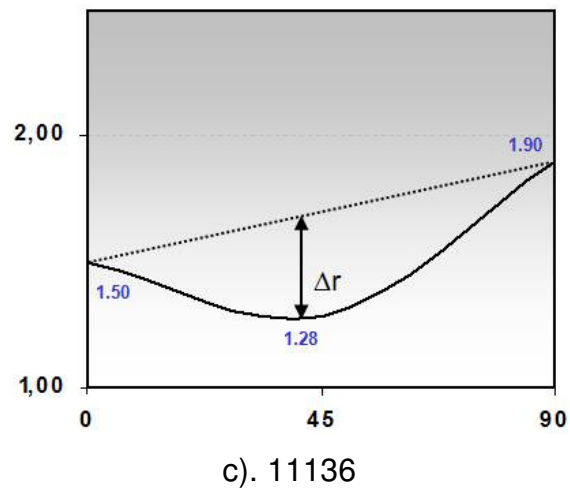
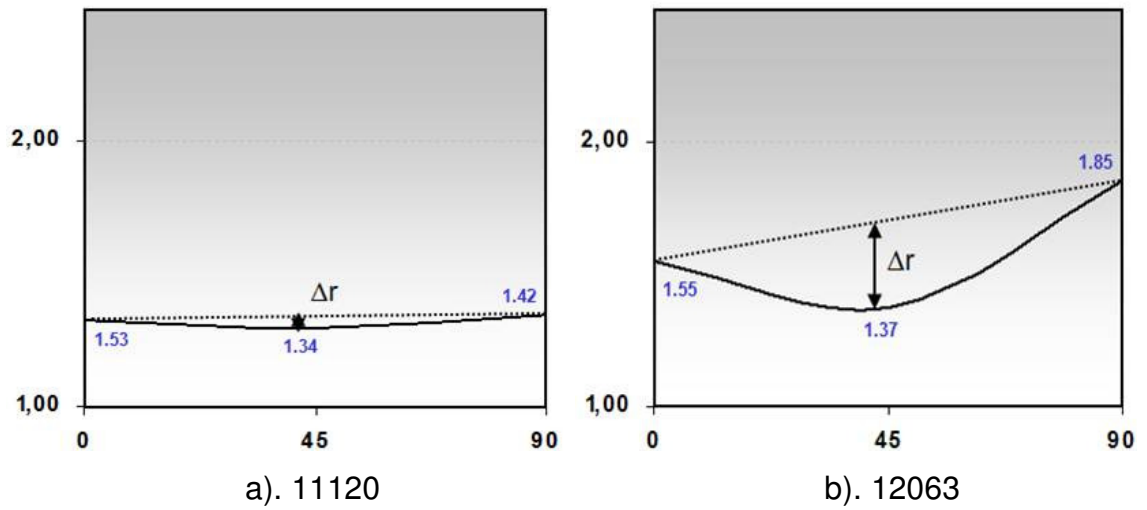
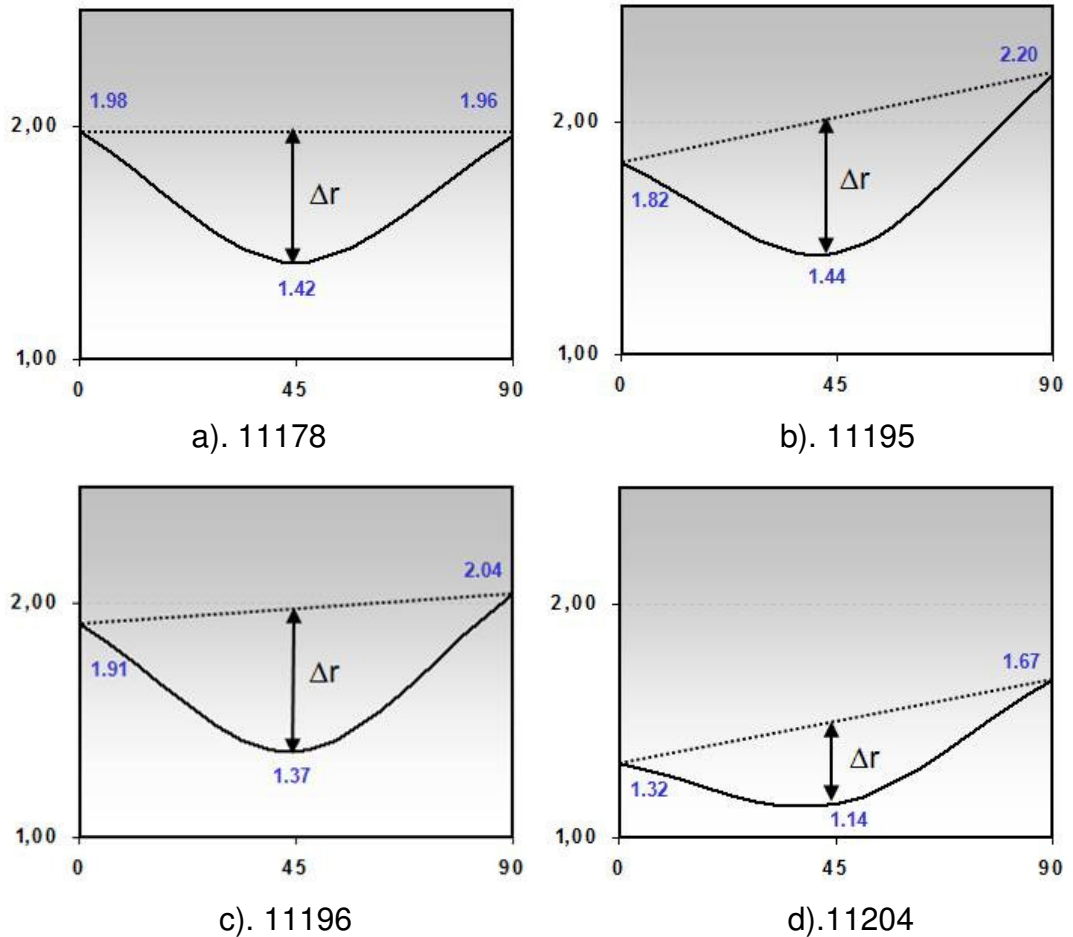


Figura 38. Angulo entre la dirección de ensayo y la dirección de laminación ($^{\circ}$) vs el coeficiente de anisotropía (r) para SAE 1006 , espesor 0.61 mm



En general, como se observa en las figuras 35, 36, 37 y 38 todas las láminas de acero caracterizado incluyendo tanto el IF como SAE 1006, presenta una tendencia a formar orejas en operaciones de copado, en las direcciones de 0 y 90° con respecto a la dirección de laminación. En algunos casos esta tendencia es menor, y se representa gráficamente como la altura desde el valor mas bajo para r hasta una línea que une los valores más altos para r .

6.2 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE N

Como se mencionó en el marco teórico de este trabajo, el índice n o exponente de endurecimiento por deformación, se encuentra relacionado con la ductilidad del material, es por esta razón que los materiales que exhiben valores altos de índice n , tiene gran capacidad para ser formados mas que los de bajo valor. Sin embargo para conocer la capacidad de formabilidad de una lámina se deben tener en cuenta junto a este, otros parámetros.

Este índice fue calculado mediante el uso de la herramienta del software con el que cuenta la maquina universal de ensayos, y al mismo tiempo de forma manual, tal como se indica en la norma ASTM E 646. La diferencia que se observa entre ambos datos se atribuye errores incursionados al determinar de forma manual los valores a partir del grafico obtenido a partir del ensayo de tensión.

Tabla 10. Exponente de endurecimiento por deformación para acero IF ,0.60 mm

| Bobina | Índice n | | TS / YS |
|-----------|------------|----------|---------|
| | Manual | Software | |
| 97749AAA | 0,16 | 0,23 | 1,20 |
| 97749AAAA | 0,21 | 0,23 | 1,60 |
| 97750AAA | 0,20 | 0,23 | 1,24 |
| 97750AAAA | 0,20 | 0,21 | 1,47 |
| 97751AAA | 0,15 | 0,21 | 1,25 |
| 97751AAAA | 0,20 | 0,21 | 1,49 |
| 97752AAA | 0,17 | 0,24 | 1,18 |
| 97752AAAA | 0,19 | 0,21 | 1,48 |

Tabla 11. Exponente de endurecimiento por deformación para acero SAE 1006, 0.46 mm

| Bobina | Índice n | | TS / YS |
|--------|------------|----------|---------|
| | Manual | Software | |
| 11120 | 0,21 | 0,21 | 1,49 |
| 12063 | 0,21 | 0,21 | 1,52 |
| 11136 | 0,20 | 0,20 | 1,48 |

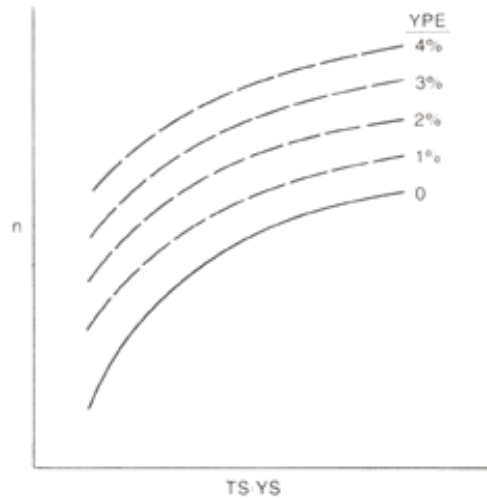
Tabla 12. Exponente de endurecimiento por deformación para acero SAE 1006, 0.61 mm

| Bobina | Índice n | | TS / YS |
|--------|------------|----------|---------|
| | Manual | Software | |
| 11178 | 0,22 | 0,21 | 1,55 |
| 11195 | 0,24 | 0,23 | 1,75 |
| 11196 | 0,24 | 0,23 | 1,70 |
| 11204 | 0,23 | 0,23 | 1,65 |

Al comparar los resultados de este ensayo no se observan diferencias significativas entre el acero IF y el SAE 1006, para fines de embutición, ya que en ambos los valores son altos, y en su mayoría se encuentran en el rango que especifica la norma ASTM A 1008, para la calidad de embutición profunda.

De los resultados obtenidos, se encuentran relaciones teóricas de estos valores (figura 39), para materiales que no exhiban elongación del punto de fluencia ($YPE=0$), donde al aumentar la relación existente entre la resistencia máxima y el punto de fluencia (TS/YS), aumenta el valor del índice n . Dicho comportamiento es verificable con los datos obtenidos, registrados en las tablas anteriores.

Figura 39. Relación teórica existente el índice n y la relación TS /YS (Tensile Strength/ Yield Strength)



<http://www.a-sp.org/database/viewsec.asp?sec=246>

6.3 DETERMINACIÓN PROPIEDADES MECÁNICAS

Tabla 13. Propiedades mecánicas acero IF.

| Bobina | Dimensiones (mm) | Resistencia máx.(MPa) | Fluencia (MPa) | Elongación (%) | TS / YP | Palier |
|-----------|------------------|-----------------------|----------------|----------------|---------|--------|
| 97749AA | 0,61 x 1220 | 679 | 679 | 0 | 1,00 | NO |
| 97750AA | 0,61 x 1220 | 647 | 647 | 0 | 1,00 | NO |
| 97751AA | 0,61 x 1220 | 646 | 646 | 0 | 1,00 | NO |
| 97752AA | 0,61 x 1220 | 673 | 673 | 0 | 1,00 | NO |
| 97749AAA | 0,61 x 1220 | 311 | 260 | 39 | 1,20 | SI |
| 97750AAA | 0,61 x 1220 | 320 | 258 | 40,2 | 1,24 | SI |
| 97751AAA | 0,61 x 1220 | 326 | 260 | 28,0 | 1,25 | SI |
| 97752AAA | 0,61 x 1220 | 338 | 286 | 37,8 | 1,18 | SI |
| 97749AAAA | 0,60 x 1220 | 297 | 186 | 43,2 | 1,60 | NO |
| 97750AAAA | 0,60 x 1220 | 296 | 202 | 45,0 | 1,47 | NO |
| 97751AAAA | 0,60 x 1220 | 297 | 200 | 38,8 | 1,49 | NO |
| 97752AAAA | 0,60 x 1220 | 300 | 203 | 37,4 | 1,48 | NO |

Tabla 14. Propiedades mecánicas acero SAE 1006. DDQ, espesor 0.46 mm

| Bobina | Dimensiones (mm) | Resistencia máx.(MPa) | Fluencia (MPa) | Elongación (%) | TS / YP | Palier |
|--------|------------------|-----------------------|----------------|----------------|---------|--------|
| 11120 | 0.46 x 1220 | 338 | 227 | 30,0 | 1,49 | NO |
| 12063 | 0.46 x 1220 | 317 | 209 | 34,0 | 1,52 | NO |
| 11136 | 0.46 x 1220 | 316 | 213 | 39,8 | 1,48 | NO |

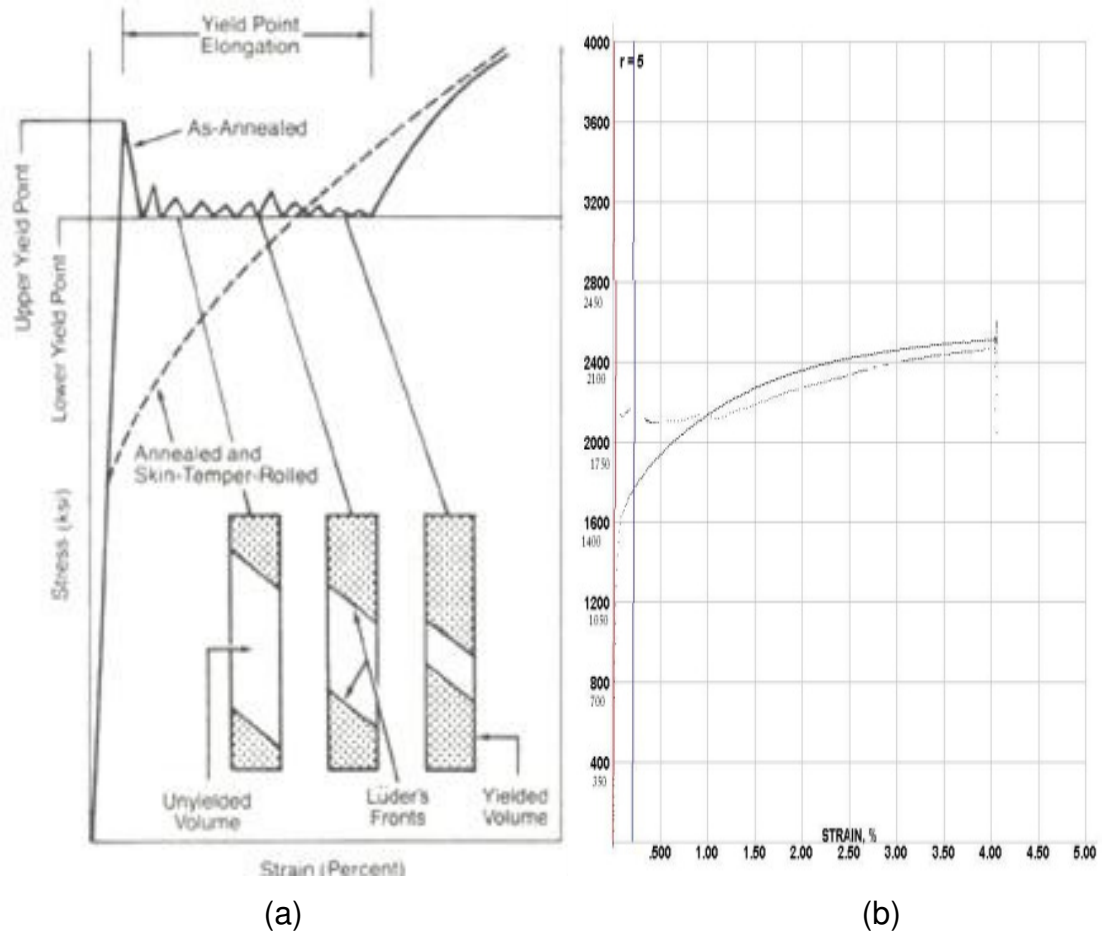
Tabla 15. Propiedades mecánicas acero SAE 1006. DDQ, espesor 0,61 mm

| Bobina | Dimensiones (mm) | Resistencia máx.(MPa) | Fluencia (MPa) | Elongación (%) | TS / YP | Palier |
|--------|------------------|-----------------------|----------------|----------------|---------|--------|
| 11178 | 0.61 x 1220 | 293 | 189 | 44,0 | 1,55 | NO |
| 11195 | 0.61 x 1220 | 301 | 172 | 41,4 | 1,75 | NO |
| 11196 | 0.61 x 1220 | 307 | 181 | 45,4 | 1,70 | NO |
| 11204 | 0.61 x 1220 | 313 | 190 | 40,8 | 1,65 | SI |

Las propiedades mecánicas determinadas a partir del ensayo de tensión (especificado en la norma ASTM E 8M) para el acero IF(tabla 13), evidencian el comportamiento mencionado en la teoría, donde se dice que el producto de la laminación en frío es el aumento de la dureza, limite de fluencia y resistencia máxima, mientras que el % de elongación disminuye. A su vez como producto del recocido, el material recupera las propiedades perdidas.

También se observa, como la eliminación del punto de fluencia de la lámina recocida, afecta significativamente estos resultados. Esto se debe a la existencia de la zona de elongación del punto de fluencia (YPE, Yield Point Elongation), la cual resulta en una deformación no homogénea durante la embutición o conformado de la lámina.

Figura 40. Elongación del punto de fluencia. a) Relación entre las bandas de Lüder para aceros con elongación del punto de fluencia, comportamiento teórico. b) Comportamiento real bobina.



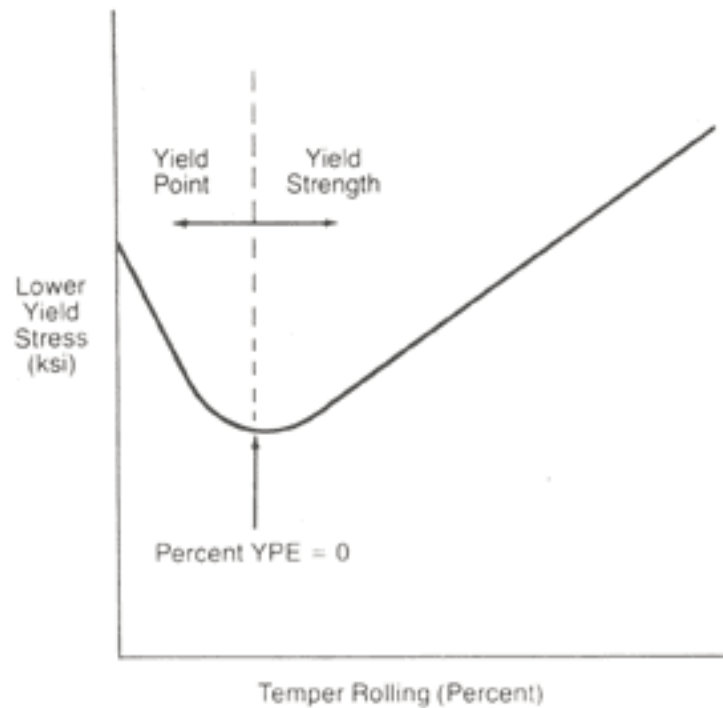
<http://www.a-sp.org/database/viewsec.asp?sec=246>

Por lo anterior, lo usual es practicar al acero recocido, una pequeña reducción en frío, es decir un laminado de temple.

Es necesario destacar, que si el porcentaje de laminado de temple sobrepasa el valor para el cual YPE es igual a cero (figura 41), las propiedades mecánicas finales del acero serán muy diferentes a las esperadas, es decir al eliminar la elongación del punto de fluencia lo que se espera es que la fluencia, disminuya y

con ella la resistencia máxima y la dureza mientras que el % de elongación aumente.

Figura 41. Eliminación de la elongación del punto de fluencia por laminado de temple.



<http://www.a-sp.org/database/viewsec.asp?sec=246>

6.4 COMPOSICIÓN QUÍMICA

El análisis de composición química se realizó en un espectrómetro de emisión óptica modelo DV-6 marca Baird.

Para obtener buenos resultados fue necesario pulir por ambas caras y para el análisis elegir una zona libre de porosidades, microgrietas, fisuras, polvo y grasa.

Los resultados del análisis de cada una de las muestras se encuentran reportados en las tablas 16, 17,18.

Tabla 16. Composición química acero IF. Porcentaje en peso (wt %)

| Bobina | C | N | Si | Mn | P | S | Al |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 97749 | 0,0015 | 0,0030 | 0,0050 | 0,1380 | 0,0090 | 0,0074 | 0,0260 |
| 97750 | 0,0011 | 0,0019 | 0,0050 | 0,1230 | 0,0120 | 0,0058 | 0,0370 |
| 97751 | 0,0011 | 0,0022 | 0,0070 | 0,1540 | 0,0120 | 0,0069 | 0,0360 |
| 97752 | 0,0011 | 0,0022 | 0,0070 | 0,1540 | 0,0120 | 0,0069 | 0,0360 |

| Mo | V | Nb | Ti | $12 > Ti/C+N > 15$ |
|--------|--------|--------|--------|--------------------|
| 0,0020 | 0,0000 | 0,0006 | 0,0380 | 8,444444444 |
| 0,0010 | 0,0010 | 0,0009 | 0,0380 | 12,66666667 |
| 0,0010 | 0,0010 | 0,0007 | 0,0380 | 11,51515152 |
| 0,0010 | 0,0010 | 0,0007 | 0,0380 | 11,51515152 |

Partiendo del hecho que los rollos de aceros cumplían o se acercaban a la siguiente relación $12 > Ti/C+N > 15$, se podía asegurar inmediatamente que los valores que se obtendrían para r , anisotropía plástica , estarían por encima de 1.8 requisito mínimo que satisface la calidad de embutición profunda.

Según fuentes de la literatura⁷ se aseguran que los valores de r_m para laminas trabajadas en frio y recocidas en campana, se incrementan dramáticamente con el aumento de la relación: $Ti/C+N$, cuando dicha relación se encuentra entre 12 y 15, se puede asegurar que el r_m estará por encima de 2.0 .

Tabla 17. Composición química acero SAE 1006, 0.46 mm. Porcentaje en peso (wt %)

| Bobina | C | Si | Mn | P | S | Al | Mo | V | Nb | Ti |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11120 | 0,060 | 0,010 | 0,160 | 0,007 | 0,004 | 0,031 | 0,002 | 0,001 | 0,001 | 0,000 |
| 12063 | 0,040 | 0,023 | 0,150 | 0,008 | 0,006 | 0,050 | - | - | - | 0,000 |
| 11136 | 0,040 | 0,016 | 0,180 | 0,007 | 0,004 | 0,047 | 0,002 | 0,001 | 0,002 | 0,000 |

Tabla 18. Composición química acero SAE 1006, 0.61 mm. Porcentaje en peso (wt %)

| Bobina | C | Si | Mn | P | S | Al | V | Nb | Ti |
|--------|------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11178 | 0,04 | 0,017 | 0,16 | 0,009 | 0,010 | 0,037 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 11195 | 0,05 | 0,014 | 0,17 | 0,007 | 0,007 | 0,050 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 11196 | 0,05 | 0,014 | 0,17 | 0,007 | 0,007 | 0,050 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |
| 11204 | 0,05 | 0,019 | 0,19 | 0,013 | 0,008 | 0,043 | 0,001 | 0,001 | 0,001 |

Al analizar la diversa composición química que poseen los aceros caracterizados, se corroboró el amplio rango que especifica la norma ASTM A 1008 para láminas con calidad de embutición profunda, de lo cual se puede asegurar que es un parámetro importante en la clasificación de la calidad, más no una camisa de fuerza.

6.5 ENSAYO ERICHSEN

Los resultados del ensayo de embutición Erichsen, encontrados de acuerdo al procedimiento seguido en la norma DIN 50101, por medio de la máquina Erichsen modelo 129 son reportados en las tablas 19,20 y 21, para lo cual se indica el índice Erichsen cuyo valor corresponde al desplazamiento del punzón logrado hasta la carga máxima, instante en que se presenta la primera grieta. Las probetas utilizadas para este ensayo son placas rectangulares de mínimo 70x70 mm.

Tabla 19. Resumen del ensayo Erichsen Acero "IF" 0.60 mm

| Bobina | Índice Erichsen (mm) | Carga máxima (KN) |
|-----------|----------------------|-------------------|
| 97749AA | 5,6 | ≈8.0 |
| 97750AA | 5,7 | ≈7,8 |
| 97751AA | 5,5 | ≈7,5 |
| 97752AA | 5,5 | ≈8,5 |
| 97749AAA | 9,4 | ≈9,5 |
| 97750AAA | 9,3 | ≈9,7 |
| 97751AAA | 9,2 | ≈9,8 |
| 97752AAA | 9,2 | ≈10,1 |
| 97749AAAA | 10,2 | ≈10,5 |
| 97750AAAA | 10 | ≈10,4 |
| 97751AAAA | 9,7 | ≈10,6 |
| 97752AAAA | 9,7 | ≈10,4 |

Tabla 20. Resumen del ensayo Erichsen SAE 1006. 0.46 mm

| Bobina | Índice Erichsen (mm) | Carga máxima (KN) |
|--------|----------------------|-------------------|
| 11120 | 9,6 | ≈ 8 |
| 12063 | 9,4 | ≈ 7.7 |
| 11136 | 9,6 | ≈ 7.8 |

Tabla 21. Resumen del ensayo Erichsen SAE 1006. 0.61 mm

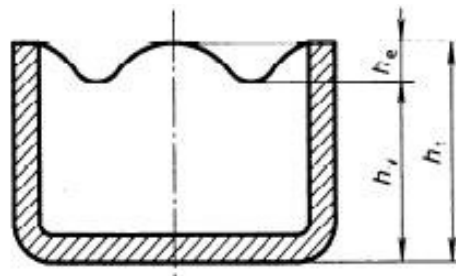
| Bobina | Índice Erichsen (mm) | Carga máxima (KN) |
|--------|----------------------|-------------------|
| 11178 | 9,9 | ≈10.8 |
| 11195 | 9,9 | ≈10.8 |
| 11196 | 9,7 | ≈10.9 |
| 11204 | 9,7 | ≈10.9 |

Como se mencionó en la metodología del trabajo, los resultados de este ensayo están ligados a la ductilidad del material en el plano de embutición bajo condiciones de esfuerzos biaxiales, razón por la cual es posible afirmar que el acero IF (ver tabla 19) es un poco más dúctil que el SAE 1006(ver tabla 21).

6.6 ENSAYO DE COPADO

Este ensayo fue llevado a cabo en la máquina Erichsen modelo 129, a partir de probetas de sección circular de diámetro igual a 70 mm, los resultados de este ensayo corresponden a valores de carga máxima soportada para formar la copa, sin embargo para fines de análisis, conforme la copa fue formada (Tabla 22, 23, 24) se determinó la altura de las orejas mediante el procedimiento especificado en la norma ISO 11531 “Earing test” ¹², aplicando las siguientes ecuaciones:

Figura 42. Ensayo de las orejas. Copa embutida



ISO 11531 ¹²

- Valor promedio de picos h_t y de valles h_v :

$$\bar{h}_t = \frac{h_{t1} + h_{t2} + h_{t3} + \dots}{\text{Numerodepicos}} \quad (8)$$

$$\bar{h}_v = \frac{h_{v1} + h_{v2} + h_{v3}}{\text{Numerodevalles}} \quad (9)$$

- Altura promedio de las orejas:

$$\bar{h}_e = \bar{h}_t - \bar{h}_v \quad (10)$$

- Máxima altura de las orejas:

$$h_{e,\max} = h_{t,\max} - h_{v,\min} \quad (11)$$

- Altura de la oreja, expresada como porcentaje:

$$Z = \frac{\bar{h}_e}{h_v} \times 100 \quad (12)$$

Tabla 22. Ensayo de copado Acero IF. 0.60 mm

| Bobina | Carga Máxima (KN) | h_t (mm) | h_v (mm) | h_e (mm) | $h_{t, \max}$ (mm) | $h_{v, \min}$ (mm) | $h_{e, \max}$ (mm) | Z (%) |
|-----------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 97749AAA | 20 | 31,30 | 30,64 | 0,67 | 31,54 | 30,28 | 1,26 | 2,18 |
| 97750AAA | 21 | 30,99 | 29,98 | 1,01 | 31,19 | 29,55 | 1,64 | 3,36 |
| 97751AAA | 20 | 31,71 | 30,82 | 0,90 | 32,24 | 30,3 | 1,94 | 2,90 |
| 97752AAA | 21 | 30,79 | 30,49 | 0,30 | 31,12 | 30,02 | 1,10 | 0,98 |
| 97749AAAA | 20 | 32,06 | 30,69 | 1,37 | 33,02 | 30,47 | 2,55 | 4,46 |
| 97750AAAA | 20 | 31,96 | 30,53 | 1,43 | 33,03 | 30,24 | 2,79 | 4,68 |
| 97751AAAA | 20 | 31,83 | 30,52 | 1,31 | 32,84 | 30,04 | 2,80 | 4,28 |
| 97752AAAA | 20 | 31,79 | 30,60 | 1,19 | 32,83 | 30,04 | 2,79 | 3,89 |

Tabla 23. Ensayo de copado Acero SAE 1006. 0.46mm

| Bobina | Carga Máxima (KN) | h_t (mm) | h_v (mm) | h_e (mm) | $h_{t, \max}$ (mm) | $h_{v, \min}$ (mm) | $h_{e, \max}$ (mm) | Z (%) |
|--------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 11120 | 16 | 30,54 | 29,53 | 1,02 | 31,15 | 28,94 | 2,21 | 3,45 |
| 12063 | 15 | 30,74 | 29,57 | 1,17 | 31,10 | 29,17 | 1,93 | 3,96 |
| 11136 | 15 | 30,79 | 30,07 | 0,72 | 31,00 | 29,87 | 1,13 | 2,39 |

Tabla 24. Ensayo de copado Acero SAE 1006. 0.61 mm

| Bobina | Carga Máxima (KN) | h_t (mm) | h_v (mm) | h_e (mm) | $h_{t, \max}$ (mm) | $h_{v, \min}$ (mm) | $h_{e, \max}$ (mm) | Z (%) |
|--------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-------|
| 11178 | 21 | 32,24 | 30,62 | 1,62 | 32,84 | 29,93 | 2,91 | 5,28 |
| 11195 | 21 | 31,70 | 29,85 | 1,86 | 31,97 | 29,61 | 2,36 | 6,21 |
| 11196 | 21 | 32,29 | 30,20 | 2,10 | 32,67 | 29,88 | 2,79 | 6,94 |
| 11204 | 22 | 32,34 | 30,93 | 1,40 | 32,75 | 30,39 | 2,36 | 4,53 |

Del ensayo de copado se obtuvo un registro fotográfico el cual se muestra a continuación en las figuras 43, 44, 45 y 46, en las cuales se hace evidente los valores obtenidos para la altura de las orejas, además de comprobar los resultados gráficos obtenidos en las figuras 35, 36, 37 y 38, para lo cual se dijo que todo el material caracterizado presentaría orejas a 0 y 90 °.

Al comparar los valores de anisotropía normal y anisotropía planar obtenidos en las tablas mostradas para la determinación del índice r, se comprueba que:

El acero IF en estado recocido, el cual presenta valores más bajos de anisotropía normal, tiene la menor altura de orejas con respecto a los demás aceros caracterizados. Sin embargo, como se propuso en este trabajo el cual es desarrollar un acero con calidad de embutición profunda, los resultados que más deben interesar son los concernientes al producto final elaborado, es decir Acero IF en condición de templado (AAAA), para el cual se dice comparándolo con lo

valores obtenidos en la tabla 24, para el acero importado de espesor 0.61 mm, es superior el acero producido.

Este punto específico, es de gran interés para la industria de conformado de laminas por embutición profunda, puesto que a la hora de escoger entre el acero IF producido (ver tabla 22) y el SAE 1006 importado (ver tabla 24), el acero IF involucra menor cantidad de pérdidas de material, en cuento a que esta altura de las orejas, tiene que ser removida, de la pieza final embutida.

Figura 43. Copas embutidas usando acero IF 0.60 mm sin temple.



Figura 44. Copas embutidas usando acero IF 0.60 mm con temple.



Figura 45. Copas embutidas usando SAE 1006 0.46 mm



Figura 46. Copas embutidas usando SAE 1006 0.61 mm



6.7 ENSAYO DE ABOCARDADO

Este ensayo al igual que los anteriores ensayos de tipo simulativos, se realizó en la maquina Erichsen modelo 129, a partir de probeta circulares (discos) de diámetro igual a 70 mm con un agujero central de diámetro aproximado a 12 mm. Los resultados se registraron, en las tablas 25, 26 y 27.

Tabla 25. Resumen ensayo de abocardado para Acero IF. Espesor: 0.60 mm

| Bobina | Do (mm) | Max. Drawing Force (KN) | Df (mm) | λ |
|-----------|---------|-------------------------|---------|-----------|
| 97749AAA | 12,18 | 18,00 | 23,06 | 0,89 |
| 97750AAA | 12,06 | 18,50 | 23,19 | 0,92 |
| 97751AAA | 12,18 | 17,80 | 23,42 | 0,92 |
| 97752AAA | 12,04 | 19,50 | 23,71 | 0,97 |
| 97749AAAA | 12,30 | 18,00 | 26,88 | 1,19 |
| 97750AAAA | 12,38 | 18,00 | 25,96 | 1,10 |
| 97751AAAA | 12,22 | 19,00 | 26,26 | 1,15 |
| 97752AAAA | 12,23 | 16,00 | 29,20 | 1,39 |

Tabla 26. Resumen ensayo de abocardado para Acero SAE 1006. Espesor: 0.46 mm

| Bobina | Do (mm) | Max. Drawing Force (KN) | Df (mm) | λ |
|--------|---------|-------------------------|---------|-----------|
| 11120 | 12,10 | 14,00 | 22,40 | 0,85 |
| 11136 | 12,12 | 14,00 | 23,44 | 0,93 |
| 12063 | 12,10 | 14,00 | 24,62 | 1,03 |

Tabla 27. Resumen ensayo de abocardado para Acero SAE 1006. Espesor: 0.61mm

| Bobina | Do (mm) | Max. Drawing Force (KN) | Df (mm) | λ |
|--------|---------|-------------------------|---------|-----------|
| 11178 | 12,08 | 19,00 | 27,27 | 1,26 |
| 11195 | 12,28 | 18,00 | 26,80 | 1,18 |
| 11196 | 12,23 | 18,00 | 27,10 | 1,22 |
| 11204 | 12,10 | 19,50 | 26,67 | 1,20 |

Los resultados obtenidos en las tablas, difícilmente pueden ser comparados con los otros tipos de ensayos simulativos, para el mismo material, por ejemplo puesto que mientras en el ensayo Erichsen el material sufre un estirado uniforme, experimentando un alargamiento proporcional y uniforme en toda la superficie del casquete esférico, en este ensayo el alargamiento disminuye conforme se acerca a la región del material fijado por el prensachapas.

6.8 ENSAYO DE DUREZA

Se realizaron mediciones de dureza a las laminas caracterizadas mediante el uso del durómetro Wilson Rockwell modelo 643T, cuyos resultados se muestran en las tablas 28, 29 y 30.

Tabla 28. Valores de dureza para lámina de acero IF.

| Bobina | Dureza (HRB) |
|-----------|--------------|
| 97749AA | 86 |
| 97750AA | 82,4 |
| 97751AA | 84,5 |
| 97752AA | 87,9 |
| 97749AAA | 44,3 |
| 97750AAA | 44,2 |
| 97751AAA | 45,1 |
| 97752AAA | 45,5 |
| 97749AAAA | 31,1 |
| 97750AAAA | 32,4 |
| 97751AAAA | 36,6 |
| 97752AAAA | 36,5 |

Los valores de dureza registrados en la tabla 28, para el acero IF en condición de laminación en frío, recocido y templado, muestran la relación que tiene la dureza del material con su límite de fluencia, al comportarse de la misma forma que su punto fluencia a través del paso por cada una de las etapas de transformación que sufre. (Tabla 13)

Tabla 29. Valores de dureza para lámina de acero SAE 1006, espesor 0.46 mm

| Bobina | Dureza (HRB) |
|--------|--------------|
| 11120 | 40,1 |
| 12063 | 38,4 |
| 11136 | 38,1 |

Tabla 30. Valores de dureza para lámina de acero SAE 1006, espesor 0.61mm

| Bobina | Dureza (HRB) |
|--------|--------------|
| 11178 | 32,5 |
| 11195 | 31,7 |
| 11196 | 33,4 |
| 11204 | 31,4 |

6.9 DETERMINACIÓN DE LA RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE DE LA LÁMINA

La determinación de la rugosidad se realizó mediante el uso del medidor de rugosidad de superficie TR100, los resultados de ésta medida se encuentran reportados en las tablas 31, 32 y 33.

Tabla 31. Rugosidad superficial, Ra. Acero "IF" 0.60 mm

| Estado | No Bobina | Rugosidad (µm) | No de picos |
|--|-----------|----------------|-------------|
| LC (Lamina en caliente) | 97749A | 1,27 | 161,43 |
| | 97750A | 1,41 | 190,69 |
| | 97751A | 1,23 | 153,07 |
| | 97752A | 1,18 | 142,62 |
| RFS (decapado, laminado en frío, recocido y templado) | 97749AAAA | 0,49 | -1,59 |
| | 97750AAAA | 0,49 | -1,59 |
| | 97751AAAA | 0,71 | 44,39 |
| | 97752AAAA | 0,88 | 79,92 |

Tabla 32. Rugosidad superficial, Ra . Acero SAE 1006. 0.46 mm

| Bobina | Rugosidad (mm) | No de picos |
|--------|----------------|-------------|
| 11120 | 1,31 | 169,79 |
| 12063 | 1,1 | 125,9 |
| 11136 | 0,64 | 29,76 |

Tabla 33. Rugosidad superficial, Ra . Acero SAE 1006. 0.61 mm

| Bobina | Rugosidad (μm) | No de picos |
|--------|-----------------------------|-------------|
| 11178 | 0,96 | 96,64 |
| 11195 | 1,03 | 111,27 |
| 11196 | 1,09 | 123,81 |
| 11204 | 0,95 | 94,55 |

El análisis de los resultados mostrados en las tablas 31, 32 y 33, indica que la rugosidad de la lamina de acero IF (tabla 31) en estado RFS debe ser mejorada, ya que para fines de embutición los intervalos de rugosidad de la chapa se sitúan entre 1.0 y 1.7 micras y una densidad del picos del orden de 120 a 250 picos por pulgada. Generalmente se recomienda que $\text{No de picos} \geq 209 \cdot \text{Ra} - 104$. Al trabajar con láminas de alta densidad de pico en operaciones de embutición se reducen los riesgos de gripado, al cumplirse lo anterior; con relativamente poca presión quedan deformadas las puntas de los picos formando densas áreas de contacto, bien lubricadas y refrigeradas, lo cual beneficiaría directamente a la industria que realiza la operación de embutición reduciendo las perdidas de material, o en su defecto disminuiría costos de lubricación. Pues como se sabe, para reducir la posibilidad de romper las fibras del material durante la operación de embutido es necesario una buena lubricación en las zonas de contacto o superficies de frotamiento de la estampa con la chapa.

A su vez comparando lo anterior con los resultados para el acero de calidad DDQ importado (Tabla 32 y 33), vemos que este parámetro tiene un mejor comportamiento comparado con el producido en este trabajo, es decir la mayoría de los valores registrados para este acero, se encuentran dentro del intervalo de rugosidad sugerido o muy cercano.

6. 10 ANÁLISIS METALOGRAFICO

Las siguientes micrografías (figuras 47, 48, 49, 50, 52 y 53) revelan las características microestructurales (tamaño de grano, forma y distribución de las fases que comprenden la aleación y de las inclusiones no metálicas, así como la presencia de segregaciones y otras heterogeneidades, entre otros) de los aceros caracterizados, incluyendo tanto el material de las pruebas como el material importado con calidad de embutición profunda.

La determinación del No de tamaño de grano ASTM promedio (G) mediante el método de comparación se realizó aplicando un factor de corrección especificado en la norma ASTM E112³ cuando el aumento de 100 no resultó satisfactorio, para el cual al tamaño de grano observado a diferente aumento se le adicionaba el factor de corrección.

$$Q = 6.64 \log_{10} \left(\frac{M}{M_b} \right)$$

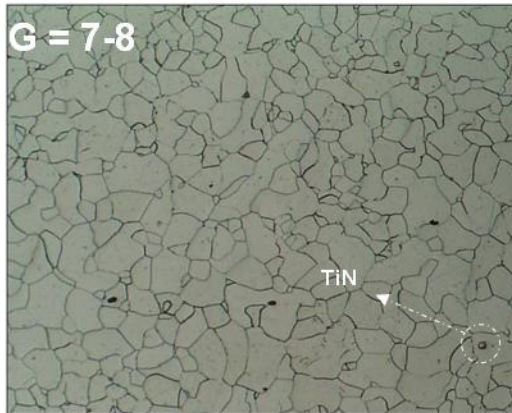
Donde: Q : factor de corrección
 M : Magnificación empleada
 M_b : Magnificación básica, 100X

De igual forma, es importante manifestar que el uso de métodos para determinar el tamaño de grano promedio no garantiza la exactitud de la medida; debido a

que una estructura metálica corresponde un agregado cristalino de tres dimensiones variando de forma y tamaño con estas.

6.10.1 Acero IF

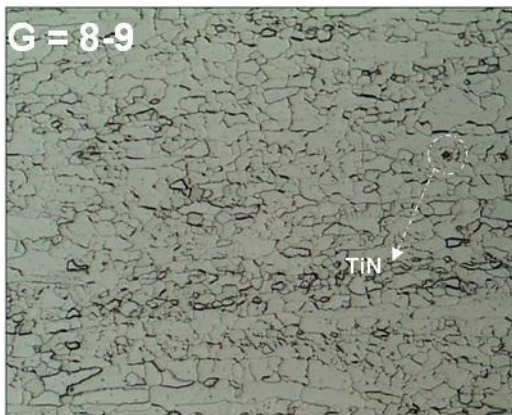
Figura 47. Micrografías Rollo 1: 97751



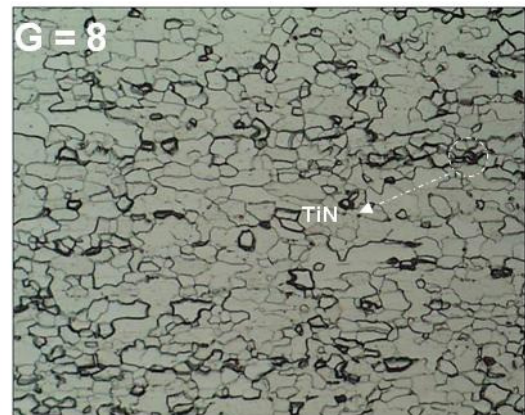
a). Laminado en caliente . Ataque Nital al 2% .200X



b). Laminado en frío 79.5 % reducción. Ataque Nital al 2% .200X

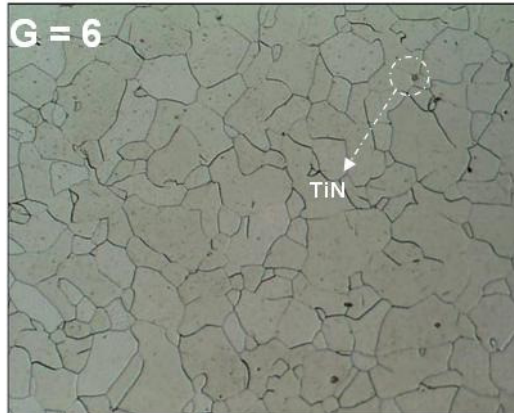


c). Lámina recocida . Ataque Nital al 2% .200X

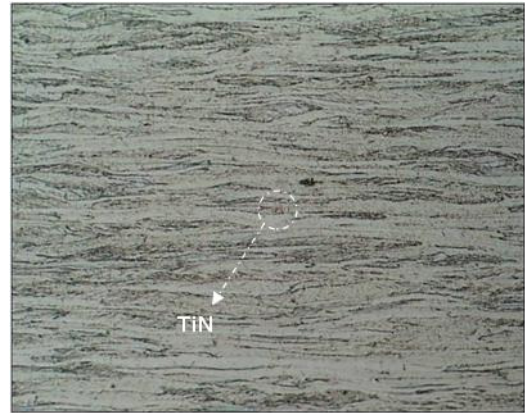


d). Lámina templada 2.44 % de temple. Ataque Nital al 2% .200X

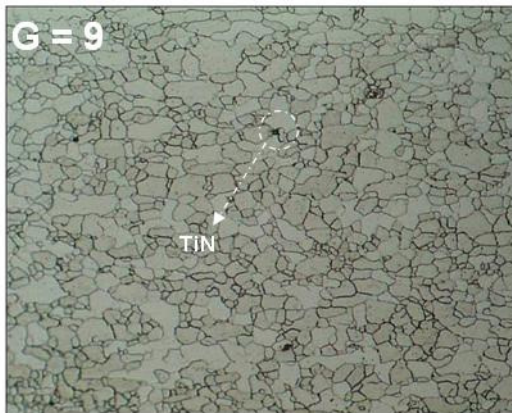
Figura 48. Micrografías Rollo 2: 97749



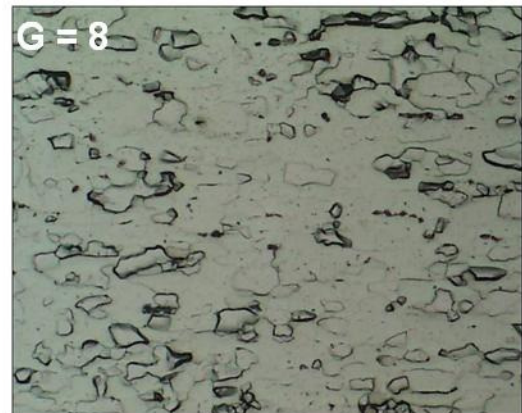
a). Laminado en caliente . Ataque Nital al 2% .200X



b). Laminado en frío 79.5 % reducción. Ataque Nital al 2% .200X

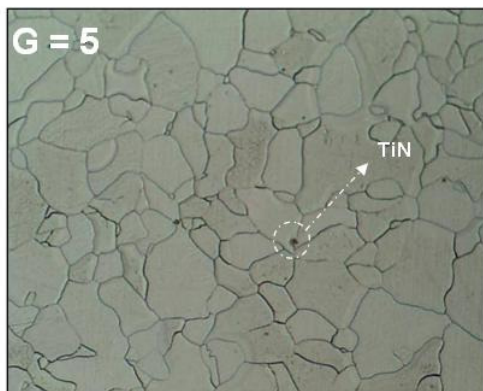


c). Lámina recocida . Ataque Nital al 2% .200X

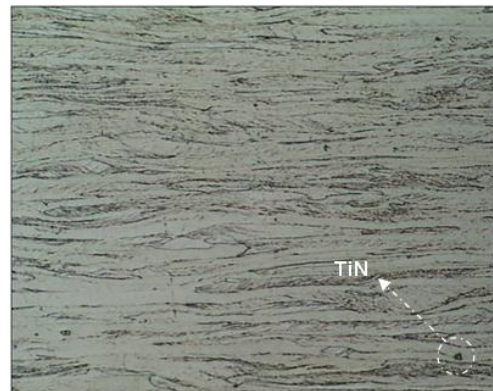


d). Lámina templada 2.44 % de temple. Ataque Nital al 2% .200X

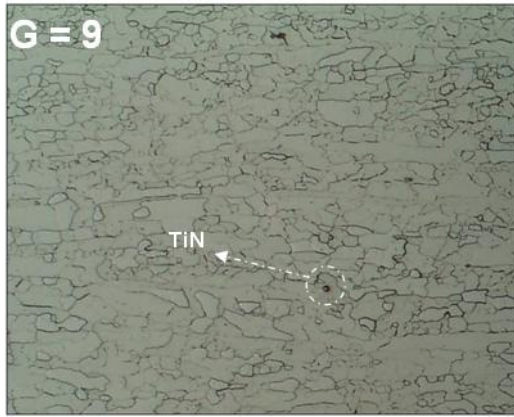
Figura 49. Micrografías Rollo 3: 97750



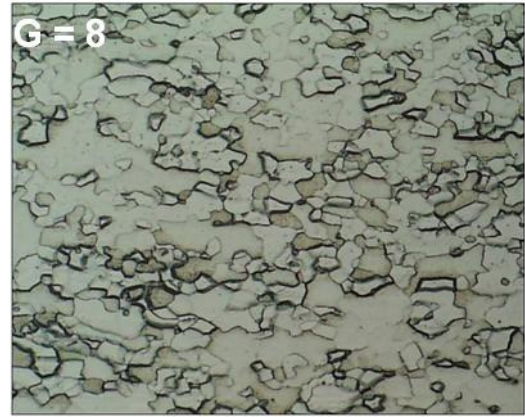
a). Laminado en caliente . Ataque Nital al 2% .200X



b). Laminado en frío 79.5 % reducción. Ataque Nital al 2% .200X

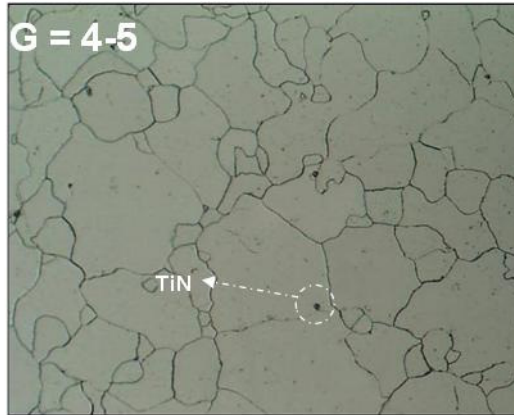


c). Lámina recocida . Ataque Nital al 2% .200X



d). Lámina templada 2.44 % de temple. Ataque Nital al 2% .200X

Figura 50. Micrografías Rollo 4: 97752



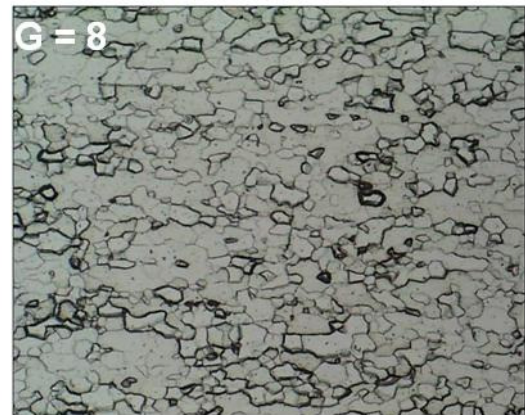
a).Laminado en caliente . Ataque Nital al 2% .200X



b). Laminado en frío 79.5 % reducción. Ataque Nital al 2% .200X



c). Lámina recocida . Ataque Nital al 2% .200X



d). Lámina templada 2.44 % de temple. Ataque Nital al 2% .200X

En general para el acero IF, se encontraron características microestructurales semejantes entre las bobinas que componían la prueba (figuras 47, 48, 49 y 50), donde principalmente se observa la presencia de una matriz ferrítica, esto debido a las pequeñas cantidades de carbono (10-15 ppm) que posee este acero, que de acuerdo al diagrama de equilibrio de fases de equilibrio Fe- Fe₃C (figura 51) para ese porcentaje de carbono la fase estable es la ferrita (α).

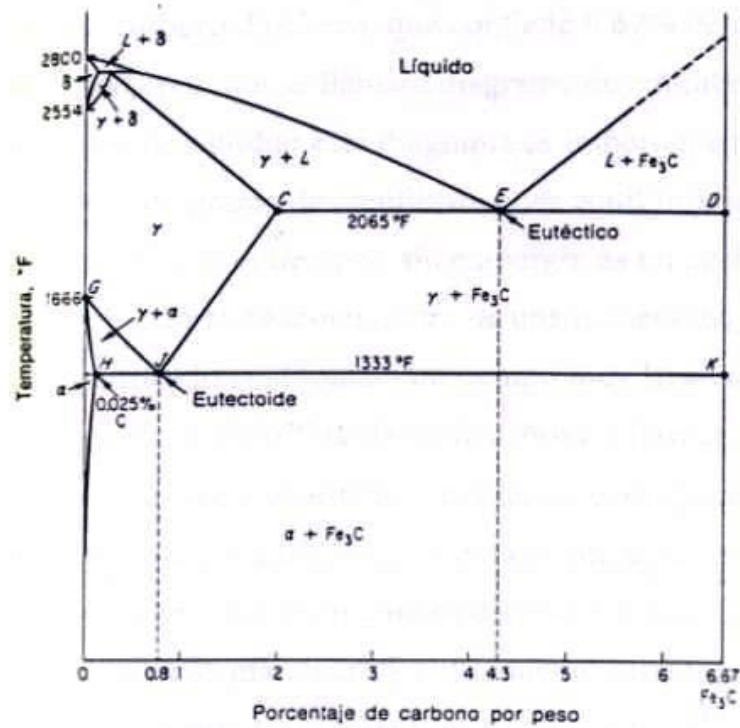
También se hace evidente en cada una de estas micrográficas, la presencia de cierto tipo de precipitados tanto en la matriz, como en los límites de grano, que al confrontarlos con la literatura, de acuerdo a sus características: color (dorado \rightarrow rojizo) y forma (rectangular) se presume que se tratan de nitruros de titanio.

Se observan en las figuras (47b, 48b, 49b y 50b), que para 79.5 % de reducción, estado laminado en frío, el grano es totalmente deformado, alargándose en la dirección de laminación.

Como resultado del tratamiento térmico de recocido al que fueron sometidas las bobinas luego de la laminación en frío, la estructura se observa totalmente recristalizada a un tamaño de grano menor que en el estado previo a la laminación (Laminado en caliente, $G \approx 4-6 \rightarrow$ Recocido, $G \approx 8-9$).

Finalmente, luego del laminado de temple se observa un ligero aumento en el tamaño de grano del material, unificando este valor para este acero en 8. Se asume por ser una microestructura recristalizada y de grano fino, gran resistencia y al mismo tiempo ductilidad impartida por el recocido.

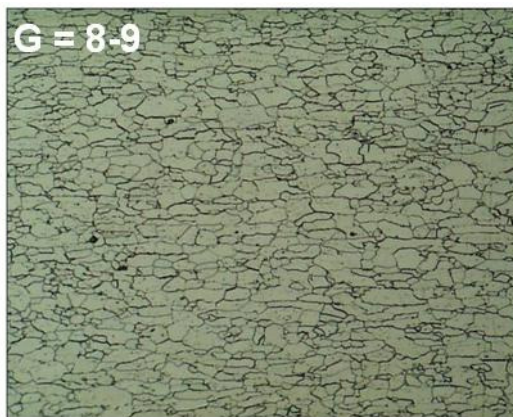
Figura 51. Diagrama de equilibrio de fases Fe- Fe₃C



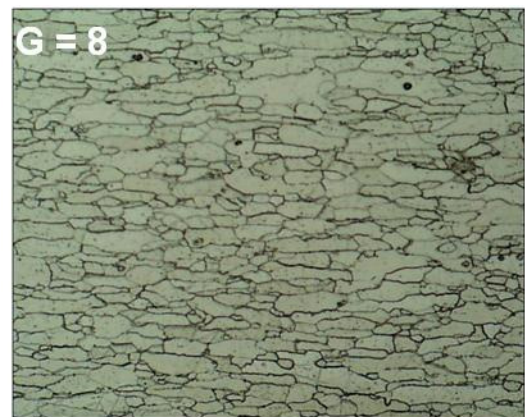
http://www.uam.es/docencia/labvformat/labvformat/practicas/practica4/fases%20del%20acero_archivos/image002.jpg

6.10.2 Acero importado calidad de embutición profunda

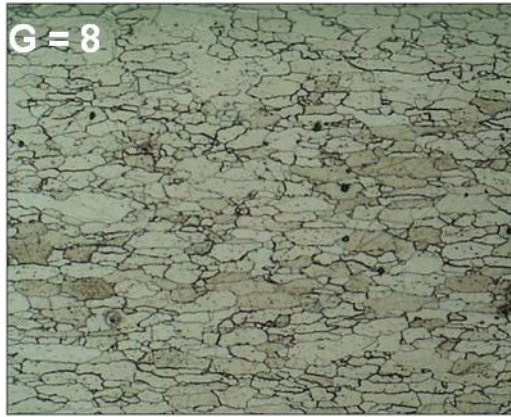
Figura 52. Micrografías AISI/SAE 1006, espesor: 0,46 mm



a). Bobina No. 11120. Ataque Nital 2%.200X



b). Bobina No. 11136. Ataque Nital 2%.200X

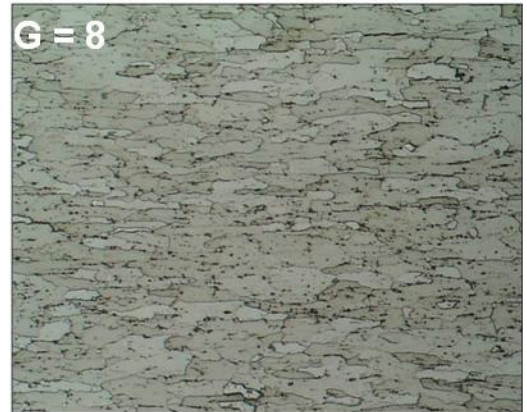


c). Bobina No. 12063. Ataque Nital 2%.200X

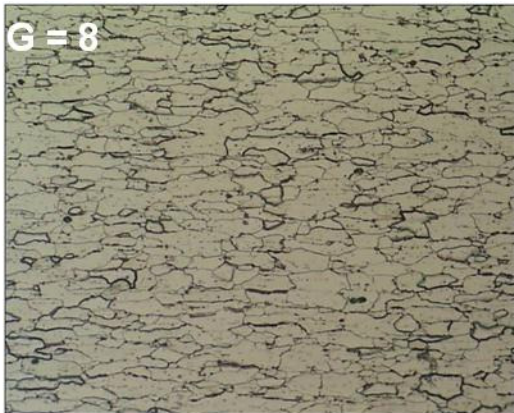
Figura 53. Micrografías AISI/SAE 1006, espesor: 0,61 mm



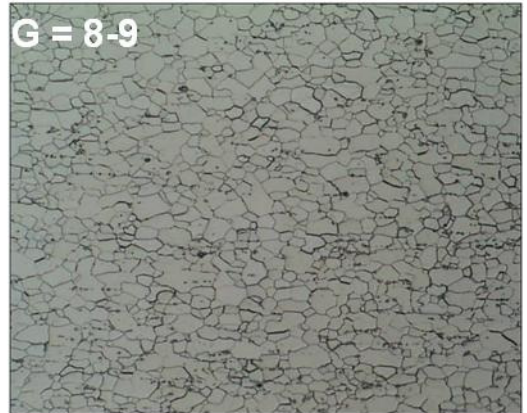
a). Bobina No. 11178. Ataque Nital 2%. 200X



b). Bobina No. 11195. Ataque Nital 2%. 200X



c). Bobina No. 11196. Ataque Nital 2%. 200X



d). Bobina No. 11204. Ataque Nital 2%. 200X

Las micrografías del acero AISI/SAE 1006 con calidad de embutición profunda, para los dos espesores caracterizados (Figuras 52 y 53), revelan una matriz ferrítica de granos alargados tipo “pancake”.

Según datos del proveedor y comprobado en este trabajo, este acero posee un tamaño de grano comprendido entre 8 y 9.

6.11 SEGUIMIENTO

La calidad del material desarrollado fue puesta a prueba, mediante una empresa dedicada a la manufactura de balastos, luminaria y productos para el sector eléctrico, la cual por medio de operaciones de embutición profunda forma cajas eléctricas. El comportamiento de este material ante la operación mencionada fue óptimo. Es decir la caja se formó por completo sin presentar defectos relevantes. (Información suministrada por el cliente).

7. CONCLUSIONES

- Según norma ASTM A 1008, “Standard Specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy and High-Strength Low-Alloy with Improved Formability”, la calidad final del producto terminado clasifica como un acero con calidad de embutición profunda, DDQ (Deep Drawing Quality).
- En los aceros SAE 1006, calmados al aluminio, se observa después del recocido una microestructura de grano alargado tipo pancake; cuya orientación preferencial es otorgada por la ubicación de los precipitados (AlN) durante la laminación en frío.
- Los aceros IF (libres de elementos intersticiales) bajo estudio, presentaron matriz ferrítica con presencia de partículas de TiN, en todas las condiciones de transformación (A, AA, AAA y AAAA).
- Para una temperatura de recocido de 690 °C con un ΔT de 10 °C, se obtuvo un número de tamaño de grano ASTM promedio, $G = 8$.
- La recristalización completa del material y homogeneidad del tamaño de grano se ve beneficiada por velocidades de calentamiento lentas.
- El tamaño de grano inicial de la lámina en caliente y su temperatura de enrollado no interviene en el tamaño de grano final de las muestras recocidas y templadas para los IF, únicamente esta variable se ve modificada por la temperatura de recocido.

- A medida que aumenta el valor absoluto de la anisotropía planar, aumenta la tendencia a la formación de orejas y a su vez la altura de estas. Este índice muestra el sentido en que el material adelgaza su espesor al deformarse, evidenciando menores valores de anisotropía normal.
- En los aceros calmados al aluminio caracterizados, el índice de anisotropía planar Δr es mayor con respecto al material libre de intersticios, esto se evidencia en la altura de orejas formadas durante el ensayo simulativo de copado.
- Se logra mayor anisotropía en aceros IF con índice r por encima de 1.8 a diferencia de los aceros calmados al aluminio caracterizados cuya calidad es DQ con índices r por debajo de 1.80
- El tamaño de grano de los aceros caracterizados, tanto los calmados como en los IF fue el mismo ($G: 8$), sin embargo sus propiedades anisotrópicas (n y r) no. Esto indica que la anisotropía no depende exclusivamente del TG.
- En la presente investigación se logró caracterizar el comportamiento mecánico de aceros con calidad de embutición profunda, observando las evidentes diferencias entre el material tratado en ACESCO y material importado que se comercializa a nivel nacional.
- El efecto del tratamiento térmico practicado a las bobinas de acero IF, fue positivo. Dicho análisis se basa en los resultados obtenidos de las variables de salida que determinan la calidad del material.

8. RECOMENDACIONES

- Luego de un extenso análisis de los resultados obtenidos para esta prueba, aunque haya sido positivo el balance del desarrollo de la calidad de embutición profunda a partir de un acero IF, deben confirmarse y establecerse las temperaturas de trabajo y tiempos de sostenimientos para rollos de diferentes espesores a los utilizados en las pruebas preliminares realizadas en ACESCO S.A., observando el efecto de la temperatura y el espesor de la lamina en la propiedades obtenidas, razón por la cual se recomienda realizar pruebas que contemplen el diseño mostrado en la tabla . Esto con el fin de estandarizar los procesos de obtención de material con calidad de embutición profunda, de acuerdo a las especificaciones de espesores demandados en el mercado.

Tabla 34. Diseño de experimentos recomendado

| Corridas | Temperatura Sostenimiento | Delta Temperatura | Tiempo de Sostenimiento | Variable de Salida | Endurecimiento Deformación | Fluencia Mpa | Resistencia Mpa | Elongación % |
|----------|---------------------------|-------------------|-------------------------|--------------------|----------------------------|--------------|-----------------|--------------|
| 1 | 700 | cte | cte | r | n | Yp | TS | % |
| 2 | 690 | cte | cte | r | n | Yp | TS | % |
| 3 | 680 | cte | cte | r | n | Yp | TS | % |
| 4 | 670 | cte | cte | r | n | Yp | TS | % |

Donde: Delta de temperatura entre el gas y el lugar más frío = 10 °C. El monitoreo se realizará con la termocupla central de la bobina en posición numero 2 de la base.

Tiempo de sostenimiento: 5 Horas, mínimo.

- La obtención de aceros con calidad de embutición profunda a partir de aceros AISI/SAE 1006 calmados al aluminio, es posible. Esto se comprueba con los resultados de la caracterización del acero importado y comercializado a nivel

- nacional, razón por la cual se recomienda realizar pruebas con este tipo de acero; que conduzcan a la obtención de la calidad DDQ. Con el fin de estar preparados para suministrar al mercado esta calidad en caso de ausencia de la materia prima con la cual se realizó este trabajo.
- Mejorar la rugosidad superficial de la lámina con calidad de embutición profunda, puesto que es un parámetro con el cual se compite en el mercado de láminas con esta calidad.

BIBLIOGRAFIA

- ALANIS, M., MENDOZA, R., ARÁMBURO, G. y JUÁREZ-ISLAS, J.A. Evaluación Microestructural y Mecánica de Aceros Libres de Elementos Intersticiales en la Condición de Recocido. ^[1]
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Specification for Steel, Sheet, Cold-Rolled, Carbon, Structural, High-Strength Low-Alloy and High-Strength Low-Alloy with Improved Formability. United States: ASTM, 2001. 7 p, .il. (ASTM A 1008) ^[2]
- _____. Standard test methods for determining average grain size. United States: ASTM, 1996. 25 p, .il. (ASTM E 112) ^[3]
- _____. Standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal. United States: ASTM, 1992. 6 p, .il. (ASTM E 517) ^[4]
- _____. Standard test method for tensile strain-hardening exponents (n-values) of metallic sheet materials. United States: ASTM, 1993. 7 p, .il. (ASTM E 646) ^[5]
- _____. Standard test methods for tensión testing of metallic materials. United States: ASTM, 1995. 20 p, il. (ASTM E 8M) ^[6]
- BANERJEE, Kumkum. Evaluation of Annealing Texture in IF and EDD Steel Sheets. En: Materials and Manufacturing Processes. Vol. 22 (2007); p. 462-468 ^[7]

- CHEN, Guang and GU, Mingyan. Simulation of Steel Coil Heat Transfer in a High Performance Hydrogen Furnace. En: Heat Transfer Engineering. Vol. 28, No. 1 (2007); p. 25-30^[8]
- DA SILVEIRA RIZZO, Ernandes Marcos. PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE LAMINADOS PLANOS DE AÇO: Introducción a la producción del acero. Curso ABM: 2006.^[9]
- DIETER, George. E. Mechanical Metallurgy. Londres. McGraw-Hill , 1988. 751 p.^[10]
- GARCIA, Claudio, CELENTANO, Diego y PONTHOT, Jean-Philippe. Caracterización del Comportamiento Mecánico de Aceros para Embutición Profunda. En: JORNADAS SAM/CONAMET/SIMPOSIO MATERIA. 2003. p. 294 -297.^[11]
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Metallic materials -- Earing test. United States: ISO, 1994. 4 p, .il. (ISO 11531)^[12]
- LAVERDE CATAÑO, Dionisio. Índices de Calidad de la Lámina en Frío. Barranquilla, Colombia: Acerías de Colombia S.A -ACESCO-, 1997. 37 p.^[13]
- LÓPEZ NAVARRO, Tomás. Troquelado y estampación. 2 ed. Barcelona: Gustavo Gili, 1958. p 121-183.^[14]
- ROSSI, Mario. Estampado en Frío de la Chapa. 8 ed. Barcelona, España: Científico-Médica, 1966. 567 p.^[15]

- SAHAY, Satyam S. and KUMAR, Arun M. Applications of Integrated Batch Annealing Furnace Simulator. En: Materials and Manufacturing Processes. Vol. 17, No. 4 (2002); p. 439-453^[16]
- SHI, Ling and CUI, Deli. On Optimizing Batch Annealing for the Production of IF Steels. En: Materials and Manufacturing Processes. Vol. 18, No. 1 (2003); p. 51–66^[17]
- STÜDEMAN, Hans. Ensayo de materiales y control de defectos en la industria del metal. Bilbao, España: Ediciones Urmo, 1968. p. 124-137, 210-214.^[18]
- TAKECHI, Hiroshi. Metallurgical Aspects on Interstitial Free Sheet steel from Industrial Viewpoints. En: ISIJ International. Vol. 34, No. 1 (1994); p. 1-8^[19]
- <http://www.symtek.com/WebSymtek/zona1/emisionoptica.php?pais=colombia>
- http://www.buehler.com/productinfo/mounting_presses/pdfs/simplimet2.pdf
- http://www.buehler.com/productinfo/grinder_polishers/pdfs/METASERV.pdf
- <http://www.a-sp.org/database/viewsec.asp?sec=246>
- <http://www.mailxmail.com/curso/vida/metalografia/capitulo2.htm>
- http://www.brushwellman.com/alloy/tech_lit/November-December%202005.pdf
- <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-333.pdf>