

**EFFECTO DE LA TEMPERATURA DEL PROCESO DE RECOCIDO EN  
CAMPANA SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO Y LAS PROPIEDADES  
MECANICAS DEL ACERO IF.**

**DIANA ISABEL MANTILLA RAMIREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUIMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES  
BUCARAMANGA  
2008**

**EFFECTO DE LA TEMPERATURA DEL PROCESO DE RECOCIDO EN  
CAMPANA SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO Y LAS PROPIEDADES  
MECANICAS DEL ACERO IF.**

**DIANA ISABEL MANTILLA RAMIREZ**

**Trabajo de grado realizado para optar al titulo de Ingeniero Metalúrgico**

**Director:**

**JAIRO ALFONSO GÓMEZ RODRÍGUEZ**

**Ingeniero Metalúrgico**

**Coordinador Gestión de Tecnología ACESCO**

**Tutor:**

**IVÁN URIBE PÉREZ**

**Ingeniero Metalúrgico M.Sc.**

**Director Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUIMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES**

**BUCARAMANGA**

**2008**

*A Dios por su bondad, por darme el regalo más preciado;*  
*A mi madre, por ser mi fuente de inspiración, por enseñarme a creer en mis sueños, que gracias a ella*  
*hoy se hacen realidad;*  
*A mis hermanos: Lina, Claudia, Sandra y Jorge, por su apoyo y por creer en mi;*  
*A mis sobrinitos, por darme tantos momentos de felicidad tan solo con una sonrisa;*  
*Y finalmente, a Mario Andrés: mi amor, por ser mi ángel de la guarda, por acompañarme y ser mi*  
*luz en el camino en momentos de oscuridad.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a la empresa Acerías de Colombia S.C.A. ACESCO, por darme la oportunidad de sentirme un miembro mas de su excelente equipo humano, y por creer en mis capacidades para desarrollar este trabajo de Grado.

Mil y mil gracias al Ingeniero Jairo Gómez, director del proyecto, por sus valiosos regaños q me enseñaron a ser cada día mejor, por ser mi ejemplo a seguir, y por compartir conmigo su experiencia y conocimientos en pro de mi formación profesional y personal.

A la Universidad Industrial de Santander, en especial a la Escuela de Ingeniería metalúrgica y Ciencia de Materiales, a sus profesores y técnicos quienes en su oportunidad jamás me negaron su ayuda, especialmente, al Director de la Escuela, el Ingeniero Iván Uribe, codirector del proyecto, por su constante apoyo en el desarrollo de la investigación, y al profesor Arnaldo Alonso, por sus innumerables palabras de aliento, en momentos de debilidad.

Gracias a mis amigos incondicionales, Jon Hernández, Julián Santos, Luis Alejandro Gómez, Yeinmy Morales, Biviana Ballesteros y Liliana Torres, por estar siempre ahí cuando los he necesitado para convertir los momentos difíciles en maravillosos e inolvidables.

En fin, a todas aquellas personas que estuvieron acompañándome a luchar por mis sueños.....a todos.....gracias.

## CONTENIDO

	pág.
<b>INTRODUCCION</b>	<b>14</b>
<b>1. OBJETIVOS</b>	<b>17</b>
<b>1.1 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>17</b>
<b>1.2 OBJETIVOS ESPECÌFICOS</b>	<b>17</b>
<b>2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>18</b>
<b>3. JUSTIFICACIÓN</b>	<b>20</b>
<b>4. MARCO TEÓRICO</b>	<b>22</b>
<b>4.1 MATERIA PRIMA: ACERO IF (INTERSTITIAL FREE STEEL)</b>	<b>22</b>
<b>4.1.1 Generalidades del Acero IF</b>	<b>22</b>
<b>4.2 APLICACIONES DEL ACERO IF</b>	<b>23</b>
<b>4.3 PRODUCCION DEL ACERO IF</b>	<b>24</b>
<b>4.4 PRIMERA ETAPA DE TRANSFORMACION PRELIMINAR DEL ACERO IF EN ACESCO</b>	<b>27</b>
<b>4.4.1 Proceso de Decapado Químico de la lámina en Caliente</b>	<b>27</b>
<b>4.4.2 Proceso de Reducción o laminación en frío</b>	<b>29</b>
<b>4.5 SEGUNDA ETAPA DE TRANSFORMACION DEL ACERO IF: TRATAMIENTO TERMICO DE RECOCIDO, TEMPLE (TEMPER ROLLING) Y EMBOBINADO</b>	<b>30</b>
<b>4.5.1 Recocido en Campana</b>	<b>30</b>
<b>4.5.2 Laminado de temple (Temper Rolling)</b>	<b>34</b>
<b>4.5.3 Embobinado, preparación del rollo y corte (Coil preparation and Shearing)</b>	<b>34</b>
<b>4.6 EFECTO DE LA LAMINACION Y EL RECOCIDO</b>	<b>34</b>
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>35</b>
<b>5.1 PRIMERA ETAPA: REVISION BIBLIOGRAFICA</b>	<b>36</b>
<b>5.2 SEGUNDA ETAPA: RECONOCIMIENTO DEL MATERIAL DISPONIBLE</b>	<b>36</b>

5.2.1 Revisión del inventario del Material Disponible	36
5.2.2 Revisión de la Composición Química	36
5.3 TERCERA ETAPA: SELECCIÓN DE VARIABLES DE EXPERIMENTOS	39
5.4 CUARTA ETAPA: EXPERIMENTO DE RECOCIDO	40
5.5 QUINTA ETAPA: TOMA DE MUESTRAS Y ENSAYOS MECANICOS PARA CARACTERIZACION DEL MATERIAL	43
5.5.1 Ensayo de Tensión (Norma ASTM E 8M)	44
5.5.2 Ensayo de Anisotropía (Norma ASTM E 517)	47
5.5.3 Ensayo de Coeficiente de Endurecimiento por Deformación (Norma ASTM E 646)	49
5.5.4 Ensayo de Dureza	50
5.5.5 Análisis Metalografico para determinación de tamaño de Grano (Norma ASTM E 112)	53
5.6 RECOPIACION DE DATOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	59
6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	60
6.1 ANALISIS DESCRIPTIVO DE LA COMPOSICION QUIMICA	60
6.2 PERFILES DE TEMPERATURA OBTENIDOS DE LOS PROCESOS DE RECOCIDO EN CAMPANA DEL MATERIAL IF	62
6.2.1 Primera Corrida: Espesores de 0,60 mm., 0,70 mm y 0,90 mm.	62
6.2.2 Segunda Corrida: Espesores de 0,60 mm.	63
6.2.3 Tercera Corrida: Espesores de 0,45 mm.	64
6.3 CARACTERIZACION MECANICA DEL ACERO IF RECOCIDO EN CAMPANA	65
6.3.1 Determinación de Propiedades mecánicas fundamentales	65
6.3.2 Determinación del Índice r	72
6.3.3 Determinación del índice n	74
6.3.4 Porcentaje de Reducción	75
6.4 CLASIFICACION DE LA CALIDAD DEL PRODUCTO OBTENIDO SEGÚN LA NORMA ASTM A 1008	77
6.4.1 Clasificación de la primera y segunda Corrida	78
6.4.2 Clasificación de la Tercera Corrida	79

<b>6.5 ANALISIS DE VARIANZA DE LAS PROPIEDADES MECANICAS CON RESPECTO A LA TEMPERATURA</b>	<b>80</b>
<b>6.6 ANALISIS METALOGRAFICO PARA DETERMINACION DEL TAMAÑO DE GRANO</b>	<b>83</b>
<b>6.6.1 Tamaño de Grano Aceros IF primera corrida de recocido</b>	<b>84</b>
<b>6.6.2 Tamaño de Grano Aceros IF segunda corrida de recocido</b>	<b>86</b>
<b>6.6.3 Tamaño de Grano Aceros IF tercera corrida de recocido</b>	<b>87</b>
<b>7. CONCLUSIONES</b>	<b>90</b>
<b>8. RECOMENDACIONES</b>	<b>93</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>94</b>

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1. Velocidad de producción del Acero IF en Nippon Steel Corporation</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 2. Inventario de Rollos de Material IF</b>	<b>37</b>
<b>Tabla 3. Composición Química del material IF</b>	<b>38</b>
<b>Tabla 4. Composición Química de Aceros laminados en Frio</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 5. Selección de Variables de Experimentos</b>	<b>39</b>
<b>Tabla 6. Configuración de Rollos para primera Corrida de recocido</b>	<b>40</b>
<b>Tabla 7. Configuración de Rollos para segunda Corrida de recocido</b>	<b>42</b>
<b>Tabla 8. Configuración de Rollos para tercera Corrida de recocido</b>	<b>43</b>
<b>Tabla 9. Resumen Caracterización Primera Corrida Material IF</b>	<b>65</b>
<b>Tabla 10. Resumen Caracterización Primera Corrida Material IF con temple</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 11. Resumen Caracterización Segunda Corrida Material IF</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 12. Resumen Caracterización Segunda Corrida Material IF con temple</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 13. Resumen Caracterización Tercera Corrida Material IF con temple</b>	<b>66</b>
<b>Tabla 14. Determinación de la anisotropía normal para la primera corrida antes y después de temple</b>	<b>72</b>
<b>Tabla 15. Determinación de la anisotropía normal para la segunda corrida antes y después de temple</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 16. Determinación de la anisotropía normal para la tercera corrida después de temple</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 17. Determinación de coeficiente de endurecimiento por deformación para la primera corrida de recocido antes y después de temple</b>	<b>74</b>
<b>Tabla 18. Determinación de coeficiente de endurecimiento por</b>	<b>74</b>

deformación para la segunda corrida de recocido antes y después de temple	
Tabla 19. Determinación de coeficiente de endurecimiento por deformación para la tercera corrida de recocido antes y después de temple	75
Tabla 20. Determinación de porcentaje de reducción para la primera corrida de recocido	76
Tabla 21. Determinación de porcentaje de reducción para la segunda corrida de recocido	76
Tabla 22. Determinación de porcentaje de reducción para la tercera corrida de recocido	77
Tabla 23. Clasificación por propiedades de la primera y segunda corrida de recocido	78
Tabla 24. Clasificación de la Calidad del Acero IF obtenido en la primera y segunda corrida de recocido	78
Tabla 25. Clasificación por propiedades de la tercera corrida de recocido	79
Tabla 26. Clasificación de la Calidad del Acero IF obtenido en la tercera corrida de recocido	80
Tabla 27. ANOVA de las propiedades mecánicas con respecto a la temperatura para el acero laminado en frío de 0.60mm y 0.70mm antes de temple	80
Tabla 28. ANOVA de las propiedades mecánicas con respecto a la temperatura para el acero laminado en frío de 0.60mm y 0.70mm después de temple	81
Tabla 29. ANOVA de las propiedades mecánicas con respecto a la temperatura para el acero laminado en frío de 0.45mm después de temple	82
Tabla 30. Temperaturas Vs. Cargas para determinar el tiempo de recocido del material IF	92

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
<b>Figura 1. Producción de Aceros IF</b>	<b>25</b>
<b>Figura 2. Desgasificación al vacío del acero</b>	<b>26</b>
<b>Figura 3. Transformación de la materia prima en Acesco</b>	<b>28</b>
<b>Figura 4. Distribución de Rollos envista desde el interior del Horno de recocido en campana del tipo convector</b>	<b>31</b>
<b>Figura 5. Diagrama de flujo de la metodología del trabajo de grado</b>	<b>35</b>
<b>Figura 6. Esquema de la configuración de rollos cargados en el Horno de Campana</b>	<b>41</b>
<b>Figura 7. Registro de datos sistema Data Q.</b>	<b>41</b>
<b>Figura 8. Curva de recocido esperada</b>	<b>42</b>
<b>Figura 9. Campana de Recocido</b>	<b>44</b>
<b>Figura 10. Curva esfuerzo - deformación</b>	<b>45</b>
<b>Figura 11. Máquina Universal de Ensayos</b>	<b>47</b>
<b>Figura 12. Esquema de toma de muestras para determinación del Índice r</b>	<b>48</b>
<b>Figura 13. Exponente de endurecimiento por deformación</b>	<b>50</b>
<b>Figura 14. Equipo y mecanismo de penetración para ensayo de dureza</b>	<b>52</b>
<b>Figura 15. Durómetro Wilson / Rockwell Serie 600</b>	<b>52</b>
<b>Figura 16. Planos de corte y muestras para metalografía</b>	<b>54</b>
<b>Figura 17. Máquina Cortadora</b>	<b>56</b>
<b>Figura18. Montadora de Baquelita</b>	<b>57</b>
<b>Figura 19. Desbastadora</b>	<b>57</b>
<b>Figura 20. Pulidora metalográfica</b>	<b>58</b>
<b>Figura 21. Microscopio óptico</b>	<b>59</b>
<b>Figura 22. Análisis descriptivo de la composición química</b>	<b>60</b>
<b>Figura 23. Curva de recocido material IF varios espesores</b>	<b>62</b>

<b>Figura 24. Curva de recocido material IF, espesor de 0.60 mm</b>	<b>63</b>
<b>Figura 25. Curva de recocido material IF espesor 0.45 mm</b>	<b>64</b>
<b>Figura 26. Elongación del punto de Fluencia</b>	<b>68</b>
<b>Figura 27. Elongación del punto de Fluencia para el Acero IF de 0.60 mm de espesor</b>	<b>69</b>
<b>Figura 28. Análisis de la anisotropía en copas embutidas</b>	<b>73</b>
<b>Figura 29. Micrografías rollo 98643, Temperatura de Recocido = 680°C</b>	<b>84</b>
<b>Figura 30. Micrografías rollo 99605, Temperatura de Recocido = 680°C</b>	<b>84</b>
<b>Figura 31. Micrografías rollo 97753, Temperatura de Recocido = 690°C</b>	<b>84</b>
<b>Figura 32. Micrografías rollo 98645, Temperatura de Recocido = 690°C</b>	<b>85</b>
<b>Figura 33. Micrografías rollo 99603, Temperatura de Recocido = 700°C</b>	<b>85</b>
<b>Figura 34. Micrografías rollo 98632, Temperatura de Recocido = 700°C</b>	<b>85</b>
<b>Figura 35. Micrografías rollo A1623, Temperatura de Recocido = 700°C</b>	<b>86</b>
<b>Figura 36. Micrografías rollo 99606, Temperatura de Recocido = 690°C</b>	<b>86</b>
<b>Figura 37. Micrografías rollo 98642, Temperatura de Recocido = 690°C</b>	<b>86</b>
<b>Figura 38. Micrografías laminas Acero IF 0.45 mm, Temperatura de Recocido = 680°C</b>	<b>87</b>
<b>Figura 39. Micrografías laminas Acero IF 0.45 mm, Temperatura de Recocido = 690°C</b>	<b>87</b>
<b>Figura 40. Micrografías laminas Acero IF 0.45 mm, Temperatura de Recocido = 690°C</b>	<b>88</b>
<b>Figura 41. Grafica recomendada para experimentos de recocido.</b>	<b>91</b>

## RESUMEN

**TITULO:** EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL PROCESO DE RECOCIDO EN CAMPANA SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO Y LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO IF\*.

**AUTORES:** MANTILLA RAMIREZ DIANA ISABEL\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Acero libre de elementos intersticiales (IF), Recocido en campana, Índice r, Índice n, Laminación en frío

**RESUMEN:** En este proyecto se propuso determinar el efecto de la variación de la temperatura de recocido sobre el tamaño de grano y las propiedades mecánicas del acero IF laminado en frío, con fines de aplicaciones a procesos de conformado y comercializarlo como calidad de embutición (DQ), por Acerías de Colombia S.C.A ACESCO en el mercado de automóviles y electrodomésticos.

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 la selección de parámetros de operación 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 y obtener el tamaño de grano del acero trabajado, se realizó análisis de composición química, ensayos de: anisotropía, endurecimiento por deformación, tensión, dureza y metalografía.

Los resultados logrados afirman que la variación del tamaño de grano, es insignificante a los cambios de temperatura de recocido, y la fluencia es la propiedad mejorada con el temple, con el fin de obtener la calidad de embutición, cuyas especificaciones se encuentran en la norma ASTM A 1008, donde los parámetros de clasificación corresponden a la anisotropía normal de la lamina, la fluencia, porcentaje de elongación y endurecimiento por deformación del material. Además, se obtuvo la curva de recocido que en función de la carga y la temperatura determinará el tiempo total del proceso.

\* Trabajo de grado

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Jairo Alfonso Gómez Rodríguez, Co-Director: Iván Uribe Pérez

## SUMMARY

**TITLE:** EFFECT OF PROCESS'S TEMPERATURE OF BATCH ANNEALING ON THE GRAIN SIZE AND MECHANICAL PROPERTIES OF IF STEEL.\*

**AUTHORS:** MANTILLA RAMIREZ DIANA ISABEL \*\*

**KEY WORDS:** Interstitial free steel (IF), Drawing Quality (DQ), Batch annealing, Value r, Value n, Cold Rolling.

**SUMMARY:** This paper is intended to do proposed to determined to effect of variation of annealing temperature on the grain size and mechanical properties of IF steel cold rolled, for application to processes conformed and to marketed with Drawing Quality (DQ), by Acerías de Colombia S.C.A.ACESCO in the market of motors and appliance.

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 selection of operation's parameters of batch annealing when adjusting the main variables that affect the formability of DQ steel sheet. In order to characterize the mechanical behavior and to obtain the grain size of steel working, was analyzed by chemical composition, tests of: measure of anisotropy, strain-hardening exponent, tension, hardness and metallography.

The results achieved to make fast that variation of grain size is insignificant to temperature change of annealing, and the Yield Strength is the improved property whit the temper, in order to obtain the drawing quality, which requirements are found in specification ASTM A 1008, where the parameter of classification corresponds to the normal anisotropy of the sheet, the yield strength, elongation percentage and strain-hardening exponent. Also, was obtained the annealing curve that in according to the load and the temperature to will determined the total time of the process.

\* Work of Degree

\*\*Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales, Director: Jairo Alfonso Gómez Rodríguez, Co-Director: Iván Uribe Pérez

## INTRODUCCIÓN

Al inicio de la investigación que involucra el desarrollo del presente trabajo de grado se propuso determinar el efecto obtenido en el tamaño de grano del Acero IF, luego de realizar variaciones en las temperaturas y los ciclos de calentamiento en el tratamiento térmico de recocido, con el fin de obtener las mejores propiedades necesarias que deben cumplirse si se espera que el mayor beneficio que proporcione el material de forma laminar, sea su aplicación a los procesos de conformado.

Actualmente, Acerías de Colombia y Cia ACESCO S.C.A., ha resaltado la importancia del proceso de recocido en campana, debido a que la calidad final del producto y los parámetros de operación utilizados no son totalmente conocidos, pues en la mayoría de los casos estos valores son ajustados empíricamente, siendo difícil controlar que las modificaciones realizadas se encuentren entre estrechos rangos de confiabilidad, que brinde en el acero las características necesarias para la satisfacción del cliente en el momento de comercializar el material.

Entre los aceros aptos para los procesos de conformado, los aceros con calidad de embutición son quienes despiertan en Acerías de Colombia, el interés de realizar una investigación experimental, donde se indague a cerca de las condiciones del proceso de recocido, para obtener en el acero propiedades tanto mecánicas como metalúrgicas que cumplan con los requerimientos del consumidor, debido a que este tipo de materiales es de gran demanda en el mercado por sus amplias aplicaciones en la industria automotriz, fabricación de filtros, electrodomésticos, utensilios de cocina, ferretería, entre otros. Colombia satisface esta necesidad con material importado de Brasil, Venezuela y Japón, como principal proveedor de la materia prima.

Según investigaciones realizadas anteriormente, la obtención de un material con calidad de embutición puede lograrse a partir del acero IF, luego de su fabricación por un proceso convencional y llevarse a la desgasificación, donde se remueven el carbono y el hidrógeno, y que posteriormente reciba un tratamiento térmico de recocido en campana en atmósfera 100% H<sub>2</sub><sup>2</sup>, la cual protege al acero de la oxidación superficial y/o de la descarburización, ya que estos dos factores se consideran como defectos<sup>11</sup>; de igual manera, por medio del recocido se alivia la concentración de esfuerzos generados en el proceso de laminación en frío mediante la recrystalización y el crecimiento de los granos, haciendo posible que la lámina obtenga la formabilidad adecuada y la ductilidad suficiente para que durante el proceso de embutición soporte las rígidas condiciones de operación.

Con el fin de lograr lo anterior, fue necesario realizar varias corridas de recocido de rollos de láminas de acero IF de varios espesores y pesos, a diferentes tiempos y temperaturas, las cuales se monitorearon por medio de termocuplas tanto en el material como en la atmósfera circundante dentro del horno, para posteriormente realizar un análisis sobre las propiedades mecánicas (resistencia máxima, fluencia, endurecimiento por deformación y anisotropía plástica) que caracterizan el comportamiento de los aceros laminados en frío<sup>4</sup> y su tamaño de grano, para cada una de las temperaturas, antes y después de un laminado de temple, buscando relacionar estos aspectos con los parámetros de operación del recocido en campana y la disposición o configuración del material dentro del horno para llegar a un proceso mas eficiente que a su vez mejore la calidad del material.

Finalmente, un breve análisis estadístico de las propiedades mecánicas y metalúrgicas relacionado con las condiciones del proceso, hizo posible la obtención de una gráfica con su respectiva ecuación, que permita calcular el tiempo y la temperatura del recocido en campana del acero IF, de acuerdo al peso de su carga (alta o baja), con el fin mejorar la calidad del producto obtenido; está fue la razón mas importante que tuvo Acerías de Colombia

Acesco y Cia. S.C.A. para llevar a feliz término el desarrollo del presente trabajo de grado titulado "EFECTO DE LA TEMPERATURA DEL PROCESO DE RECOCIDO EN CAMPANA SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO Y LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO IF".

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar el efecto que producen diferentes temperaturas de sostenimiento del proceso de recocido en campana sobre el tamaño de grano y las propiedades mecánicas del acero IF.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Evaluar las propiedades mecánicas en el acero IF en cada una de las temperaturas seleccionadas para el proceso de Recocido.
- Determinar, si existe, la diferencia del tamaño de grano en el acero IF para diferentes temperaturas de Recocido en Campana.
- Clasificar según la Norma ASTM 1008, la calidad del Material, de acuerdo a sus propiedades mecánicas.
- Determinar el grado de significancia a través de un ANOVA (Análisis de Varianza) de la temperatura sobre el tamaño de grano de Aceros IF y sobre sus propiedades mecánicas.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Actualmente, Acerías de Colombia, industria dedicada a la producción de aceros, se encuentra adelantando investigaciones que conlleven a la optimización de sus procesos, resaltando de manera importante, el Recocido en continuo, gracias al cual se hace posible la obtención de aceros laminados en frío, que puedan proporcionar la combinación de excelentes propiedades mecánicas, calidad dimensional y acabado superficial, en rollos de acero de cargas ligeras y pequeño espesor. Con esto se busca reducir el nivel de importaciones de la materia prima, beneficiando de esta manera el mercado nacional.

En las últimas décadas, los avances en metalurgia física y ciencia de materiales han permitido el desarrollo de aleaciones capaces de resolver diversos tipos de problemas industriales, tales como la capacidad de mantener alta resistencia mecánica a elevadas temperaturas, buena resistencia a la corrosión en variados tipos de ambientes, capacidad de resistir a la termofluencia y que puedan ser formables y adaptables a las condiciones de fabricación requeridas, dependiendo de las aplicaciones a las cuales quieran implementarse, como por ejemplo, a la industria automotriz y de electrodomésticos.

Según estudios realizados anteriormente, se ha encontrado que estas necesidades pueden suplirlas los aceros IF “INTERSTICIAL FREE STEEL”, que luego de ser laminados en frío y sometidos al tratamiento Térmico de Recocido recuperan su ductilidad por medio de la recristalización. Esto genera la necesidad de controlar las variables del tratamiento térmico, básicamente, del tiempo y la temperatura, con el fin de que el producto terminado cumpla con las aplicaciones a las cuales se quiere implementar; debido a esto es recomendable evaluar el material, en las propiedades que son directamente

afectadas por el recocido, como son las propiedades mecánicas y la determinación del tamaño de grano, que a su vez, determinan su comportamiento ante los procesos a los cuales serán sometidos.

Queda a la expectativa entonces la siguiente pregunta, que espera resolverse con el desarrollo de este proyecto;

¿Existirán diferencias significativas en las propiedades mecánicas y el tamaño de Grano de Aceros IF de diferentes espesores recocidos a un rango de temperaturas entre los 670°C y los 700°C?

### 3. JUSTIFICACIÓN

Los aceros constituyen el grupo de materiales en ingeniería de mayor uso y diversidad gracias a la variedad de propiedades que se pueden obtener. Un caso especial lo constituyen los aceros laminados en frío, de los cuales se genera la producción de chapas, hojas o láminas de diversos espesores; estas aplicaciones exigen que en el material ocurra la restauración de su estructura para recuperar la ductilidad que ha disminuido en el proceso de conformado, con el fin de que conseguir las características necesarias para su posterior implementación a la fabricación de filtros y electrodomésticos.

La demanda de este tipo de materiales en el mercado colombiano es la principal motivación con la que cuenta la unidad de Investigación y Desarrollo de la empresa Acerías de Colombia y Cia. ACESCO S.C.A., para iniciar investigaciones en busca de la obtención de un producto laminar en el que puedan obtenerse excelentes propiedades mecánicas y metalúrgicas, sin necesidad de poseer grandes dimensiones. En caso de lograrlo, Acerías de Colombia incrementaría notoriamente su productividad, y por ende, su competitividad a nivel nacional e internacional.

Como parte del Proyecto que desarrolla actualmente Acerías de Colombia, para la obtención de materiales de Calidad Embutición a partir de Aceros IF de bajos espesores (básicamente 0,45mm. y 0,60 mm.), surge la necesidad de incrementar la eficiencia de los procesos involucrados, especialmente, en el tratamiento térmico de recocido en campana, reduciendo tiempos, costos de producción y consumo de energía, manteniendo siempre la integridad del acero y cumpliendo con los requerimientos de las normas que determinan el comportamiento del material.

De esta manera, Acerías de Colombia y Cia. Acesco S.C.A. se convierte en un gran aporte a la innovación de nuevos materiales en la industria metalmeccánica.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 MATERIA PRIMA: ACERO IF (INTERSTITIAL FREE STEEL)

**4.1.1 Generalidades del Acero IF.** Por primera vez en Japón en la década de los 70, se conocen los aceros IF (Interstitial Free Steel), obtenidos por una desgasificación al vacío, seguida de la adición de Ti y Nb para estabilizar cada átomo intersticial de Carbono y Nitrógeno en la red cristalina<sup>2</sup>. El Hidrógeno, el Oxígeno y el Boro, también hacen parte de los elementos intersticiales. A su vez, la remoción de estos elementos, da como resultado un acero más puro, más limpio y de una calidad superior

La siguiente tabla muestra la velocidad de producción del Acero IF en Nippon Steel Corporation, en toneladas por año, durante el periodo de 1986 hasta el 1992, y quien en la actualidad, el principal proveedor de este material para Acerías de Colombia y Cia. ACESCO S.C.A.

Tabla 1. Velocidad de Producción del Acero IF en Nippon Steel Corporation en toneladas por año.

	1986	1988	1992
<b>Ti IF</b>	100	182	215
<b>Ti - Nb IF</b>	100	145	128
<b>Total</b>	100	447	841

Fuente: Metallurgical Aspects on Interstitial Free Sheet From Industrial Viewpoints<sup>4</sup>.

El carbono, como elemento aleante principal, se presenta en rangos muy bajos (menor a 80 ppm). En cuanto a los elementos estabilizadores, no es favorable encontrar excesivas cantidades de Ti y o Nb, debido a que al combinarse con el C y N pueden quedarse en solución sólida, aumentando el costo del acero y afectando sus propiedades mecánicas finales. El titanio y el niobio en grandes cantidades, tienden a aumentar la resistencia mecánica, y pueden de esta

manera desviar sus valores de los rangos permisibles por la norma ASTM A 1008 para las aplicaciones para las cuales se realiza el estudio en este tipo de aceros, dirigidas a procesos de conformado. El niobio por su parte, afecta en cierta manera la evolución microestructural, retrasando la recristalización de la ausenita deformada cuando está en solución sólida, y ocasionando la presencia de precipitados de carburos de niobio NbC nanométricos en los límites de grano<sup>17</sup>.

Es por esto, que estas cantidades se calculan de la siguiente manera, dependiendo de si se emplean individualmente o no:

- Si se utiliza solo titanio<sup>13</sup>;  $Ti = 4 \times \%C + 3,42 \times \%N + 1,5 \times \%S + 0,02$ .
- Si también se utiliza niobio<sup>13</sup>;  $Ti = 3,42 \times \%N + 1,5 \times \%S; Nb + 7,75 \times \%C$ .

Entre los objetivos de mayor importancia de la industria automotriz es disminuir el peso de los paneles exteriores de los carros manteniendo buena formabilidad y resistencia, la cual pueda encontrarse en productos laminares que puedan brindar excelentes propiedades mecánicas y metalúrgicas, sin necesidad de poseer grandes dimensiones. Los aceros IF, poseen gran formabilidad comparable con los aceros de calidad de extra embutición profunda, luego de la introducción de la tecnología de desgasificado al vacío.

## **4.2 APLICACIONES DEL ACERO IF**

Los aceros libres de elementos intersticiales han sido desarrollados para ser utilizados entre otras industrias, en la automotriz, debido a que las propiedades obtenidas en láminas recocidas cumplen con los requerimientos de una excelente estampabilidad, lo cual permite la obtención de paneles con formas muy complejas en espesores de 0.3 mm o menores<sup>3</sup>. Esta excelente estampabilidad se ha alcanzado como un resultado de disminuir en partes por millón los contenidos de elementos tales como el carbono y el nitrógeno y el

uso de elementos estabilizadores tales como el titanio y el niobio o una combinación adecuada de estos dos elementos, durante la práctica de la fabricación del acero.

Actualmente, la aplicación más importante de este acero, donde se obtiene su mejor calidad es en las aplicaciones de embutición profunda. Ha sido usado en un amplio rango de aplicaciones desde el cuerpo de los automóviles hasta componentes electrónicos.

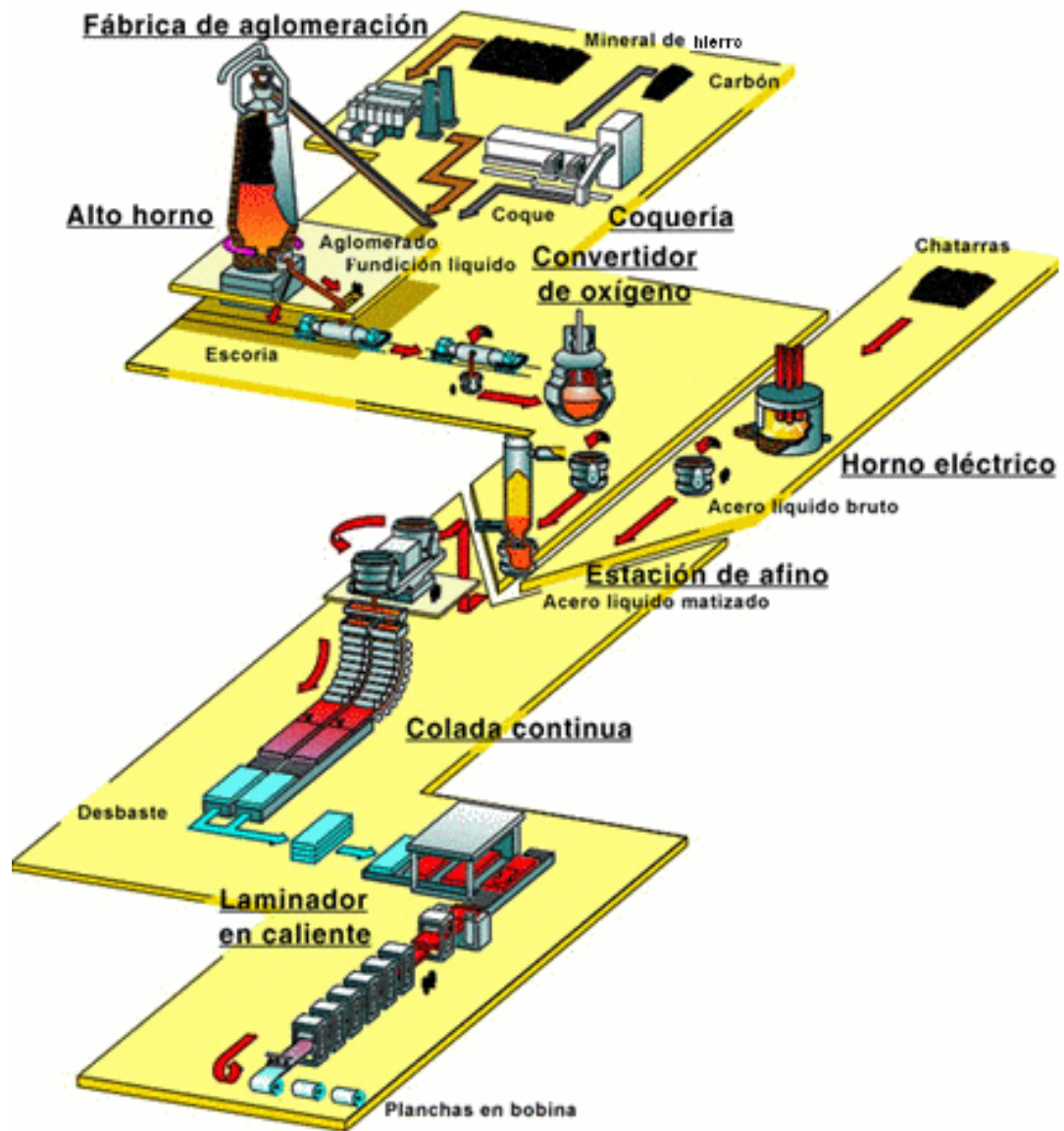
### **4.3 PRODUCCIÓN DEL ACERO IF**

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 1, en la estación de afino. La práctica de desgasificado al vacío constituye el proceso clave en la producción de éste tipo de acero; posteriormente se realiza la estabilización del carbono con la adición de titanio y niobio, brindando al acero la calidad deseada.

Luego de ser producido en cualquiera de los hornos de fabricación, en este caso en el alto horno, el acero puede refinarse aún más para obtener alta pureza y homogeneidad. Esto se logra con el proceso de desgasificación, donde se remueven los gases (oxígeno, hidrógeno y nitrógeno) en el acero fundido que fueron absorbidos o formados durante el proceso de fabricación. Si esto no ocurre antes que el acero se solidifique, su presencia o sus reacciones con otros elementos en el acero puede producir defectos tales como: inclusiones (partículas sólidas de óxido), sopladuras (bolsas de gas), grietas internas y fragilidad (pérdida de ductilidad).

La desgasificación del acero fundido se lleva a cabo exponiéndolo a un vacío. La presión se reduce considerablemente sobre la superficie del líquido, permitiendo el escape de los gases.

Figura 1. Producción de Aceros IF



Fuente: <http://www.todomonografias.com/images/2006/07/548.gif>

El acero fundido puede desgasificarse de varias maneras. Las dos más comunes son:

- Desgasificación por flujo: El acero fundido cae desde la cuchara dentro de una lingotera completamente encerrada en una cámara de vacío, fraccionándose en gotas para favorecer la eliminación de los gases. Debido a la reducida presión sobre el líquido, los gases disueltos revientan y se extraen fuera de la cámara por medio de una bomba de vacío.
- Desgasificación en cuchara: Se hace descender un recipiente de vacío calentado de modo que su boquilla de absorción quede por debajo del nivel líquido del acero fundido. La presión atmosférica impulsa el acero fundido hacia arriba dentro de la cámara de vacío, en donde los gases se extraen mediante la bomba de vacío. La elevación del recipiente de vacío permite que el acero fundido fluya de vuelta, por la fuerza de gravedad, dentro de la cuchara. Este ciclo se repite varias veces hasta que la totalidad el acero fundido en cuchara se ha desgasificado.

Figura 2. Desgasificación al Vacío de Aceros



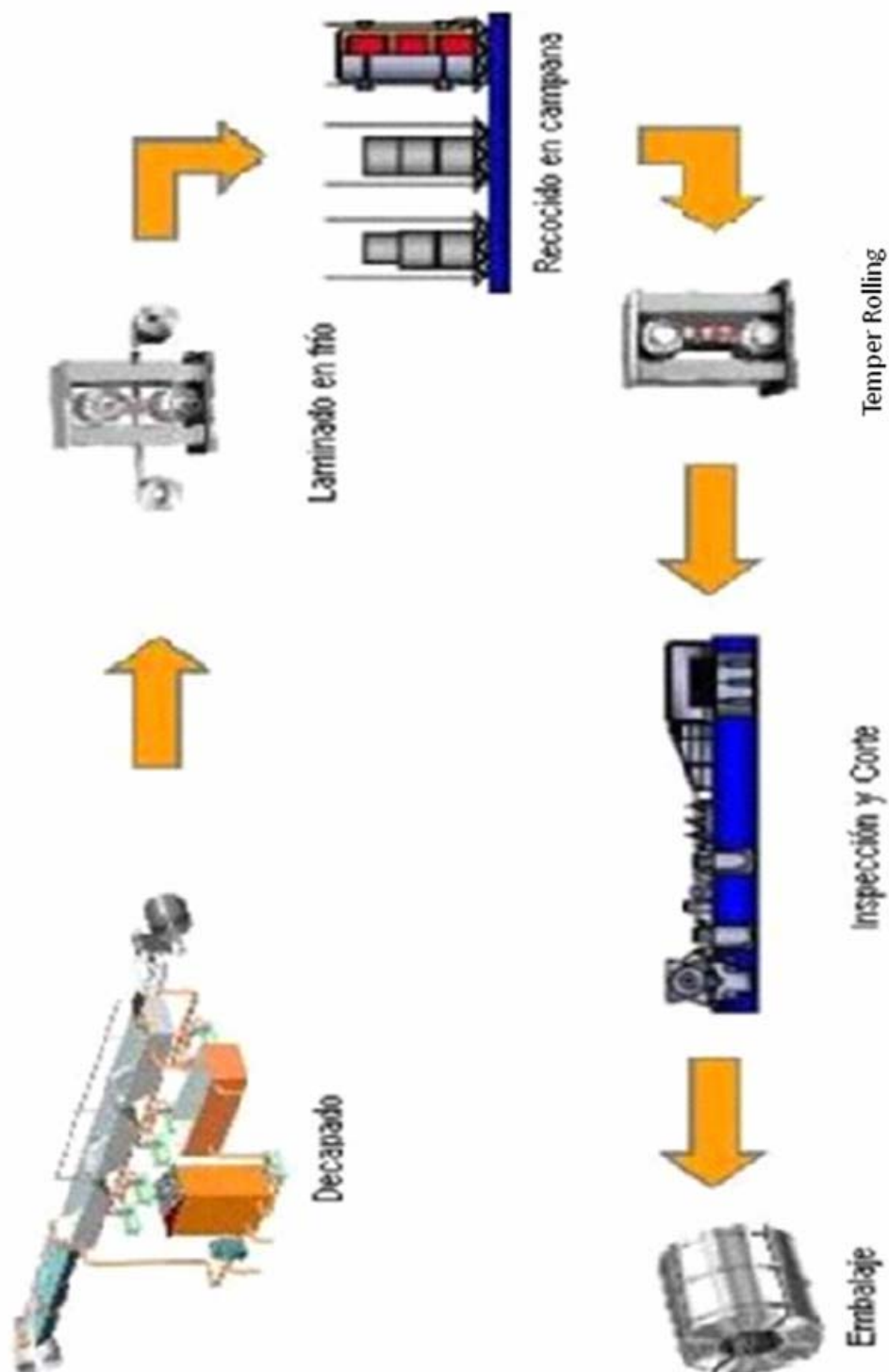
- Fuente: <http://www.memagazine.org/.../features/vacuum/56.gif>

#### **4.4 PRIMERA ETAPA DE TRANSFORMACIÓN PRELIMINAR DEL ACERO IF EN ACESCO: DECAPADO QUIMICO Y LAMINACION EN FRIO**

Luego de la obtención de láminas de Acero IF, se realiza una transformación que involucra diferentes pasos, con el fin de darle al material las propiedades mecánicas y metalúrgicas aptas para someterlo a procesos de conformado, y de las cuales puedan obtenerse sus mejores calidades para su posterior aplicación, entre ellas, la aplicación a los procesos de embutición profunda. Esta ruta de transformación se muestra en la figura 3, y serán explicadas a continuación:

**4.4.1 Proceso de decapado químico de la lámina en caliente.** Después de su proceso de producción, el acero laminado trae consigo una capa de óxido superficial que debe ser removida antes de llevarse a los demás procesos. Para esto, se realiza el decapado químico, donde el acero laminado en caliente se introduce en cubas que contienen ácido clorhídrico. El ácido reacciona con el óxido dejando la superficie limpia pero con algunos residuos ácidos, los cuales son removidos posteriormente en cubas de enjuagues con sprays de agua caliente. En esta fase del proceso se realiza el corte de bordes laterales los cuales no presentan uniformidad. Antes de rebobinar el material, se aplica una fina capa de aceite para la protección del material ya decapado, durante el almacenamiento temporal.

Figura 3. Transformación de la Materia Prima en ACESCO



Acerías de Colombia y Cía. ACESCO S.C.A.

**4.4.2 Proceso de reducción o laminación en frío.** El proceso de laminación en frío permite obtener en el acero la mejor combinación de propiedades mecánicas, calidad dimensional y acabado superficial<sup>10</sup>, siendo éste último uno de los parámetros más importantes, debido a que un rollo de acero laminado se puede devaluar comercialmente a una segunda categoría al no cumplir las demandas de calidad superficial. Una serie de aspectos intervienen en la calificación del acabado superficial del rollo laminado en frío, entre ellos, la rugosidad, la cual se considerada como crítica en partes expuestas a la vista.

Este proceso se lleva a cabo en un laminador de cuarto reversible (four high), compuesto por un bastidor único con un juego de dos cilindros de apoyo y dos de reducción. El material es sometido a cierto número de pasadas, en un proceso reversible para obtener los espesores finales deseados. 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, aplicando en cada una de ellas, el porcentaje de reducción del espesor.

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

A continuación se describirá el proceso de transformación final del Acero IF, y a su vez, el más importante, que corresponde al proceso de recocido, el cual determina, junto con el temple, las propiedades finales del producto terminado para sus próximas aplicaciones.

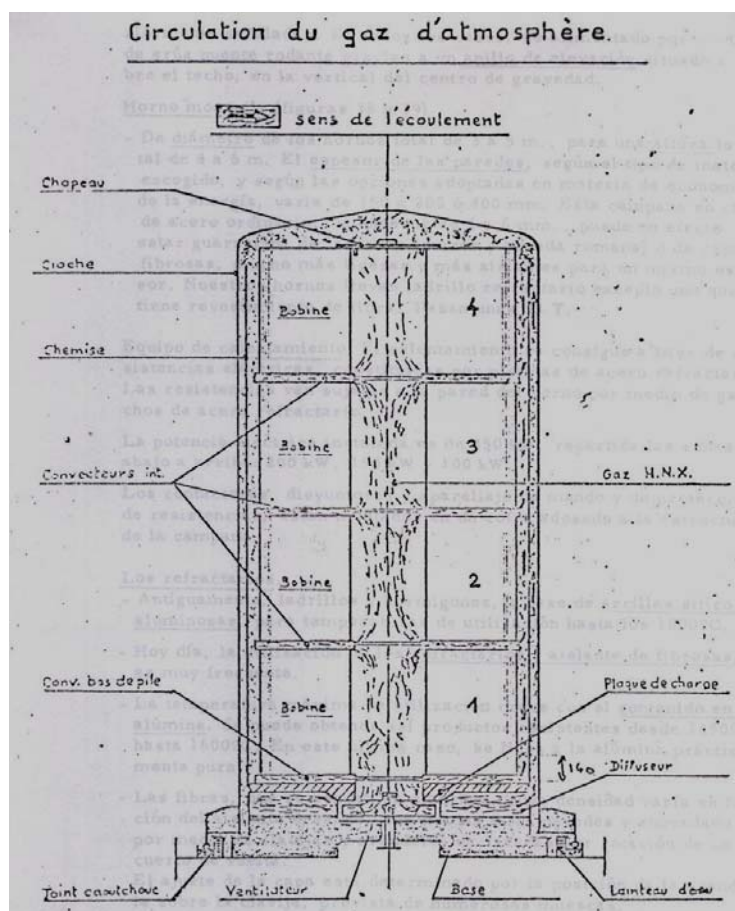
#### **4.5 SEGUNDA ETAPA DE TRANSFORMACION DEL ACERO IF: TRATAMIENTO TERMICO DE RECOCIDO, TEMPLE (TEMPER ROLLING) y EMBOBINADO.**

Luego del proceso de laminación en frío, el material adquiere durezas elevadas y pierde notoriamente su ductilidad, por lo que es necesario aplicar un tratamiento térmico de recocido de recristalización que le proporcione el grado adecuado de conformabilidad. Dentro del proceso de Acesco, los rollos de acero laminados son llevados a recocido en hornos del tipo campana, de alta convección térmica. Estos rollos de acero se apilan con el eje vertical sobre esta base, donde se encuentran con una atmósfera reductora con un contenido de 100% hidrogeno dentro de una campana protectora sellada herméticamente. A continuación, y por un intervalo de tiempo entre 25 a 40 horas o más si se considera necesario para lograr una temperatura de sostenimiento entre 660°C y 700°C, luego de la cual, se cambia la campana de calentamiento por la de enfriamiento con aire y agua .Finalizado el enfriamiento se retiran tanto la campana de enfriamiento como de protección y se retiran los rollos de acero debidamente recocidos.

**4.5.1 Recocido en Campana.** El estudio de recocido en campana es de suma importancia, ya que la relación existente entre la calidad final del producto y los parámetros de operación utilizados (temperatura, tiempo, atmósfera protectora, velocidad de flujo, etc.) no son del todo conocidos<sup>12</sup>. El horno del tipo campana tiene como fin asegurar la máxima uniformidad de estos parámetros 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 horno de campana del tipo convector, empleado en ACESCO, consta de una o varias bases fijas, en las cuales, los rollos de lámina de acero que van a ser recocidos son ubicados unos encima de otro, separados por una placa llamada placa convectora. Un cobertor es transportado y ubicado sobre los rollos apilados, mediante el uso de un puente grúa. Posteriormente, sobre el cobertor se ubica 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 4, se muestra la distribución de los rollos de acero en el horno, así como las distintas partes que componen el sistema.

Figura 4. Distribución de los rollos vista desde el interior del horno de recocido en campana del tipo convector.



Fuente: LANERO, Tomás. El Recocido<sup>11</sup>.

Considerando y controlando las principales variables de este proceso que involucra una gran importancia para este trabajo, se hace necesario conocer las condiciones y etapas que se presentan:

### **Recocido de recristalización.**

Debido a la reducción en frío de la lámina, ocurre una deformación plástica en los cristales, en los cuales posteriormente se presenta una concentración de esfuerzos que 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<sup>14</sup>. Este fenómeno recibe el nombre de endurecimiento por deformación plástica.

De manera similar 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.

Por lo anterior, el acero laminado en frío 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<sup>15</sup>, más conocidos como las etapas en que se divide este proceso explicadas a continuación:

- **Recuperación:** Es la primera etapa del proceso de recocido, en la cual ocurre un ligera disminución de la dureza, que no ocasiona cambio en la conformación de los cristales. A temperaturas altas se produce el alivio de esfuerzos internos causados por el trabajo en frío, (tensiones residuales), y a su vez, se presentan 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, que consiste en la difusión, mediante la adición de calor, de las vacancias hacia las dislocaciones y bordes de granos, logrando disminuir su cantidad hasta el número de equilibrio a la temperatura correspondiente.

Poligonización, que es 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 reorganicen en una configuración de menor energía, formando subgranos y bordes de grano de ángulo pequeño.

La caída de la resistividad eléctrica ( $R$ ), la cual 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:** Indica la pérdida de las características conseguidas en la acritud y la reconstrucción cristalina. En esta etapa se da la aparición de nuevos cristales en la microestructura, en zonas con alta densidad de las dislocaciones, de composición y estructura reticular similar a los antiguos granos no deformados. La fuerza impulsora de la recristalización surge de la energía almacenada del trabajo en frío. La temperatura de recristalización hace referencia a la temperatura aproximada a la que un material altamente trabajado en frío se recristaliza por completo en una hora aproximadamente. 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: Luego de la recristalización, si la temperatura de recocido y el tiempo de permanencia lo permiten, el tamaño medio de los granos aumenta.

**4.5.2 Temper Rolling.** Finalizado el proceso de recocido, a la lámina de Acero IF se aplica una pequeña deformación mediante otra operación no lubricada de laminación en frío, la cual le proporciona forma y suavidad superficial a la lámina, y a su vez permite que se obtengan 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%.

**4.5.3 Embobinado, preparación del rollo y corte (Coil preparation and Shearing).** La preparación del rollo se realiza empleando máquinas de embobinado especialmente diseñadas para operaciones de recorte de bordes y corte de los extremos, que no satisfacen los requerimientos adecuados para sus posteriores aplicaciones, así como la posible unión de varios rollos para obtener otros más grandes, dependiendo de los requerimientos del cliente.

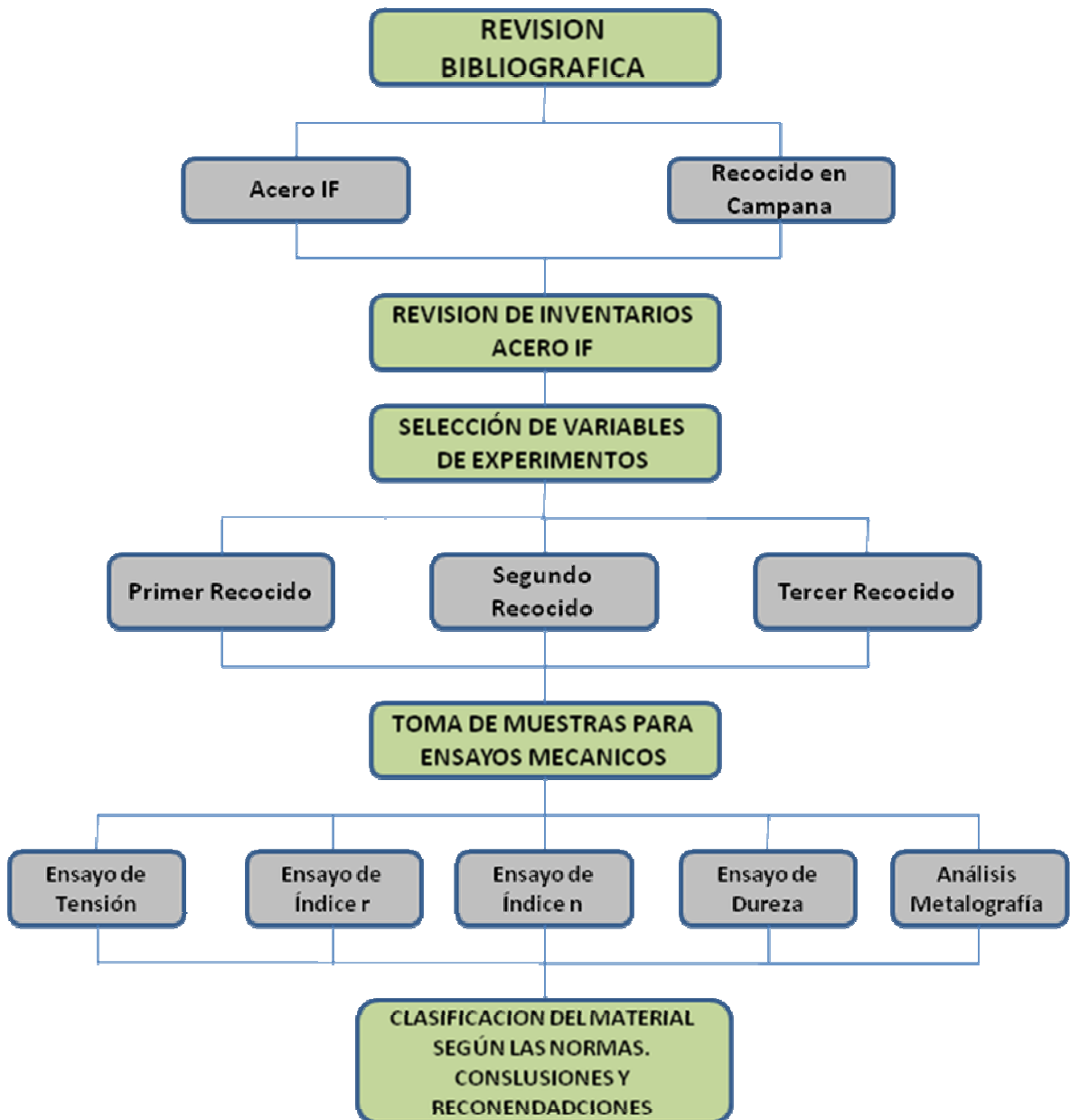
#### **4.6 EFECTOS DE LA LAMINACIÓN Y EL RECOCIDO.**

El acero es una aleación, compuesta por un gran número de pequeños granos. El tamaño, la forma, la composición y la distribución de estos granos, determina notablemente las propiedades mecánicas de la lámina de acero. Durante la manufactura de las láminas y rollos de acero, los factores que determinan y afectan la estructura y las propiedades mecánicas son, ordenados según la secuencia de procesamiento: la composición química, el tipo de lingote fabricado, las condiciones de laminación en caliente y embobinado, el grado o porcentaje de reducción en frío, el tipo y características del recocido empleado y las características del laminado de temple. Cada uno de estos factores puede ejercer una marcada influencia en las propiedades mecánicas finales del Acero IF.

## 5. METODOLOGÍA

Para cumplir a cabalidad con los objetivos trazados para desarrollar el presente trabajo, el proyecto se realizó en diferentes etapas, que fueron llevadas a cabo según la secuencia establecida.

Figura 5. Diagrama de Flujo de Metodología del Trabajo de Grado.



Las etapas con sus correspondientes actividades son las siguientes:

### **5.1 PRIMERA ETAPA: REVISIÓN BIBLIOGRAFICA**

Esta etapa se adquirió un amplio conocimiento sobre el proceso de recocido en campana para aceros IF, incluyendo detalles de todas las etapas del proceso, y la calidad de los productos obtenidos. Para ello fue necesario comenzar por el estudio de las normas que rigen este tipo de materiales y los ensayos de laboratorio requeridos, citando para tal fin las siguientes normas: ASTM E 8M: Ensayo de tensión, ASTM E 517: Índice r (Anisotropía plástica), ASTM E 646: Índice n (endurecimiento por deformación), ASTM A 1008: composición química y propiedades mecánicas de aceros laminados en frío, ASTM E 112: (Determinación del tamaño de grano, entre otras). También se realizó reconocimiento del programa estadístico Minitab, para realizar los respectivos Análisis de Varianza que se mostrarán en los análisis de resultados.

### **5.2 SEGUNDA ETAPA: RECONOCIMIENTO DEL MATERIAL DISPONIBLE**

Para el reconocimiento del acero IF, objeto principal de la investigación, fue indispensable hacer una revisión de inventarios de producción de Acesco para identificar la cantidad de rollos disponibles para pruebas, y verificando que el ítem asignado para cada uno de ellos concuerde con sus dimensiones y peso; esto con el fin de realizar un seguimiento para todos los procesos a los cuales será sometido el material.

**5.2.1 Revisión del Inventario de Material Disponible.** Ver Tabla 2.

**5.2.2 Revisión de la Composición Química.** Realizando la revisión del material existente, y con el fin de verificar si la composición química de algunos de los rollos a analizar son similares a los indicados por la Norma ASTM A1008, se hizo un análisis descriptivo de la composición química de algunos de los elementos aleantes, que indicara los rangos de confiabilidad y la desviación media entre los cuales se encontraban estos valores. Tabla 3.

Tabla 2: Inventario de Rollos de Material IF

ITEM ROLLO	ESPESOR (mm)	ACERO	ANCHO (mm)	PESO (Kg.)
A1620	1,15	IF	1220	21,520
97738	0,90	IF	1220	22,505
98632	0,90	IF	1220	18,265
99167	0,90	IF	1220	22,790
A1619	0,85	IF	1220	18,045
A1621	0,85	IF	1220	20,450
99166	0,75	IF	1220	20,560
99739	0,75	IF	1220	22,690
98631	0,75	IF	1220	22,170
99153	0,75	IF	1220	21,960
97736	0,75	IF	1220	4,635
98629	0,75	IF	1220	9,675
99162	0,75	IF	1220	10,370
99615	0,75	IF	1220	8,705
99156	0,70	IF	1220	22,980
99603	0,70	IF	1220	22,650
99605	0,70	IF	1220	22,365
99159	0,60	IF	1000	19,810
99602	0,60	IF	1000	19,345
98642	0,60	IF	1220	22,960
98644	0,60	IF	1220	22,520
99163	0,60	IF	1220	22,500
99606	0,60	IF	1220	22,595
97753	0,60	IF	1220	23,400
98643	0,60	IF	1220	20,130
A1622	0,60	IF	1220	19,145
A1623	0,60	IF	1220	20,560
A2555	0,45	IF	1220	16,583
A8803	0,45	IF	1220	16,529
A8801	0,45	IF	1220	13,202
A8807	0,45	IF	1220	12,356
A8811	0,45	IF	1220	15,424
A8806	0,45	IF	1220	15,700
A8809	0,45	IF	1220	15,425
A8808	0,45	IF	1220	14,625
A8802	0,45	IF	1220	15,105
A8810	0,45	IF	1220	14,203
A8805	0,45	IF	1220	14,098
A8804	0,45	IF	1220	14,200

Fuente: Acerias de Colombia y Cia. ACESCO S.C.A.

Tabla 3: Composición Química del Material IF

Bobina	C	Mn	Al	V	Nb	N	Ti	B	Espesor
A8808	0,0016	0,10	0,045	0.002	0,0022	0,0033	0,061	0,0001	0,45
A8810	0,0019	0,14	0,044	0.003	0,0030	0,0029	0,061	0,0001	0,45
A8803	0,0016	0,10	0,045	0.002	0,0022	0,0033	0,061	0,0001	0,45
A8801	0,0016	0,10	0,045	0.002	0,0022	0,0033	0,061	0,0001	0,45
A8807	0,0016	0,10	0,045	0.002	0,0022	0,0033	0,061	0,0001	0,45
A2555	0,0013	0,14	0,036	0.001	0,0019	0,0010	0,071	0,0001	0,45
A8804	0,0016	0,10	0,045	0.002	0,0022	0,0033	0,061	0,0001	0,45
A8806	0,0016	0,10	0,045	0.002	0,0022	0,0033	0,061	0,0001	0,45
A8805	0,0016	0,10	0,045	0.002	0,0022	0,0033	0,061	0,0001	0,45
A8811	0,0024	0,11	0,043	0.002	0,0022	0,0038	0,060	0,0002	0,45
A8802	0,0016	0,10	0,045	0.002	0,0022	0,0033	0,061	0,0001	0,45
A8809	0,0016	0,10	0,045	0.002	0,0022	0,0033	0,061	0,0001	0,45
A1623	0,0000	0,13	0,029	0.001	0,0022	0,0014	0,073	0,0010	0,60
97753	0,0000	0,12	0,036	0.000	0,0003	0,0017	0,043	0,0001	0,60
99159	0,0000	0,13	0,068	0.001	0,0017	0,0024	0,062	0,0004	0,60
98643	0,0000	0,13	0,038	0.000	0,0009	0,0020	0,042	0,0001	0,60
98642	0,0000	0,11	0,032	0.001	0,0005	0,0020	0,055	0,0001	0,60
99602	0,0000	0,10	0,024	0.000	0,0006	0,0000	0,038	0,0002	0,60
99606	0,0000	0,11	0,031	0.000	0,0005	0,0020	0,040	0,0001	0,60
A1622	0,0000	0,12	0,031	0.001	0,0018	0,0020	0,074	0,0001	0,60
99603	0,0000	0,13	0,026	0.000	0,0007	0,0026	0,035	0,0002	0,70
99605	0,0000	0,12	0,029	0.001	0,0006	0,0024	0,003	0,0001	0,70
98645	0,0000	0,12	0,038	0.000	0,0009	0,0020	0,042	0,0001	0,70
99156	0,0000	0,13	0,029	0.001	0,0022	0,0014	0,073	0,0010	0,70
99167	0,0000	0,14	0,030	0.000	0,0005	0,0022	0,039	0,0001	0,70
99166	0,0000	0,12	0,038	0.000	0,0070	0,0020	0,042	0,0020	0,75
99153	0,0012	0,12	0,034	0.001	0,0015	0,0018	0,073	0,0001	0,75
98631	0,0000	0,12	0,037	0.001	0,0040	0,0017	0,043	0,0001	0,75
97739	0,0000	0,12	0,035	0.001	0,0009	0,0025	0,039	0,0002	0,75
A1619	0,0000	0,13	0,068	0.001	0,0017	0,0024	0,062	0,0004	0,85
98632	0,0000	0,12	0,038	0.000	0,0009	0,0020	0,042	0,0001	0,90
97738	0,0000	0,14	0,030	0.000	0,0005	0,0022	0,039	0,0001	0,90

Fuente: Acerías de Colombia y Cia. ACESCO S.C.A.

Tabla 4: Composición química de Aceros Laminados en Frío

Designation	Composition, % Heat Analysis (Element Maximum Unless Otherwise Shown)													
	C	Mn	P	S	Al	Si	Cu <sup>#</sup>	Ni <sup>#</sup>	Cr <sup>#,C</sup>	Mo <sup>#</sup>	V	Cb	Ti	N
CS Type A <sup>D,E,F,G</sup>	0.10	0.60	0.030	0.035	...	...	0.20 <sup>H</sup>	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.008 <sup>I</sup>	...
CS Type B <sup>D</sup>	0.02 to 0.15	0.60	0.030	0.035	...	...	0.20 <sup>H</sup>	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.008 <sup>I</sup>	...
CS Type C <sup>D,E,F,G</sup>	0.08	0.60	0.10	0.035	...	...	0.20 <sup>H</sup>	0.20	0.15	0.06	0.008	0.008	0.008 <sup>I</sup>	...
DS Type A <sup>E,J</sup>	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 <sup>I</sup>	...
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 <sup>I</sup>	...
DDS <sup>F,G</sup>	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 <sup>I</sup>	...
EDDS <sup>K</sup>	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	...

Fuente: Norma ASTM A 1008.

### 5.3 TERCERA ETAPA: SELECCIÓN DE VARIABLES DE EXPERIMENTOS

Inicialmente, se tuvieron en cuenta los procesos de recocido en campana que anteriormente Acesco ha desarrollado para este tipo de material; cada una de las corridas realizadas se consideró que serian una guía para determinar la variación de las condiciones de operación, las cuales de nuestro interés serán el tiempo y la temperatura, para cargas futuras a recocer.

Básicamente, las temperaturas entre las que se desarrollaron los procesos fueron entre los 670°C y 700°C, teniendo como variables de respuesta el tamaño de grano y las propiedades mecánicas.

Tabla 5. Selección de Variables de Experimentos.

Corridas	Factor de Diseño							
	Temperatura Sostenimiento	Delta Temperatura	Tiempo de Sostenimiento	Variable de Salida	Endurecimiento Deformación	Fluencia Mpa	Resist. a la tracción 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	%

Variables de Respuesta

Luego de realizar la revisión del material disponible, se programó la primera corrida de recocido, teniendo en cuenta que cada carga estuviera conformada por rollos de diferentes espesores, a una misma temperatura, con el fin de establecer parámetros de comparación.

## 5.4 CUARTA ETAPA: EXPERIMENTO DE RECOCIDO

Para la primera corrida, según la disposición del material, se cargaron cuatro bases, que cumplieran con las condiciones de operación de la tabla 5. Cada carga fue conformada por cuatro rollos ubicados uno encima del otro separados por platos o placas convectoras, como se muestra en la figura 7. Luego se procedió a ubicar la campana de calentamiento, para iniciar el calentamiento del gas circundante, generando de esta manera la transferencia de calor por convección a cada uno de los rollos. El tiempo de sostenimiento se determinó que serían 5 horas como mínimo, valor que solo podría ser real siempre y cuando el horno no presentara ningún tipo de inconvenientes.

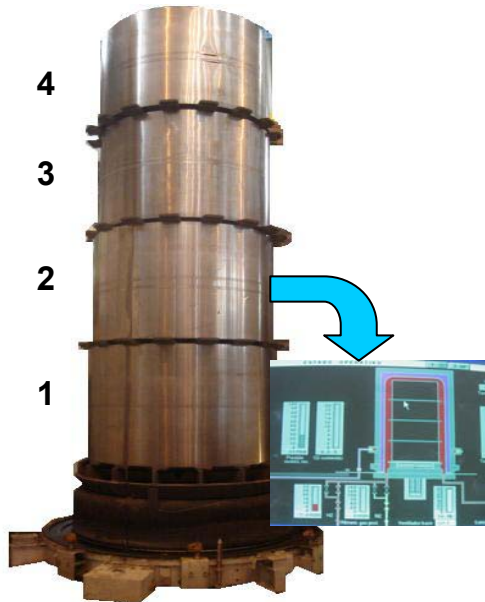
Tabla 6: Configuración de Rollos para primera corrida de recocido.

POSICION DEL ROLLO	Temp. : 680°C			Temp. : 690°C			Temp. : 700°C		
	Rollo	Espesor	Ancho	Rollo	Espesor	Ancho	Rollo	Espesor	Ancho
1	99605	0,70	1220	98645	0,70	1220	99603	0,70	1220
2	98643	0,60	1220	97753	0,60	1220	A1623	0,60	1220
3	99166	0,75	1220	98631	0,75	1220	99153	0,75	1220
4	97738	0,91	1220	99167	0,91	1220	98632	0,90	1220
Peso Carga	83525			91825			83425		

Autor.

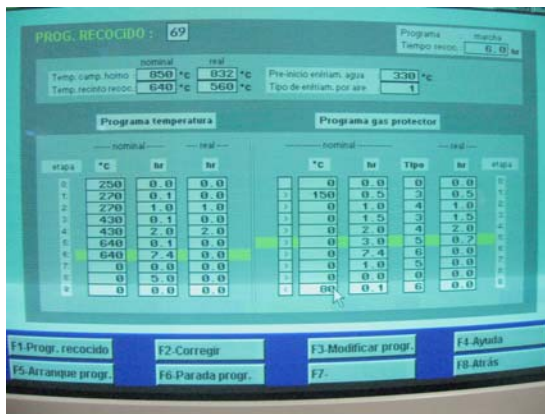
El monitoreo de temperatura en el material se realizó con la ayuda de termocuplas previamente calibradas, las cuales se ubicaron en el rollo que ocupa la posición número 2, pues en experimentos anteriormente realizados por ACESCO, se determinó que esta posición corresponde al punto más frío dentro del horno de campana. Adicionalmente, se insertó una termocupla en el interior de la campana, con el fin de monitorear la temperatura del gas, que indica la temperatura del proceso. El registro de datos fue posible mediante un sistema de adquisición de los mismos (data Q), instalado en la cabina de monitoreo de la Unidad de Recocido de ACESCO.

Figura 6: Esquema de Configuración de Rollos cargados en el Horno de Campana.

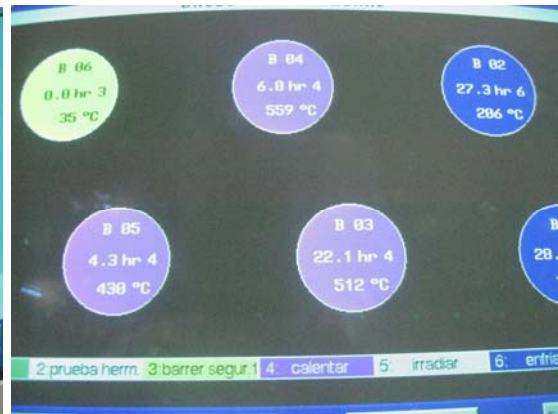


Autor.

Figura 7: Registro de Datos Sistema Data Q. a). Registro de Temperaturas y b). Registro de Ubicación de las Bases.



(a)



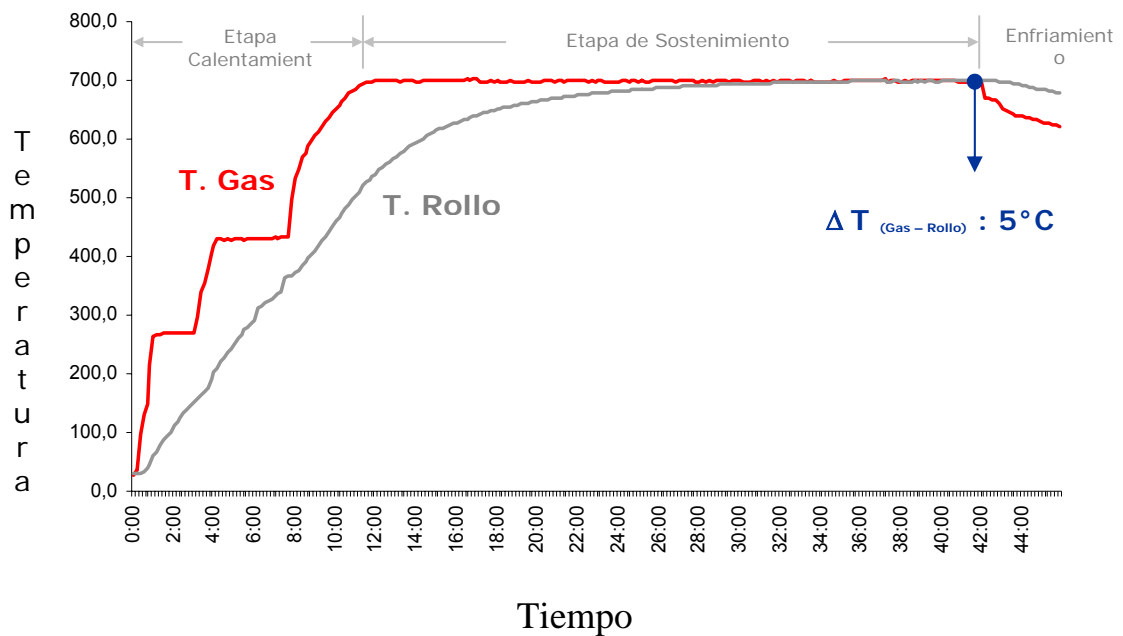
(b)

Autor.

En base al primer proceso de recocido, y de acuerdo a la curva de recocido esperada, para la segunda corrida se escogió la temperatura de 690°C, la cual fue el valor intermedio al anterior, para solamente rollos laminados de 0,60 mm.

de espesor, que junto con el de 0,45 mm, conforman el material de mayor interés para la comercialización en ACESCO. Cabe destacar que el monitoreo de la temperatura continuó, para todos los procesos, en el rollo de la posición número 2. Para este caso, el experimento quiso realizarse sin exigencias de tiempo de sostenimiento, simplemente, este se determinó de acuerdo a lo que tardaron la temperatura del rollo y la del gas en alcanzar el delta de 5°C entre sí, ya que es el delta recomendado que debe manejarse para recocidos de este tipo de material, cuando se busca que sus aplicaciones sean a procesos de conformado, como por ejemplo, el proceso de embutición.

Figura 8. Curva de recocido esperada.



Autor

Tabla 7: Configuración de Rollos para la segunda corrida de recocido.

POSICION DEL ROLLO	Temp : 690°C		
	Rollo	Espesor	Ancho
1	98642	0,60	1220
2	99602	0,60	1000
3	99606	0,60	1220
4	A1622	0,60	1220
Peso Carga	84045		

Autor

Finalmente, el material de 0,45 mm se llevó a proceso de recocido, considerando tres de las temperaturas propuestas en la tabla 5, de igual manera como se realizó la primera corrida. Debido a los ligeros pesos de los rollos de acero que se registraban, para este caso se eligió como tiempo de sostenimiento 3 horas, como mínimo, para cada una de las bases.

Tabla 8: Configuración de Rollos para la tercera corrida de recocido.

POSICION DEL ROLLO	Temp : 680°C			Temp : 690°C			Temp : 700°C		
	Rollo	Espesor	Ancho	Rollo	Espesor	Ancho	Rollo	Espesor	Ancho
1	A8811	0,45	1220	A2555	0,45	1220	A8803	0,45	1220
2	A8810	0,45	1220	A8806	0,45	1220	A8809	0,45	1220
3	A8804	0,45	1220	A8808	0,45	1220	A8802	0,45	1220
4	A8805	0,45	1220	A8801	0,45	1220	A8807	0,45	1220
Peso Carga	57925			60110			59415		

Autor

- **Equipo de Experimento. 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. Vista desde el exterior, en la siguiente pagina, la figura 9 muestra la campana de recocido empleada en ACESCO.

## 5.5 QUINTA ETAPA: TOMA DE MUESTRAS Y ENSAYOS MECÁNICOS PARA CARACTERIZACION DEL MATERIAL

Es importante resaltar que la caracterización tanto metalográfica como mecánica se realizó en las dos etapas de más interés de transformación del material, es decir, tanto en estado recocido como templado, para evaluar las propiedades mecánicas finales del Acero IF. Por lo tanto, al finalizar el proceso de recocido, se tomaron muestras de 1 metro de largo por 1220 mm de ancho, correspondientes a las primeras vueltas de los rollos para la determinación del tamaño de grano y la realización de los ensayos mecánicos. Para este trabajo

de grado se determinó que la caracterización y evaluación de la formabilidad de las láminas de Aceros IF, involucraría los siguientes ensayos:

- Ensayo de tensión para determinar Resistencia Máxima, Fluencia y Porcentaje de Elongación.
- Índice r (anisotropía Normal).
- Índice n (endurecimiento por deformación).
- Dureza.
- Determinación de Tamaño de Grano.

Lo anterior se realizaría también con el material luego de temper rolling.

Figura 9. Campana de recocido



Autor

**5.5.1 Ensayo de tensión (Norma ASTM E 8M) <sup>6</sup>.** Normalmente, este ensayo permite evaluar la mayoría de las propiedades de los metales y aleaciones, entre ellas el acero. La muestra metálica o probeta, de sección uniforme y conocida, se somete a una fuerza de tracción que va aumentando

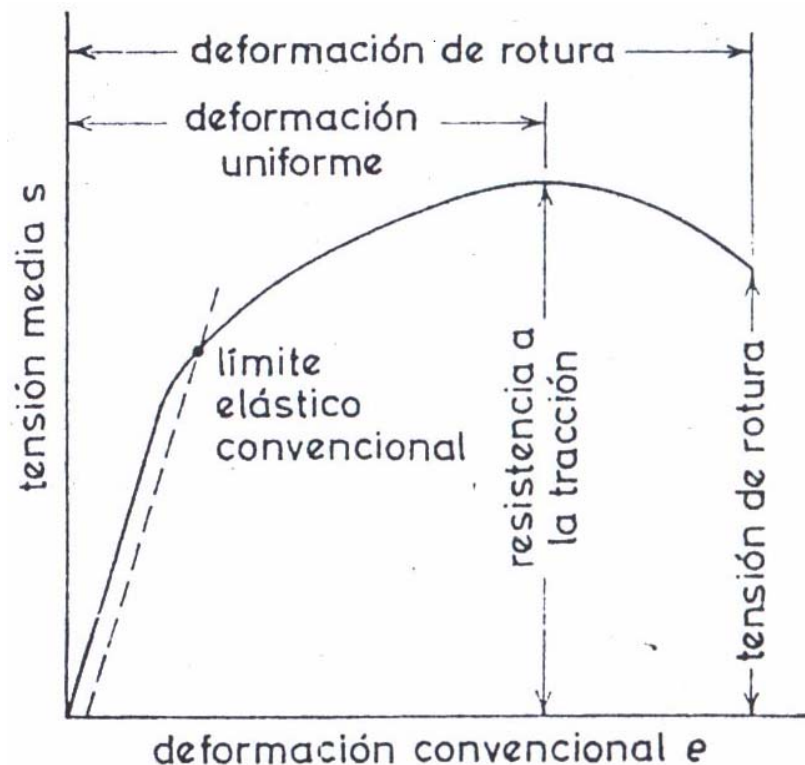
progresivamente. El objetivo de la prueba es hacer que la probeta se rompa en un periodo relativamente corto y a una velocidad constante. De aquí, se obtienen:

- Esfuerzo de fluencia convencional o límite elástico: ( $Y_S$ )

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.

En ausencia de un punto definido en la curva esfuerzo- deformación (figura 11) donde termine la deformación elástica y empiece la deformación plástica, el esfuerzo de fluencia es indicado por la Norma ASTM E 8M, como el esfuerzo para el que se produce una cantidad definida de deformación plástica. El punto de fluencia (Yield Point, YP) se define cuando ha tenido lugar una deformación plástica del 0.2%, y se determina a partir de la curva producto del ensayo de tracción.

Figura 10. Curva esfuerzo – deformación



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

- Resistencia máxima a la tensión:

En el acero laminado en frío, después de un cierto grado de deformación plástica se produce una localización o concentración de la deformación, que implica una disminución del área de la sección transversal, conocida como estricción, es decir, si la muestra desarrolla un decrecimiento localizado en su sección (un estrangulamiento de su sección antes de la rotura), la carga decrecerá al aumentar la deformación hasta que ocurra la fractura puesto que la tensión se determina usando la sección inicial de la muestra. Es ahí donde se considera que el material ha fallado, puesto que la fractura final se alcanzará a esfuerzos mucho más bajos.

- Porcentaje de elongación:

La cantidad de elongación proporciona un valor de ductilidad del metal, expresada como % de elongación. En el caso de los materiales en forma de lámina, se empieza con una longitud calibrada de 50 mm. Se considera que a mayor ductilidad, mayor es el porcentaje de elongación.

El porcentaje de elongación en 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, según la norma, será menor al 38%.

- **Equipo empleado. 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 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 unitaria 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 11. Máquina Universal de Ensayos



Autor

Cabe destacar que éste fué el equipo empleado para la determinación del Esfuerzo de Fluencia, la Resistencia Máxima, el Porcentaje de Elongación, el Índice  $r$  o anisotropía normal y el índice  $n$  o exponente de endurecimiento por deformación.

**5.5.2 Ensayo de anisotropía (Norma ASTM E517) <sup>7</sup>.** Este ensayo se realiza con el fin de cuantificar el fenómeno de anisotropía normal o coeficiente de Lankford o índice  $r$  presente en una lámina de acero. Su valor se obtiene de la relación entre las deformaciones en el ancho y en el espesor (1).

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

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

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

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

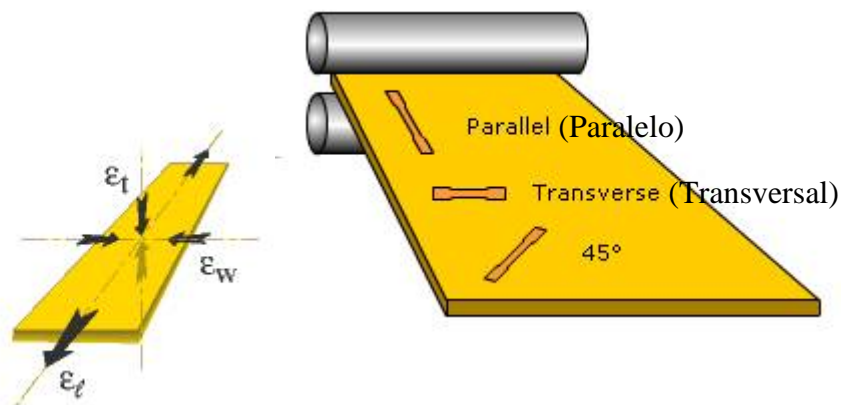
Donde:

$\varepsilon_w$ ,  $\varepsilon_l$  y  $\varepsilon_t$  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.

Figura 12: Esquema de Toma de muestras para determinación del Índice r



Fuente: <http://www.steeluniversity.org/content/html/eng/default.asp?catid=18&pageid=2081271357>

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, como lo muestra la figura 13. Así, se obtiene el valor de r en cada caso y un valor promedio r definido por la ecuación (4), donde r<sub>0</sub>, r<sub>45</sub> y r<sub>90</sub> 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 lámina toma diferentes valores, por lo cual se habla de anisotropía planar ( $\Delta r$ ), la cual hace referencia a la máxima variación de r sobre el plano de la lámina. Esta es calculada mediante la ecuación (5).

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

**5.5.3 Ensayo de coeficiente de endurecimiento por deformación (Norma ASTM E646)** <sup>8</sup>. La primera parte del diagrama esfuerzo-deformación es una región lineal que representa el comportamiento elástico del metal. Esta región, descrita por la ley de Hook, indica que 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 Hollomon (6) define la deformación plástica, en el diagrama de esfuerzo-deformación:

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

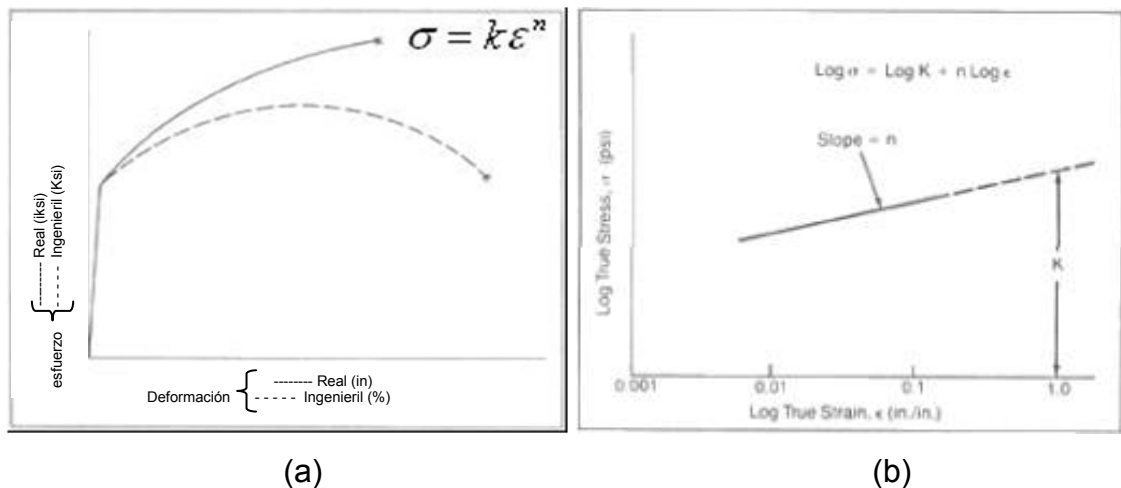
Donde:

$\sigma$  representa el esfuerzo, real

$k$  es una constante propia del material,

$\varepsilon$  es la deformación real y  $n$  es el coeficiente de endurecimiento por deformación.

Figura 13. Exponente de endurecimiento por deformación. a) Curva esfuerzo-deformación y b). Forma de representación para la cual  $n$  es una pendiente.



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

De la figura 13. 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 un ensayo de tensión y calculando por el método de ajuste de los mínimos cuadrados la pendiente de la recta resultante.

**5.5.4 Ensayo de dureza.** El ensayo de dureza mide la resistencia de un material a la penetración de un punzón o un indentador. En el más común de

los casos, este penetrador se conoce como durómetro, que normalmente, consta de un balín, 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 indica una medida de la dureza del acero.

Debido a 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.

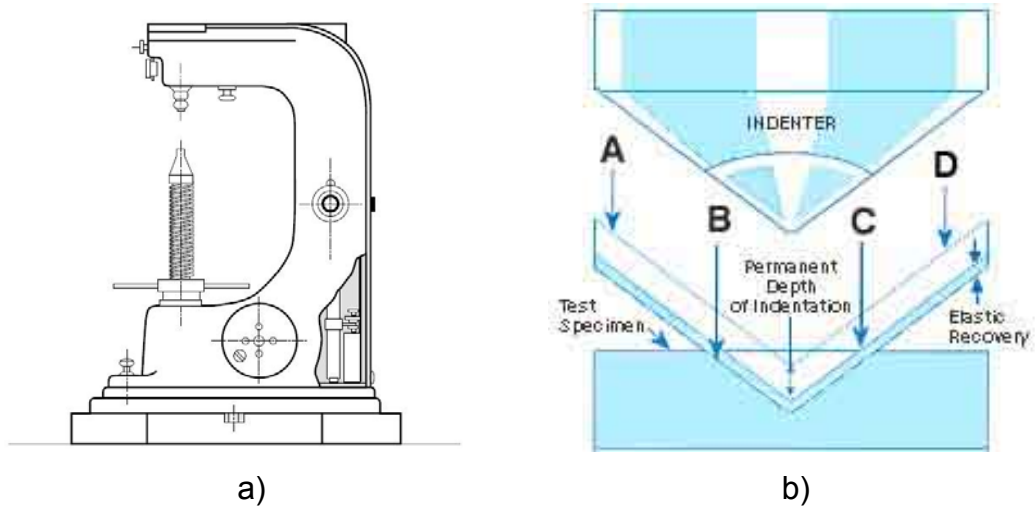
El método Rockwell es de gran importancia debido a que las medidas de dureza para este proyecto fueron registradas en esta escala, específicamente, Rockwell B (HRB).

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

- Bolas de 1/8" y 1/16"
- 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 14b. 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 14. Equipo y mecanismo de penetración para ensayo de dureza. a) Durómetro y b) Mecanismo de ensayo Rockwell



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

- **Equipo empleado. Durómetro Wilson/ Rockwell serie 600.** El durómetro modelo 643T de la serie 600, esta 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 15. Durómetro Wilson/ Rockwell serie 600.



Autor

**Análisis de Varianza de las propiedades mecánicas.** Al terminar las pruebas mecánicas, de las tablas de resumen de propiedades que se mostrarán en los resultados, se tomaron los datos de los ensayos realizados con sus respectivos resultados para el Acero IF laminado en frío de 0.45mm, 0.60mm y 0.70mm, los cuales se han venido mencionando en el transcurso del desarrollo del trabajo, como los de mayor interés de comercialización para Acesco. Utilizando el Software estadístico Minitab, con el fin de obtener las variables de respuesta (propiedades mecánicas), que se hacen significativas a los cambios de temperatura a las que se realizaron los diferentes tratamientos térmicos de recocido.

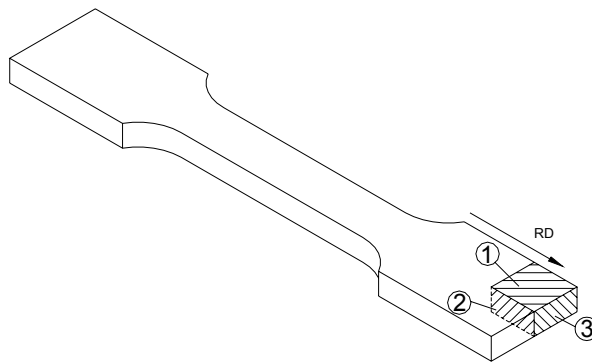
El criterio que determina si una propiedad se hace significativa o no ante el cambio de temperatura, son dos condiciones que parten de tres valores que proporciona el análisis, los cuales son un F subcritico ( $F^*$ ), un  $F_o$  y P. El software establece, que al ser comparados, y encontrar que ( $F^*$ ) sea menor que  $F_o$  ( $F^* < F_o$ ), y a su vez,  $F_o$  sea mayor que P ( $F_o > P$ ), la variable de estudio, en este caso, la propiedad mecánica analizada, será significativa a los cambios de temperatura. De no cumplirse alguna de las dos condiciones, se entenderá que la variable en cuestión, no se hace significativa ante los cambios de temperatura.

**5.5.5 Análisis Metalográfico para Determinación de Tamaño de grano (Norma ASTM E 112) <sup>9</sup>.** A partir de una muestra de tracción orientada a  $0^\circ$  con respecto al sentido de laminación para cada rollo, se extrajeron muestras para metalografía según la configuración mostrada en la figura 16, con el fin de analizar la micro-estructura en 3 diferentes planos.

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.

Figura 16. Planos de corte de muestras para metalografía. La flecha indica el sentido de laminación RD y se muestran los planos de corte RD (1), longitudinal (2) y transversal (3).



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 mecanográficas 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. 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.
- Desbaste Final: Se realiza de la misma forma que los anteriores, con papel de lija No. 600.

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 mas 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 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.

#### **Equipos empleados para el Análisis Metalográfico.**

- **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 17. 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 está provista de un sistema hidráulico que provee la compresión necesaria para producir un rango de tamaños de especímenes.

Figura 18. 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 19. 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 20. Pulidora metalográfica



- **Microscopio óptico OLYMPUS modelo PMES.** El microscopio óptico marca Olympus, 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 1000 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 21. Microscopio óptico



## **5.6 SEXTA ETAPA: RECOPIACION Y ANÁLISIS DE RESULTADOS**

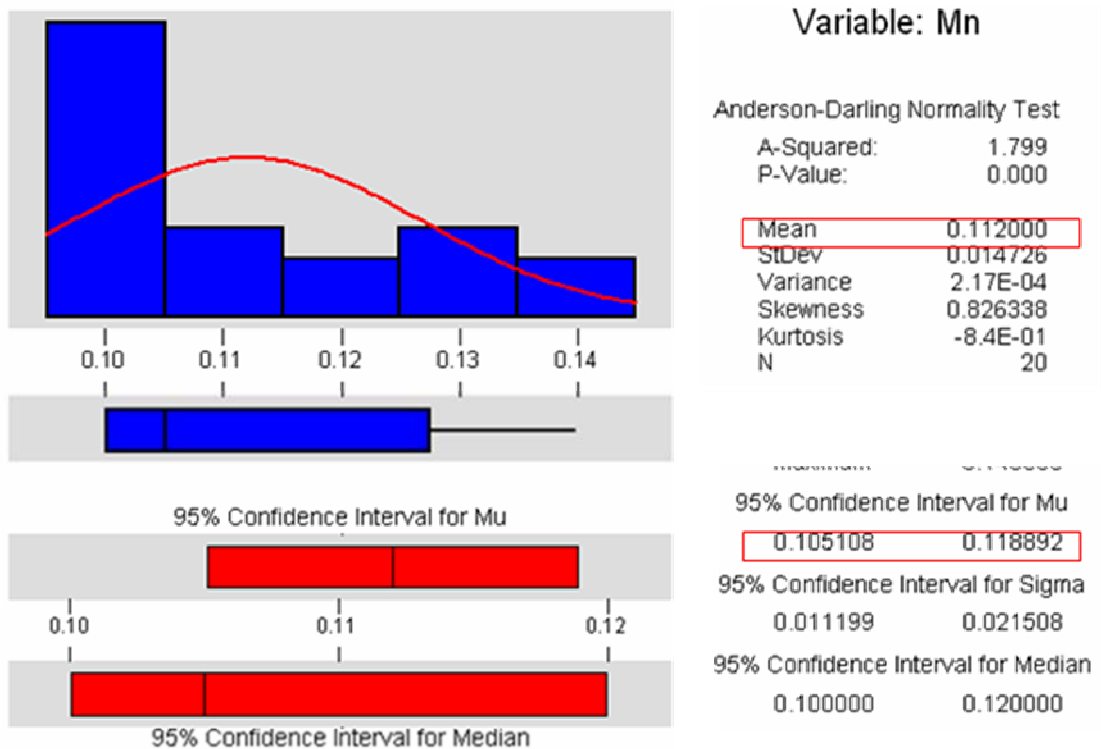
Con el fin de determinar la calidad del material, según los resultados de las pruebas mecánicas, se realizó de acuerdo a las normas establecidas la caracterización del material obtenido, y por ende, la socialización de resultados, que se mostraran a continuación.

## 6. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

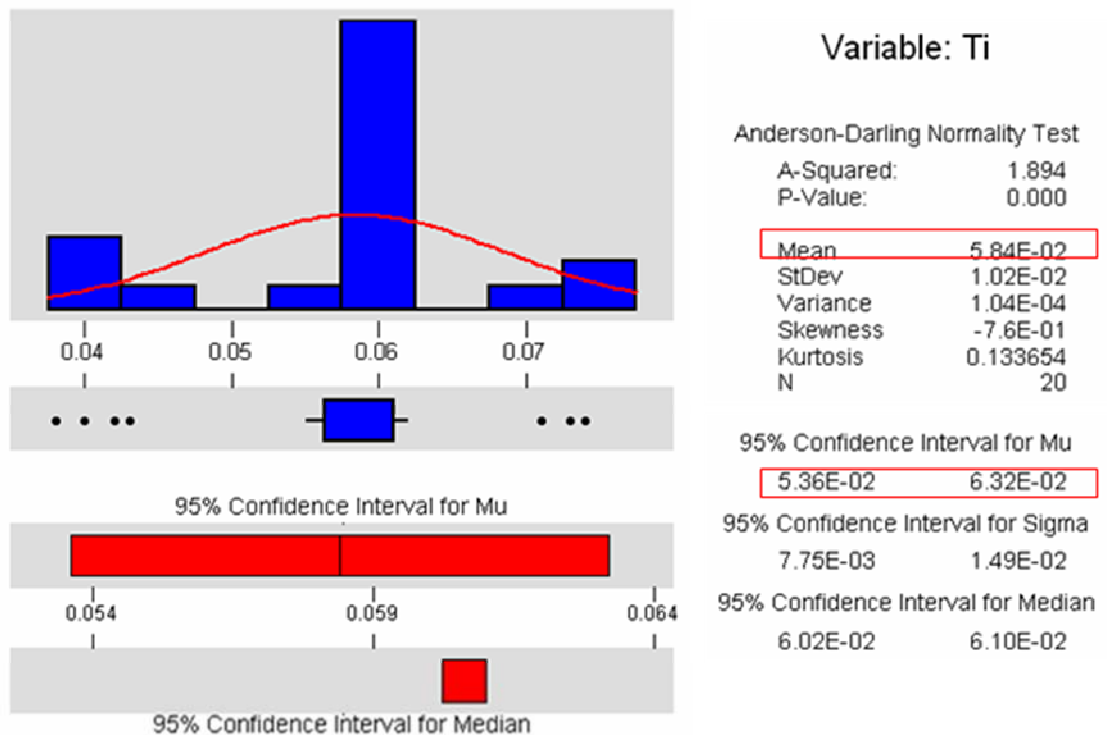
### 6.1 ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA COMPOSICIÓN QUÍMICA

Para este análisis se seleccionaron láminas de los espesores de mayor interés (0,45mm. y 0,60 mm), de las cuales se tomó la información de su composición química directamente de la hoja de vida del proveedor (Tabla 3) ingresada a la base de datos de inventarios de ACESCO. Empleando como herramienta el Software Estadístico Minitab, se obtuvo:

Figura 22. Análisis descriptivo de la composición Química. a). para el Manganeso, y b). para el Titanio.



(a)



(b)

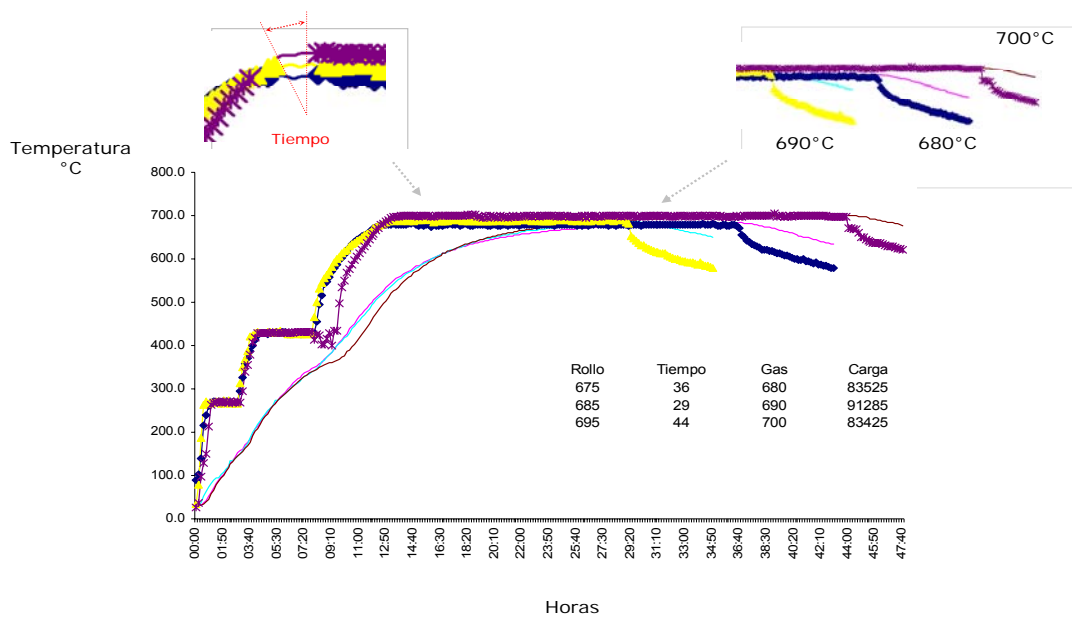
Los elementos seleccionados fueron el manganeso y el titanio, el primero por ser, luego del carbono, el elemento aleante de mayor importancia en los Aceros con fines de aplicaciones a procesos de conformado, y el Titanio, por ser un estabilizador de los elementos intersticiales. De esta manera, la figura 22a), indica que el valor medio se encuentra a un porcentaje en peso de 0,11 y el 95% de confiabilidad de los resultados se encuentran en un rango entre 0,11 y 0,12. En el caso del Titanio, el valor medio corresponde a 0,06, con un 95% de confiabilidad de los datos en un rango entre 0,05 y 0,06. Estos datos indican que efectivamente son los rangos en los que se encuentran los porcentajes en peso, de acuerdo a la hoja de vida del producto.

## 6.2 PERFILES DE TEMPERATURA OBTENIDOS DE LOS PROCESOS DE RECOCIDO EN CAMPANA DEL MATERIAL IF

Acorde con lo comentado en el desarrollo experimental, referente a la experiencia en el horno de recocido en campana, se obtuvieron una serie de resultados que permitieron conocer el comportamiento de la temperatura de los rollos de acero laminado en frío dentro del horno. Estos resultados permitieron conocer, desde un punto más específico, las variables reales involucradas dentro del proceso de recocido de recristalización, y de igual manera, suministraron una fuente de variación al ciclo ideal, dando la posibilidad de obtener distintos tipos de ciclos (Temperatura – Tiempo) para poder evaluar los indicadores resistentes y dúctiles en función de encontrar la mejor configuración para obtener las propiedades destinadas en el Acero IF para sus aplicaciones a los procesos de conformado.

### 6.2.1 Primera Corrida: Espesores de 0,60mm, 0,70mm, 0,85mm y 0,90mm.

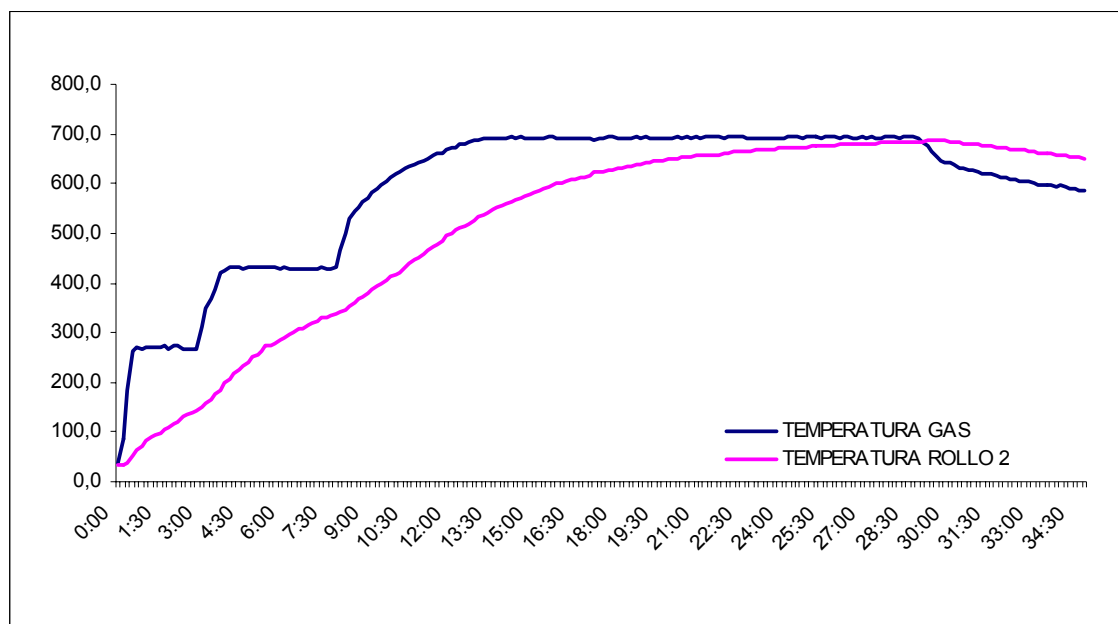
Figura 23. Curva de recocido de Material IF varios espesores.



La Figura 23, es el resultado del registro permanente de las temperaturas de las bobinas que ocupan la posición 2 en la base del horno de campana. Por medio de la curva obtenida se aseguró que tanto el gas como la bobina monitoreada para cada temperatura, siguieran el diseño de la prueba sugerida. La carga sometida a 690°C, por su peso, hace que el acero se acelere mas en encontrar la temperatura real del recinto, es decir, el tiempo que tarda en llegar al delta de 5°C entre el rollo y el gas es menor, comparada con las cargas menores recocidas a 680°C y 690°C. En el caso del tiempo que tardan el acero para encontrar el sostenimiento, es prácticamente igual para las tres temperaturas a las cuales fue llevado el proceso, entre 12 y 13 horas. El tiempo total del proceso fue: Para 680°C, 36 horas; para 690°C, 29 horas, y para 700°C, 44 horas.

## 6.2.2 Segunda Corrida: Espesor de 0,60mm

Figura 24: Curva de recocido de Material IF, espesor de 0,60 mm.

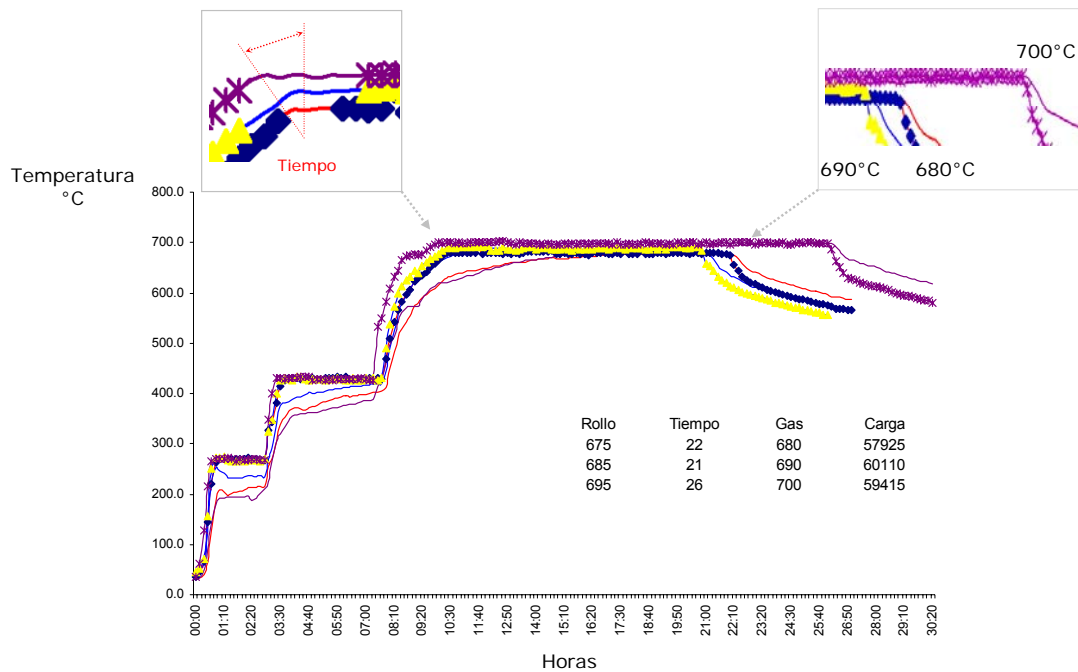


En el proceso de recocido realizado solo para láminas de acero IF de espesor de 0,60 mm, con carga de 84,045 Toneladas, el tiempo de sostenimiento inició, de igual manera que la primera corrida, alrededor de las 13 horas, pero

desafortunadamente, el horno tuvo una serie de inconvenientes eléctricos durante el proceso, razón por la cual, el tiempo que se tardaron el gas (el hidrógeno) y el rollo monitoreado en alcanzar el delta de 5°C fué de aproximadamente 16 horas, luego de las cuales, se cambió la campana de calentamiento por la de enfriamiento por espacio de 5 horas. En total, esta corrida duró 34 horas y 50 minutos.

### 6.2.3 Tercera corrida: Espesor de 0,45 mm

Figura 25: Curva de Recocido Material IF, espesor 0,45 mm.



Para el material IF de 0,45 mm. de espesor, de manera similar que para el proceso de recocido realizado para varios espesores, el tiempo de las diferentes cargas en llegar al sostenimiento, fue muy cercano, alrededor 10 horas. Por tratarse de cargas livianas, los tiempos totales del proceso fueron mucho más cortos que en las corridas anteriores, siendo estos, 22 horas para 680°C, 21 horas para 690°C (menor en mayor carga) y 26 horas para 700°C. Sin embargo, los tiempos de sostenimiento fueron mayores que en los casos

anteriores, siendo de 17 horas para 680°C, 16 horas para 690°C y 23 horas para 700°C. El enfriamiento tardó aproximadamente 6 horas, para todos los casos.

### 6.3 CARACTERIZACION MECANICA DEL ACERO IF RECOCIDO EN CAMPANA.

Las propiedades mecánicas del acero IF recocido en campana, antes y después del endurecimiento por laminación superficial, se reportan a continuación, para cada una de las corridas realizadas, a las diferentes temperaturas, como parte de la metodología propuesta.

#### 6.3.1 Determinación de propiedades mecánicas fundamentales

Tabla 9. Resumen caracterización primera corrida material IF

BOBINA	T. RECOCIDO °C	DUREZA (HRB)	r	n	$\Delta r$	ELONG. %	YP(Mpa)	Ts(Mpa)
99605	680	45,0	1,6	0,15	0,11	42	250	303
99166	680	41,6	1,7	0,15	-0,09	39	243	309
97738	680	48,2	1,4	0,17	-0,08	37	260	331
98643	680	50,3	1,8	0,12	-0,01	36	267	310
97753	690	46,4	1,6	0,17	0,19	38	260	327
98645	690	41,8	1,3	0,20	0,27	40	243	323
98631	690	44,3	2,0	0,20	-0,20	40	245	318
99167	690	47,5	1,2	0,19	0,19	42	253	321
99603	700	36,6	1,7	0,24	0,32	44	194	304
98632	700	31,2	1,8	0,29	0,54	54	149	278
A1623	700	32,5	1,9	0,25	0,18	50	138	271
99153	700	43,6	1,5	0,17	-0,02	45	263	316

Tabla 10. Resumen caracterización primera corrida material IF con Temple.

BOBINA	T. RECOCIDO °C	DUREZA (HRB)	r	n	$\Delta r$	ELONG. %	YP (Mpa)	Ts (Mpa)	% Reducción
98643	680	39,2	2,1	0,17	0,27	40	216	299	79.8
99605	680	35,1	1,9	0,21	-0,29	46	189	282	76.3
97753	690	38,9	1,9	0,19	0,10	35	251	322	79.8
98645	690	32,9	1,9	0,21	0,28	48	186	282	76.3
99603	700	34,7	2,4	0,21	0,77	47	191	276	76.3
98632	700	34,8	1,8	0,20	0,31	50	192	282	78.0
A1623	700	32,4	2,1	0,21	0,48	43	188	274	79.7

Tabla 11. Resumen caracterización Segunda corrida material IF

BOBINA	T. RECOCIDO °C	DUREZA (HRB)	r	n	$\Delta r$	ELONG. %	YP(Mpa)	Ts(Mpa)
98642	690	36,7	1,7	0,23	0,19	43	201	319
99606	690	33,0	1,7	0,25	0,42	40	177	313

Tabla 12. Resumen caracterización Segunda corrida material IF con Temple.

BOBINA	T. RECOCIDO °C	DUREZA (HRB)	r	n	$\Delta r$	ELONG. %	YP (Mpa)	Ts (Mpa)	% Reducción
98642	690	35,9	1,9	0,18	0,21	38	204	274	79.8
99606	690	41,2	2,1	0,20	0,44	43	225	306	79.8

Tabla 13. Resumen caracterización Tercera corrida material IF con Temple.

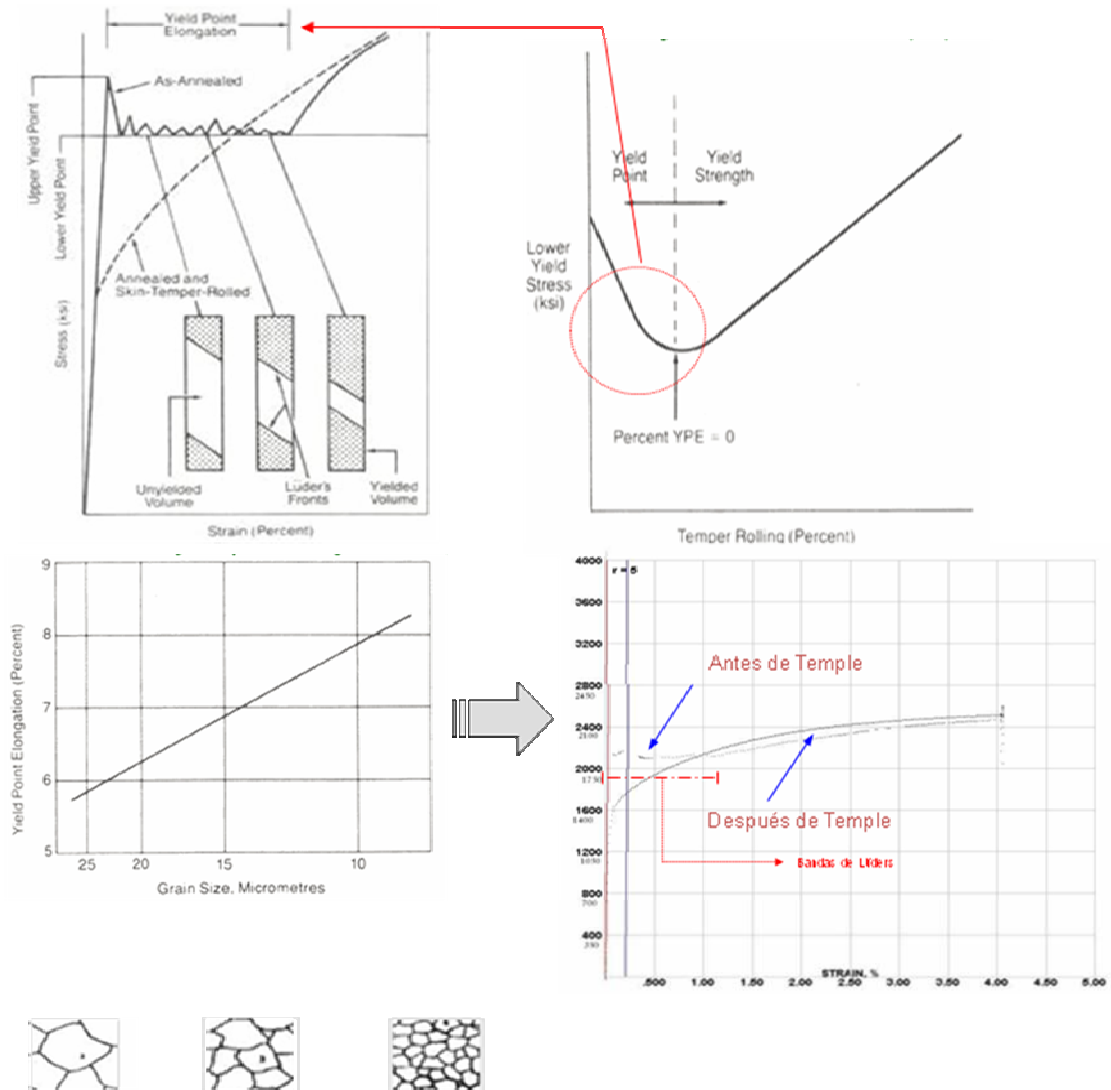
BOBINA	T. RECOCIDO °C	DUREZA (HRB)	R	n	$\Delta r$	ELONG. %	YP (Mpa)	Ts (Mpa)	% Reducción
A8808	680	40,3	2,0	0,21	0,31	42	224	310	84,7
A8810	680	43,7	2,5	0,21	0,04	41	211	303	84,7
A2555	680	43,4	2,1	0,19	0,19	38	221	299	84,7
A8801	680	39,3	2,2	0,17	0,28	42	238	304	93.0
A8803	690	39,7	2,0	0,20	-0,01	38	232	302	93.0
A8804	690	43,0	2,2	0,20	0,32	43	213	295	73.0
A8807	690	40,8	2,4	0,21	0,42	45	204	288	73.0
A8805	690	39,4	2,1	0,20	-0,08	40	209	293	73.0
A8811	700	50,4	2,0	0,12	-0,03	29	243	275	73.0
A8806	700	40,5	2,0	0,25	0,11	44	196	284	73.0
A8802	700	42,2	2,0	0,24	0,04	32	224	302	93.0

Para la caracterización mecánica del Acero IF luego de temple, se seleccionaron algunas de las muestras, para analizar los resultados:

Las propiedades mecánicas determinadas a partir del ensayo de tensión (especificado en la norma ASTM E 8M) para el acero IF evidencian el comportamiento mencionado en la teoría, donde se dice que como producto del recocido, la lámina recupera las propiedades mecánicas perdidas durante el proceso de laminación en frío. Según los resultados obtenidos, con el temper rolling disminuye la dureza, el % de elongación, el esfuerzo de fluencia ( $Y_p$ ) y el coeficiente de endurecimiento por deformación (índice  $n$ ). Lo contrario sucede con el coeficiente de anisotropía normal (índice  $r$ ), la anisotropía planar ( $\Delta r$ ), la Resistencia Máxima a la Tensión ( $T_s$ ), que aumentan luego del laminado de temple.

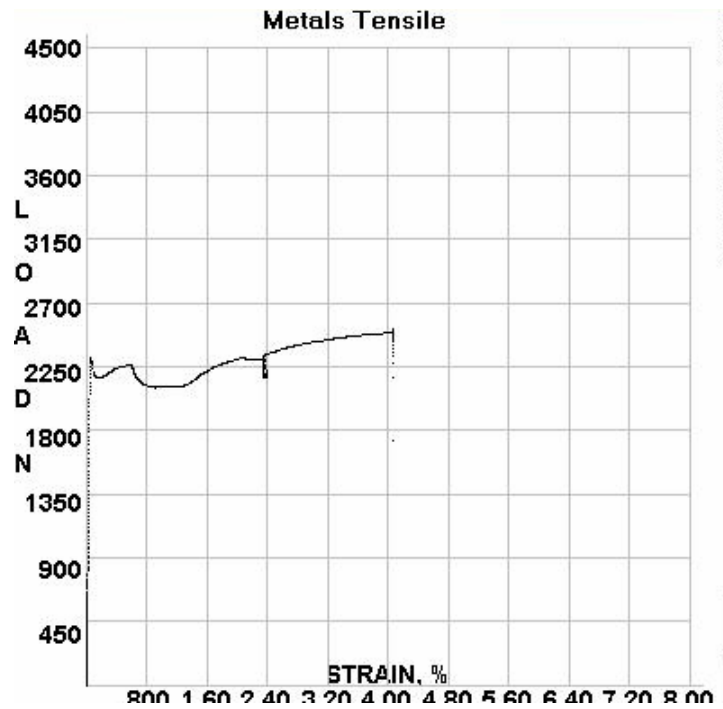
También se observa, como la eliminación de la discontinuidad en el punto de fluencia de la lámina recocida, afecta significativamente estos resultados. La existencia de la zona de elongación del punto de fluencia (YPE, Yield Point Elongation), se describe como una deformación no homogénea durante el conformado de la lámina.

Figura 26. Elongación del punto de fluencia.

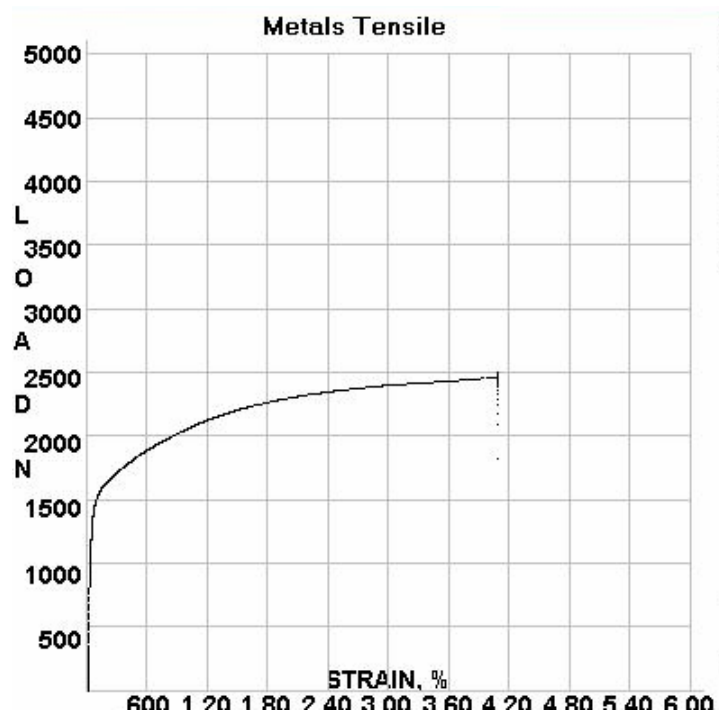


Partiendo de lo anterior, puede entenderse como el temper rolling hace que la elongación del punto de fluencia sea menor en curva esfuerzo deformación, haciendo menos brusco el cambio de la zona elástica a la zona plástica. La figura 27 describe este hecho, tomando como ejemplos tres muestras de acero IF laminado en frío y recocido a 680°C, 690°C y 700°C, de espesor 0,60 mm. A 680°C, la elongación del punto de fluencia ( $Y_p$ ) se muestra mayor en estado recocido y el  $Y_p$  disminuye con el temple; a 690°C esta elongación se hace menor, aumentando el  $Y_p$  luego del temple; para 700°C, si existe incremento del  $Y_p$  luego del laminado de temple.

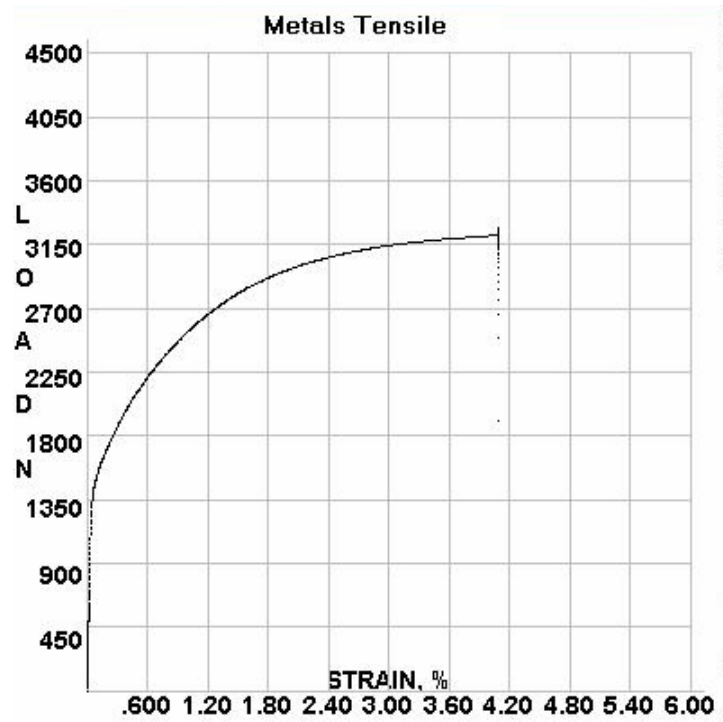
Figura 27. Elongación del punto de fluencia para el Acero IF de 0,60 mm de espesor. a) y b) para 680°C; c) y d); para 690°C; e) y f) para 700°C.



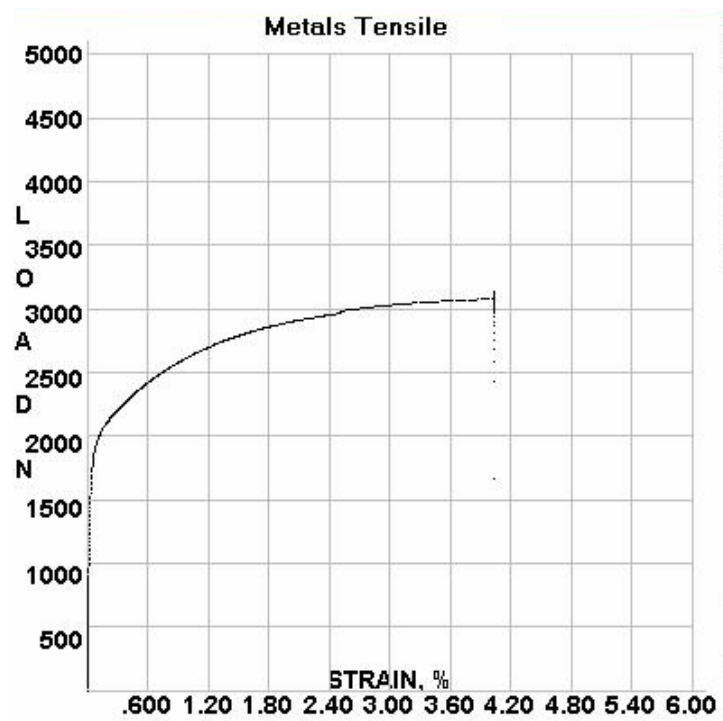
(a) Lámina 98643. Antes de Temper Rolling.



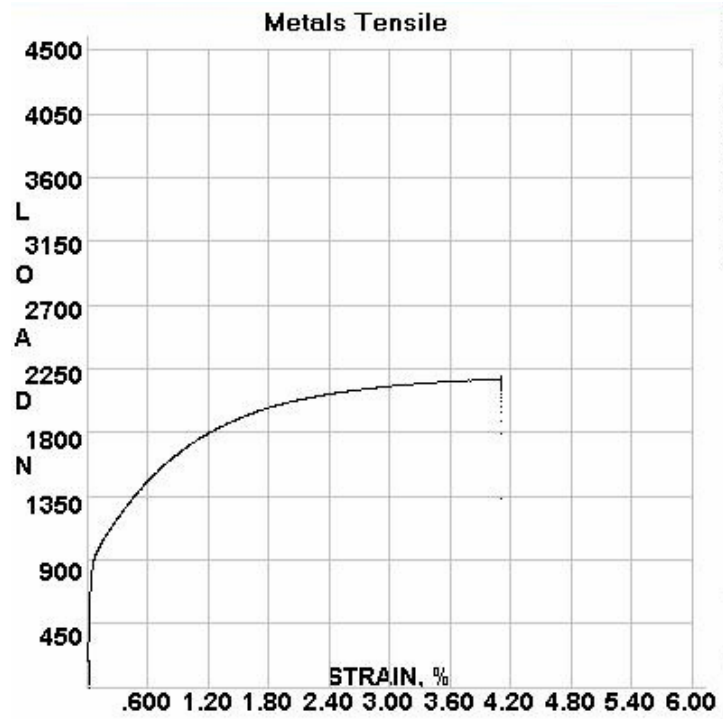
(b) Lámina 98643. Después de Temper Rolling.



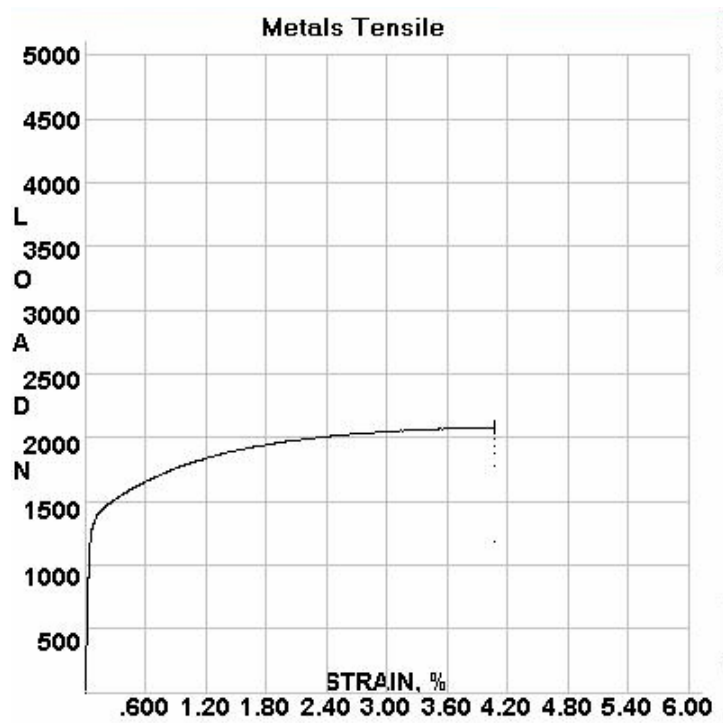
(c) Lámina 97753. Antes de Temper Rolling



(d) Lámina 97753. Después de Temper Rolling



(e) Lámina A1623. Antes de Temper Rolling



(f) Lámina A1623. Después de Temper Rolling

Si el temper rolling sobrepasa el valor para el cual YPE (elongación del punto de fluencia) es igual a cero, las propiedades mecánicas finales del acero serán muy diferentes a las esperadas, es decir al disminuir la elongación del punto de fluencia lo que se espera es que a su vez disminuya la resistencia máxima y la dureza mientras que el % de elongación aumente.

En general, las tablas resúmenes muestran que la mayoría de los valores obtenidos, más específicamente, luego de temple, hacen que sea posible someter el material a aplicaciones de embutición.

### 6.3.2 Determinación del Índice $r$

Como se ha venido mencionando, lo que se busca en el acero IF es mejorar sus procesos de transformación para analizar la posibilidad de implementarlos a procesos de embutición, cuya capacidad se representa por el coeficiente de anisotropía  $r$  de Lankford, que según la norma ASTM A 1008, es la propiedad de mayor importancia para los procesos de conformado. Este índice fué medido en las direcciones  $r_0$ ,  $r_{45}$  y  $r_{90}$  mediante la ecuación (1); 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 está siendo embutido.

Tabla 14. Determinación de la anisotropía normal para la primera corrida antes y después de temper rolling

BOBINA	T. RECOCIDO °C	$r$ (sin temple)	$r$ (con temple)
98643	680	1,8	2,1
99605	680	1,6	1,9
97753	690	1,6	1,9
98645	690	1,3	1,9
99603	700	1,7	2,4
98632	700	1,8	1,8
A1623	700	1,9	2,1

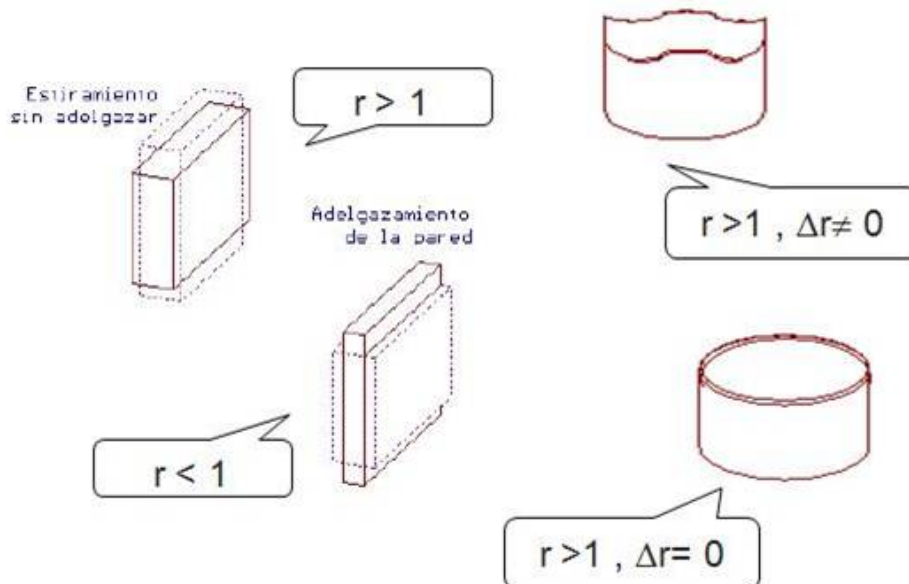
Tabla 15. Determinación de la anisotropía normal para la segunda corrida antes y después de temper rolling

BOBINA	T. RECOCIDO °C	r (sin temple)	r (con temple)
98642	690	1,7	1,9
99606	690	1,7	2,1

Tabla 16. Determinación de la anisotropía normal para la tercera corrida después de temper rolling

BOBINA	T. RECOCIDO °C	r (sin temple)
A8808	680	2,0
A8810	680	2,5
A2555	680	2,1
A8801	680	2,2
A8803	690	2,0
A8804	690	2,2
A8807	690	2,4
A8805	690	2,1
A8811	700	2,0
A8806	700	2,0
A8802	700	2,0

Figura 28. 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  $\Delta r$  lo más cercano a cero. En estado

recocido el material posee menor tendencia a la formación de orejas, que en el acero cuando ya ha sido templado.

### 6.3.3 Determinación del índice n

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 más 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.

Tabla 17. Determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación antes y después de temper rolling para la primera corrida de recocido

BOBINA	T. RECOCIDO °C	n (sin temple)	n (con temple)
98643	680	0,12	0,17
99605	680	0,15	0,21
97753	690	0,17	0,19
98645	690	0,20	0,21
99603	700	0,32	0,21
98632	700	0,29	0,20
A1623	700	0,25	0,21

Tabla 18. Determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación antes y después de temper rolliing para la segunda corrida de recocido

BOBINA	T. RECOCIDO °C	n (sin temple)	n (con temple)
98642	690	0,23	0,18
99606	690	0,25	0,20

Tabla 19. Determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación después de temper rolling para la tercera corrida de recocido

BOBINA	T. RECOCIDO °C	n (sin temple)
A8808	680	0,21
A8810	680	0,21
A2555	680	0,19
A8801	680	0,17
A8803	690	0,20
A8804	690	0,20
A8807	690	0,21
A8805	690	0,20
A8811	700	0,12
A8806	700	0,25
A8802	700	0,24

Este índice fue calculado mediante el uso de la herramienta del software con el que cuenta la maquina universal de ensayos.

#### 6.3.4 Porcentaje de Reducción

El laminado en frío tiene por objeto reducir el espesor del acero laminado en caliente hasta un máximo de reducción del 90 % del espesor inicial, bajo la aplicación de fuerzas de tensión y compresión con aplicación de abundante lubricación para minimizar las cargas y el desgaste de los rodillos. La deformación aplicada tiene por efecto que los indicadores de resistencia, carga de rotura, límite elástico y dureza aumentan en tanto que los indicadores de plasticidad, alargamiento y estricción, disminuyen. Este porcentaje de reducción se logró en casi todos los rollos, excepto en un rollo recocido a 680°C, uno a 690°C y otro a 700°C.

Tabla 20. Determinación del porcentaje de reducción para la primera corrida de recocido.

Bobina	Dimensión inicial	Dimensión final	% Reducción
	(Espesor x Ancho)	(Espesor x Ancho)	
	mm2	mm2	
99603	3.00 x 1235	0,71 * 1220	76,3
99605	3.00 x 1235	0,71 * 1220	76,3
98632	3.25 x 1235	0,91 * 1220	78,0
A1623	3.00 x 1235	0,61 * 1220	79,7
97753	3.00 x 1235	0,61 * 1220	79,8
98645	3.00 x 1235	0,71 * 1220	76,3
98631	3.25 x 1235	0,76 * 1220	83,0

Tabla 21. Determinación del porcentaje de reducción para la segunda corrida de recocido.

Bobina	Dimensión inicial	Dimensión final	% Reducción
	(Espesor x Ancho)	(Espesor x Ancho)	
	mm2	mm2	
99606	3.00 x 1235	0,60 * 1220	79,8
98642	3.00 x 1235	0,60 * 1220	79,8

Tabla 22. Determinación del porcentaje de reducción para la tercera corrida de recocido.

Bobina	Dimensión inicial	Dimensión final	% Reducción
	(Espesor x Ancho)	(Espesor x Ancho)	
	mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	
A8808	3.00 x 1235	0,46 * 1220	84,7
A8810	3.00 x 1235	0,46 * 1220	84,7
A8803	3.25 x 1235	0,46 * 1220	93,0
A8801	3.25 x 1235	0,46 * 1220	93,0
A8807	2.65 x 1235	0,46 * 1220	84,7
A2555	3.00 x 1235	0,46 * 1220	84,7
A8804	2.65 x 1235	0,46 * 1220	73,0
A8806	2.65 x 1235	0,46 * 1220	73,0
A8805	2.65 x 1235	0,46 * 1220	73,0
A8811	3.00 x 1235	0,46 * 1220	84,7
A8802	3.25 x 1235	0,46 * 1220	93,0

#### 6.4 CLASIFICACION DE LA CALIDAD DEL PRODUCTO OBTENIDO SEGÚN LA NORMA ASTM A1008

Utilizando como herramienta el Software estadístico Minitab, se realizó la respectiva clasificación de las corridas, comparando sus propiedades mecánicas con los valores sugeridos por la Norma (Tabla 4). A nivel industrial, los ANOVAS (análisis de varianza) están orientados a las aplicaciones que giran en torno al control y la mejora de la calidad, comparando dos o más medidas significativas en un proceso, en este caso, evaluando la probabilidad de las propiedades mecánicas del acero IF, después de temper rolling, que le permitan al material clasificar como material de embutido, embutido profundo o embutido extra profundo.

### 6.4.1 Clasificación de la Primera y Segunda Corrida

Tabla 23. Clasificación por propiedades de la Primera y Segunda Corrida de Recocido.

T. RECOCIDO °C	DIMENSIONES mm	r	n	E %	YP Mpa	TS Mpa	DUREZA HRB	Clasificación
680	0,70	1,9	0,21	46	189	282	35,1	DDS
680	0,60	2,1	0,17	40	216	299	39,2	DS
690	0,70	1,9	0,21	48	186	282	32,9	DDS
690	0,60	1,9	0,18	38	204	274	35,9	DS
690	0,60	2,1	0,20	43	225	306	41,2	DS
700	0,70	2,4	0,21	47	191	276	34,7	DDS
700	0,60	2,1	0,21	43	188	274	32,4	DDS
ASTM A 1008	DS	1.3 - 1.7	0.17 - 0.22	> 36	150 - 240	Embutición		
	DDS	1.4 - 1.8	0.20 - 0.25	> 38	115 - 200	Embutición Profunda		
	EDDS	1.7 - 2.1	0.23 - 0.27	> 40	105 - 170	Embutición Extra Profunda		

Para esta clasificación se tomaron únicamente algunas de las láminas de espesores de 0,60 y 0.70 mm, recocidas a las tres temperaturas seleccionadas. Utilizando como parámetro de comparación los valores asignados en la Norma ASTM A1008, ubicados al final de la tabla, para facilitar la identificación de las calidades a las que puede pertenecer cada uno de los rollos analizados, se seleccionaron tres colores, de la siguiente manera: Verde Agua para la Calidad Embutición, Gris para Embutición Profunda, y Salmón para Embutición Extra Profunda.

Analizando el valor del coeficiente de anisotropía normal (índice r), puede notarse que todos los valores harían clasificar el Acero IF laminado en frío de espesores de 0.60mm y 0.70 mm como material de calidad Extra Embutición. Esto puede confirmarse con la tabla 15.

Tabla 24. Clasificación de la Calidad del Acero IF obtenida en la primera y segunda corrida.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	6	21%
DDS	4	14%
EDDS	18	64%
Total	28	100%

Del 100% de las propiedades analizadas, que corresponde a 28 pruebas, el 21% participan como acero de calidad embutición, el 14% a calidad embutición profunda y el 64%, que conforma el % mayor, clasifican el material como calidad extra embutición profunda. Sin embargo, el coeficiente de endurecimiento por deformación (índice n) y el punto de Fluencia (Yp) para el acero recocido 680°C y 690°C, y el porcentaje de elongación para el acero recocido a 690°C, hacen automáticamente que el material IF caiga en la clasificación más baja, que es la calidad embutición, pues garantizar una calidad extra embutición profunda, con total seguridad de que el material en prueba presente fallas en sus posteriores procesos, involucra que el 100% de las propiedades cumplan con los requerimientos de la norma.

#### 6.4.2 Clasificación de la Tercera Corrida

Tabla 25. Clasificación por propiedades de la Tercera Corrida de Recocido.

T. RECOCIDO °C	DIMENSIONES mm	r	n	E %	YP Mpa	TS Mpa	DUREZA HRB	Clasificación
680	0,45	2,0	0,21	42	224	310	40,3	DS
680	0,45	2,5	0,21	41	211	303	43,7	DS
680	0,45	2,1	0,19	38	221	299	43,4	DS
680	0,45	2,2	0,17	42	238	304	39,3	DS
690	0,45	2,0	0,20	38	232	302	39,7	DS
690	0,45	2,2	0,20	43	213	295	43,0	DS
690	0,45	2,4	0,21	45	204	288	40,8	DS
690	0,45	2,1	0,20	40	209	293	39,4	DS
700	0,45	2,0	0,25	44	196	284	40,5	EDDS
700	0,45	2,0	0,24	42	224	302	32,2	DS
ASTM A 1008	DS	1.3 - 1.7	0.17 - 0.22	> 36	150 - 240	Embutición		
	DDS	1.4 - 1.8	0.20 - 0.25	> 38	115 - 200	Embutición Profunda		
	EDDS	1.7 - 2.1	0.23 - 0.27	> 40	105 - 170	Embutición Extra Profunda		

De manera similar a la clasificación hecha para la primera y segunda corrida de recocido, empleando la misma identificación de colores, para el acero laminado en frío con 0.45mm de espesor, en todos los rollos el valor del coeficiente de anisotropía normal (índice r) haría que el material tuviera el comportamiento adecuado para procesos de embutición extra profunda, esto lo afirma la tabla 17, pero aquí también el coeficiente de endurecimiento por deformación (índice n) y el punto de fluencia o Yield Point (Yp), a excepción de uno de los recocidos realizados a 700°C, hacen que el material se clasifique como calidad embutición.

Tabla 26. Clasificación de la Calidad del Acero IF obtenida en la tercera corrida de recocido.

Clasificación	Propiedades	Participación
DS	11	28%
DDS	8	20%
EDDS	21	53%
Total	40	100%

En esta tabla se demuestra que del 100% de las pruebas realizadas, las cuales fueron 40, el 28% clasifican al material como calidad embutición, el 20% calidad embutición profunda y el 53% calidad embutición profunda; desafortunadamente esta clasificación no es válida por los argumentos anteriormente expuestos.

## 6.5 ANALISIS DE VARIANZA DE LAS PROPIEDADES MECANICAS CON RESPECTO LA TEMPERATURA DE RECOCIDO.

Como se explicó en la metodología, se realizó el análisis de varianza para los espesores de 0,45mm, 0,60 mm y 0,70mm, donde se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 27. ANOVA de las propiedades mecánicas con respecto a la temperatura para el acero laminado de 0,60mm y 0,70mm, antes de temple.

<p>Analysis of Variance for TS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T</td> <td>3</td> <td>2276</td> <td>759</td> <td>4,67</td> <td>0,022</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>12</td> <td>1949</td> <td>162</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>15</td> <td>4225</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>670</td> <td>4</td> <td>320,50</td> <td>5,80</td> </tr> <tr> <td>680</td> <td>4</td> <td>313,25</td> <td>12,23</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>4</td> <td>322,25</td> <td>3,77</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>4</td> <td>292,25</td> <td>21,27</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 12,75</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	T	3	2276	759	4,67	0,022	Error	12	1949	162			Total	15	4225				Level	N	Mean	StDev	670	4	320,50	5,80	680	4	313,25	12,23	690	4	322,25	3,77	700	4	292,25	21,27	<p>Analysis of Variance for YP</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T</td> <td>3</td> <td>11960</td> <td>3987</td> <td>3,67</td> <td>0,044</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>12</td> <td>13048</td> <td>1087</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>15</td> <td>25007</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>670</td> <td>4</td> <td>235,50</td> <td>30,88</td> </tr> <tr> <td>680</td> <td>4</td> <td>255,00</td> <td>10,61</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>4</td> <td>250,25</td> <td>7,80</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>4</td> <td>186,00</td> <td>56,76</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 32,97</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	T	3	11960	3987	3,67	0,044	Error	12	13048	1087			Total	15	25007				Level	N	Mean	StDev	670	4	235,50	30,88	680	4	255,00	10,61	690	4	250,25	7,80	700	4	186,00	56,76
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																																				
T	3	2276	759	4,67	0,022																																																																																				
Error	12	1949	162																																																																																						
Total	15	4225																																																																																							
Level	N	Mean	StDev																																																																																						
670	4	320,50	5,80																																																																																						
680	4	313,25	12,23																																																																																						
690	4	322,25	3,77																																																																																						
700	4	292,25	21,27																																																																																						
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																																				
T	3	11960	3987	3,67	0,044																																																																																				
Error	12	13048	1087																																																																																						
Total	15	25007																																																																																							
Level	N	Mean	StDev																																																																																						
670	4	235,50	30,88																																																																																						
680	4	255,00	10,61																																																																																						
690	4	250,25	7,80																																																																																						
700	4	186,00	56,76																																																																																						
<p>Analysis of Variance for Elon</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T</td> <td>3</td> <td>222,2</td> <td>74,1</td> <td>6,60</td> <td>0,007</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>12</td> <td>134,8</td> <td>11,2</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>15</td> <td>356,9</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>670</td> <td>4</td> <td>41,500</td> <td>3,697</td> </tr> <tr> <td>680</td> <td>4</td> <td>38,500</td> <td>2,646</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>4</td> <td>40,000</td> <td>1,633</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>4</td> <td>48,250</td> <td>4,646</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 3,351</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	T	3	222,2	74,1	6,60	0,007	Error	12	134,8	11,2			Total	15	356,9				Level	N	Mean	StDev	670	4	41,500	3,697	680	4	38,500	2,646	690	4	40,000	1,633	700	4	48,250	4,646	<p>Analysis of Variance for Dureza</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T</td> <td>3</td> <td>253,3</td> <td>84,4</td> <td>4,13</td> <td>0,032</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>12</td> <td>245,3</td> <td>20,4</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>15</td> <td>498,6</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>670</td> <td>4</td> <td>43,025</td> <td>5,463</td> </tr> <tr> <td>680</td> <td>4</td> <td>46,275</td> <td>3,803</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>4</td> <td>45,000</td> <td>2,513</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>4</td> <td>35,975</td> <td>5,580</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 4,521</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	T	3	253,3	84,4	4,13	0,032	Error	12	245,3	20,4			Total	15	498,6				Level	N	Mean	StDev	670	4	43,025	5,463	680	4	46,275	3,803	690	4	45,000	2,513	700	4	35,975	5,580
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																																				
T	3	222,2	74,1	6,60	0,007																																																																																				
Error	12	134,8	11,2																																																																																						
Total	15	356,9																																																																																							
Level	N	Mean	StDev																																																																																						
670	4	41,500	3,697																																																																																						
680	4	38,500	2,646																																																																																						
690	4	40,000	1,633																																																																																						
700	4	48,250	4,646																																																																																						
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																																				
T	3	253,3	84,4	4,13	0,032																																																																																				
Error	12	245,3	20,4																																																																																						
Total	15	498,6																																																																																							
Level	N	Mean	StDev																																																																																						
670	4	43,025	5,463																																																																																						
680	4	46,275	3,803																																																																																						
690	4	45,000	2,513																																																																																						
700	4	35,975	5,580																																																																																						

Para este caso se obtuvieron los siguientes factores:

$$F^*_{0.05, v_1, v_2} = 3.49$$

Para Ts:  $F = 4,67$ ;  $P = 0,022$

Para Yp:  $F = 3,67$ ;  $P = 0,044$

Para %Elongación:  $F = 6,60$ ;  $P = 0,0007$

Para Dureza:  $F = 4,33$ ;  $P = 0,032$

Para r:  $F = 0,56$ ;  $P = 0,651$

Aplicando el criterio de comparación, el  $F^*$  es menor que todos los  $F_0$ , excepto para la anisotropía normal, lo cual indica, que para el acero IF de 0,60mm y 0,70mm de espesor, la anisotropía normal del material es la única propiedad que no se afecta con los cambios de temperatura, antes del temple.

Tabla 28. ANOVA de las propiedades mecánicas con respecto a la temperatura para el acero laminado de 0,60mm y 0,70mm, después de temple.

<p>Analysis of Variance for <math>\epsilon</math></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T. RECOC</td> <td>2</td> <td>0,1300</td> <td>0,0650</td> <td>3,00</td> <td>0,192</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>3</td> <td>0,0650</td> <td>0,0217</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>5</td> <td>0,1950</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>No es Significativo</p> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>680</td> <td>2</td> <td>2,0000</td> <td>0,1414</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>2</td> <td>1,9000</td> <td>0,0000</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>2</td> <td>2,2500</td> <td>0,2121</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 0,1472</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	T. RECOC	2	0,1300	0,0650	3,00	0,192	Error	3	0,0650	0,0217			Total	5	0,1950				Level	N	Mean	StDev	680	2	2,0000	0,1414	690	2	1,9000	0,0000	700	2	2,2500	0,2121	<p>Analysis of Variance for TS</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T. RECOC</td> <td>2</td> <td>270,3</td> <td>135,2</td> <td>2,27</td> <td>0,251</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>3</td> <td>178,5</td> <td>59,5</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>5</td> <td>448,8</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>680</td> <td>2</td> <td>290,50</td> <td>12,02</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>2</td> <td>278,00</td> <td>5,66</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>2</td> <td>275,00</td> <td>1,41</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 7,71</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	T. RECOC	2	270,3	135,2	2,27	0,251	Error	3	178,5	59,5			Total	5	448,8				Level	N	Mean	StDev	680	2	290,50	12,02	690	2	278,00	5,66	700	2	275,00	1,41
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																												
T. RECOC	2	0,1300	0,0650	3,00	0,192																																																																												
Error	3	0,0650	0,0217																																																																														
Total	5	0,1950																																																																															
Level	N	Mean	StDev																																																																														
680	2	2,0000	0,1414																																																																														
690	2	1,9000	0,0000																																																																														
700	2	2,2500	0,2121																																																																														
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																												
T. RECOC	2	270,3	135,2	2,27	0,251																																																																												
Error	3	178,5	59,5																																																																														
Total	5	448,8																																																																															
Level	N	Mean	StDev																																																																														
680	2	290,50	12,02																																																																														
690	2	278,00	5,66																																																																														
700	2	275,00	1,41																																																																														
<p>Analysis of Variance for Dureza</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T. RECOC</td> <td>2</td> <td>13,00</td> <td>6,50</td> <td>1,15</td> <td>0,427</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>3</td> <td>17,00</td> <td>5,67</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>5</td> <td>30,00</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>No es Significativo</p> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>680</td> <td>2</td> <td>37,000</td> <td>2,828</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>2</td> <td>34,500</td> <td>2,121</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>2</td> <td>33,500</td> <td>2,121</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 2,380</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	T. RECOC	2	13,00	6,50	1,15	0,427	Error	3	17,00	5,67			Total	5	30,00				Level	N	Mean	StDev	680	2	37,000	2,828	690	2	34,500	2,121	700	2	33,500	2,121	<p>Analysis of Variance for YP</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>T. RECOC</td> <td>2</td> <td>170</td> <td>85</td> <td>0,48</td> <td>0,659</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>3</td> <td>531</td> <td>177</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>5</td> <td>701</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>680</td> <td>2</td> <td>202,50</td> <td>19,09</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>2</td> <td>195,00</td> <td>12,73</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>2</td> <td>189,50</td> <td>2,12</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 13,30</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	T. RECOC	2	170	85	0,48	0,659	Error	3	531	177			Total	5	701				Level	N	Mean	StDev	680	2	202,50	19,09	690	2	195,00	12,73	700	2	189,50	2,12
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																												
T. RECOC	2	13,00	6,50	1,15	0,427																																																																												
Error	3	17,00	5,67																																																																														
Total	5	30,00																																																																															
Level	N	Mean	StDev																																																																														
680	2	37,000	2,828																																																																														
690	2	34,500	2,121																																																																														
700	2	33,500	2,121																																																																														
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																												
T. RECOC	2	170	85	0,48	0,659																																																																												
Error	3	531	177																																																																														
Total	5	701																																																																															
Level	N	Mean	StDev																																																																														
680	2	202,50	19,09																																																																														
690	2	195,00	12,73																																																																														
700	2	189,50	2,12																																																																														

Para después del laminado de temple se obtuvo:

$$F^*_{0.05, v_1, v_2} = 9.55$$

Para Ts:  $F = 2,27$ ;  $P = 0,251$

Para Yp: F = 0,45; P = 0,659

Para Dureza: F = 1,15; P = 0,427

Para r: F = 3,00; P = 0,192

Comparando los datos obtenidos, únicamente al observar que  $F^*$  es mayor que todos los  $F_0$ , puede decirse que todas ninguna de las variables se hace significativa a los cambios de temperatura, luego de que el acero pase por el laminado de temple.

Tabla 29. ANOVA de las propiedades mecánicas con respecto a la temperatura para el acero laminado de 0,45mm, después de temple.

<p>Analysis of Variance for n</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Temperat</td> <td>2</td> <td>0,003535</td> <td>0,001767</td> <td>10,10</td> <td>0,009</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>7</td> <td>0,001225</td> <td>0,000175</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>9</td> <td>0,004760</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>680</td> <td>4</td> <td>0,19500</td> <td>0,01915</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>4</td> <td>0,20250</td> <td>0,00500</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>2</td> <td>0,24500</td> <td>0,00707</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 0,01323</p> <p style="text-align: right;">Significativo</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	Temperat	2	0,003535	0,001767	10,10	0,009	Error	7	0,001225	0,000175			Total	9	0,004760				Level	N	Mean	StDev	680	4	0,19500	0,01915	690	4	0,20250	0,00500	700	2	0,24500	0,00707	<p>Analysis of Variance for r</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Temperat</td> <td>2</td> <td>0,0575</td> <td>0,0288</td> <td>0,88</td> <td>0,454</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>7</td> <td>0,2275</td> <td>0,0325</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>9</td> <td>0,2850</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>680</td> <td>4</td> <td>2,2000</td> <td>0,2160</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>4</td> <td>2,1750</td> <td>0,1708</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>2</td> <td>2,0000</td> <td>0,0000</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 0,1803</p> <p style="text-align: right;">No es Significativo</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	Temperat	2	0,0575	0,0288	0,88	0,454	Error	7	0,2275	0,0325			Total	9	0,2850				Level	N	Mean	StDev	680	4	2,2000	0,2160	690	4	2,1750	0,1708	700	2	2,0000	0,0000
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																												
Temperat	2	0,003535	0,001767	10,10	0,009																																																																												
Error	7	0,001225	0,000175																																																																														
Total	9	0,004760																																																																															
Level	N	Mean	StDev																																																																														
680	4	0,19500	0,01915																																																																														
690	4	0,20250	0,00500																																																																														
700	2	0,24500	0,00707																																																																														
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																												
Temperat	2	0,0575	0,0288	0,88	0,454																																																																												
Error	7	0,2275	0,0325																																																																														
Total	9	0,2850																																																																															
Level	N	Mean	StDev																																																																														
680	4	2,2000	0,2160																																																																														
690	4	2,1750	0,1708																																																																														
700	2	2,0000	0,0000																																																																														
<p>Analysis of Variance for YP</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Temperat</td> <td>2</td> <td>292</td> <td>146</td> <td>0,84</td> <td>0,471</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>7</td> <td>1214</td> <td>173</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>9</td> <td>1506</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>680</td> <td>4</td> <td>223,50</td> <td>11,15</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>4</td> <td>214,50</td> <td>12,23</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>2</td> <td>210,00</td> <td>19,80</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 13,17</p> <p style="text-align: right;">No es Significativo</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	Temperat	2	292	146	0,84	0,471	Error	7	1214	173			Total	9	1506				Level	N	Mean	StDev	680	4	223,50	11,15	690	4	214,50	12,23	700	2	210,00	19,80	<p>Analysis of Variance for Dureza</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Source</th> <th>DF</th> <th>SS</th> <th>MS</th> <th>F</th> <th>P</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Temperat</td> <td>2</td> <td>39,44</td> <td>19,72</td> <td>2,42</td> <td>0,159</td> </tr> <tr> <td>Error</td> <td>7</td> <td>57,04</td> <td>8,15</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>Total</td> <td>9</td> <td>96,48</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table> <p>Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Level</th> <th>N</th> <th>Mean</th> <th>StDev</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>680</td> <td>4</td> <td>41,675</td> <td>2,207</td> </tr> <tr> <td>690</td> <td>4</td> <td>40,725</td> <td>1,632</td> </tr> <tr> <td>700</td> <td>2</td> <td>36,350</td> <td>5,869</td> </tr> </tbody> </table> <p>Pooled StDev = 2,855</p> <p style="text-align: right;">No es Significativo</p>	Source	DF	SS	MS	F	P	Temperat	2	39,44	19,72	2,42	0,159	Error	7	57,04	8,15			Total	9	96,48				Level	N	Mean	StDev	680	4	41,675	2,207	690	4	40,725	1,632	700	2	36,350	5,869
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																												
Temperat	2	292	146	0,84	0,471																																																																												
Error	7	1214	173																																																																														
Total	9	1506																																																																															
Level	N	Mean	StDev																																																																														
680	4	223,50	11,15																																																																														
690	4	214,50	12,23																																																																														
700	2	210,00	19,80																																																																														
Source	DF	SS	MS	F	P																																																																												
Temperat	2	39,44	19,72	2,42	0,159																																																																												
Error	7	57,04	8,15																																																																														
Total	9	96,48																																																																															
Level	N	Mean	StDev																																																																														
680	4	41,675	2,207																																																																														
690	4	40,725	1,632																																																																														
700	2	36,350	5,869																																																																														

Finalmente, para el acero IF de 0.45 mm de espesor, el software arrojó los siguientes datos:

$F^*_{0.05, v1, v2} = 4.74$

Para Yp: F = 0,84; P = 0,471

Para Dureza: F = 2,42; P = 0,159

Para r: F = 0,88; P = 0,454

Para n: F = 10,10; P = 0,009

De igual manera que en los casos anteriores, al comparar los  $F^*$  con los  $F_o$ , solo en el coeficiente de endurecimiento por deformación puede notarse que cumple con las dos condiciones, para que sea entonces esta propiedad, la única que sea significativa a los cambios de temperatura para el acero IF de 0,45 mm de espesor, en condición de temple.

## **6. 6 ANÁLISIS METALOGRAFICO PARA DETERMINACION DE TAMAÑO DE GRANO.**

Las siguientes micrografías revelan el tamaño de grano, la forma y distribución de las fases que comprenden la aleación del acero IF.

La determinación del Número de tamaño de grano ASTM promedio se realizó mediante el método de comparación, aplicando un factor de corrección especificado en la norma ASTM E112 <sup>16</sup> 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.

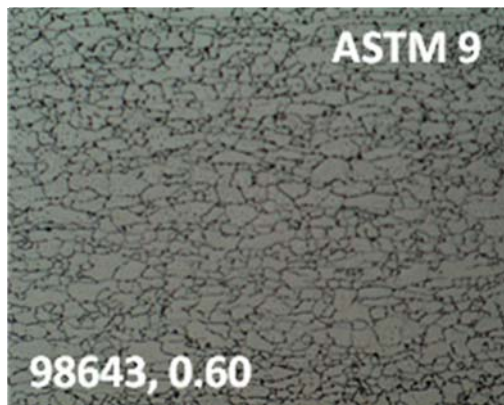
$$Q = 6.64 \log_{10} \left( \frac{M}{M_b} \right)$$

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

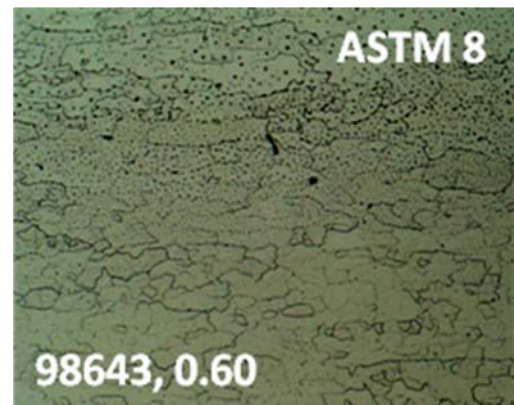
De igual forma, es importante manifestar que el uso de métodos para determinar el tamaño de grano promedio no garantiza la exactitud de la medida; debido a que una estructura metálica corresponde un agregado cristalino de tres dimensiones variando de forma y tamaño con estas.

### 6.6.1 Tamaño de Grano Acero IF primera Corrida de Recocido

Figura 29. Micrografías Rollo 98643. Temperatura de Recocido = 680°C

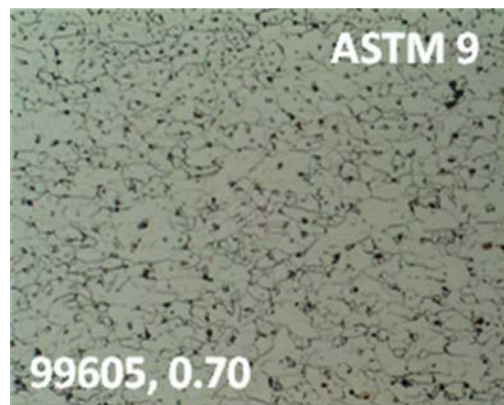


a). Lámina Recocida . Ataque Nital al 2% .200X

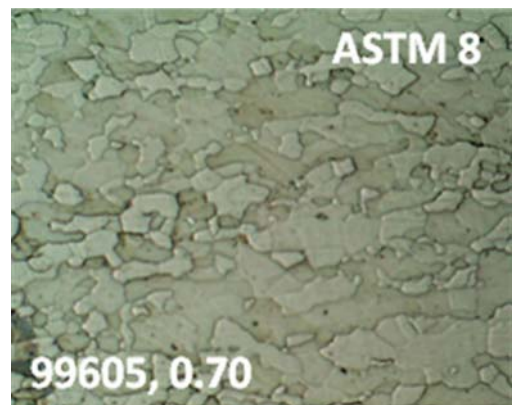


b). Lámina Templada. Ataque Nital al 2% .200X

Figura 30. Micrografías Rollo 99605. Temperatura de Recocido = 680°C

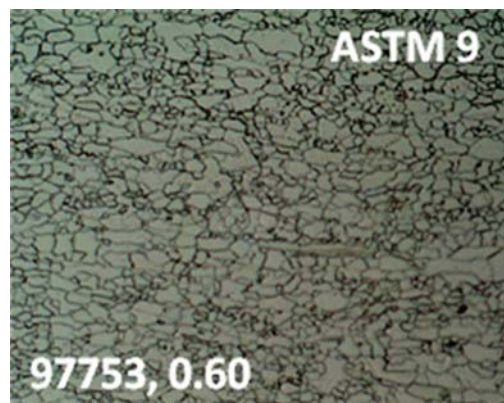


a). Lámina Recocida . Ataque Nital al 2% .200X

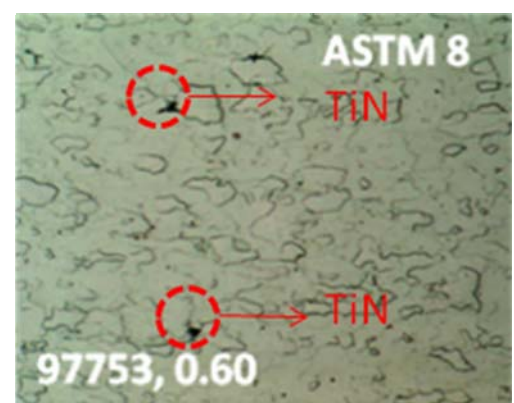


b). Lámina Templada. Ataque Nital al 2% .200X

Figura 31. Micrografías Rollo 97753. Temperatura de Recocido = 690°C

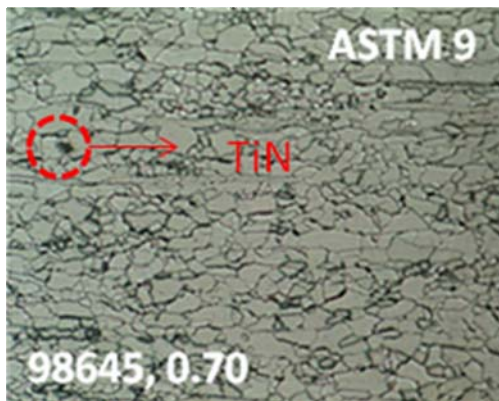


a). Lámina Recocida . Ataque Nital al 2% .200X

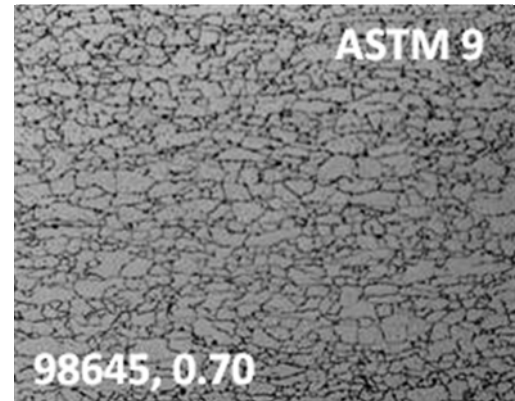


b). Lámina Templada. Ataque Nital al 2% .200X

Figura 32. Micrográficas Rollo 98645. Temperatura de Recocido = 690°C

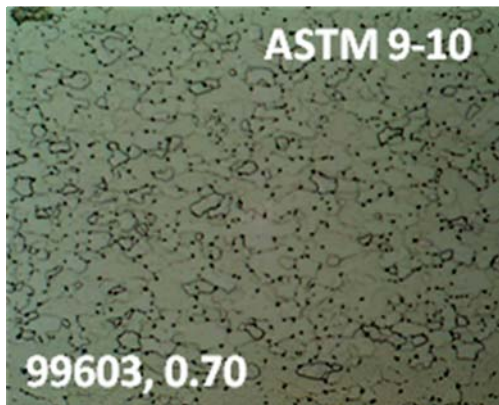


a). Lámina Recocida . Ataque Nital al 2% .200X

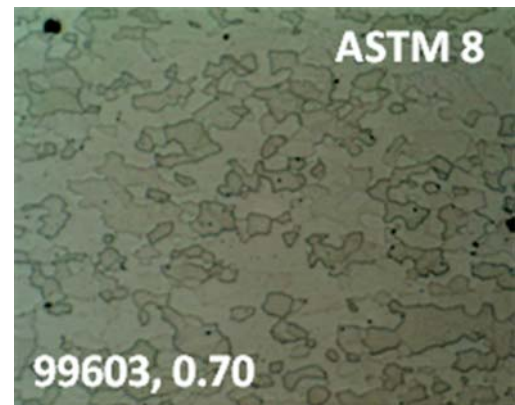


b). Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

Figura 33. Micrográficas Rollo 99603. Temperatura de Recocido = 700°C

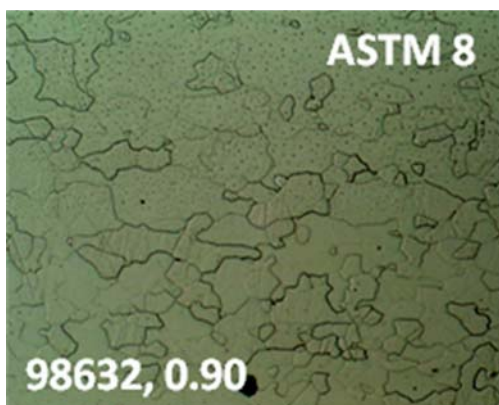


a). Lámina Recocida . Ataque Nital al 2% .200X

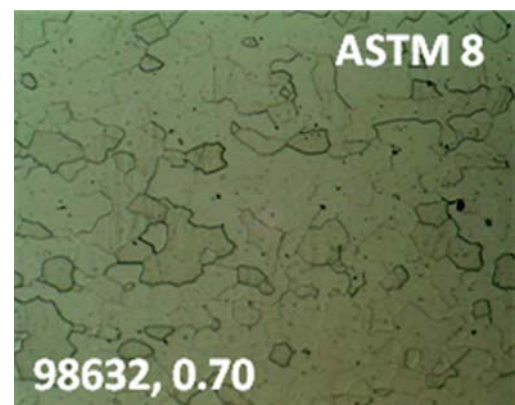


b). Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

Figura 34. Micrográficas Rollo 98632. Temperatura de Recocido = 700°C

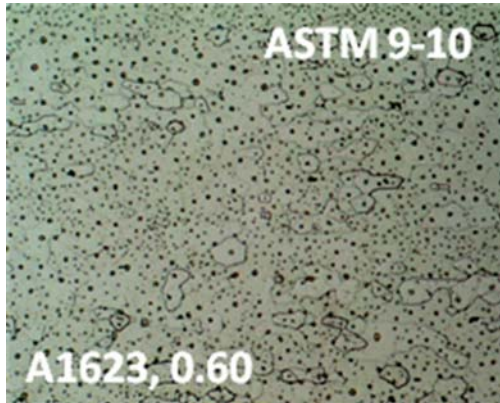


a). Lámina Recocida . Ataque Nital al 2% .200X

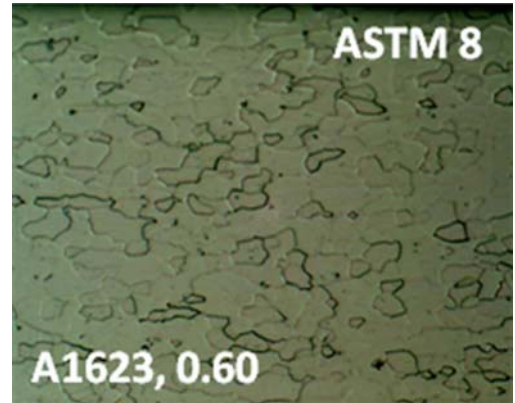


b). Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

Figura 35. Micrografías Rollo A1623. Temperatura de Recocido = 700°C



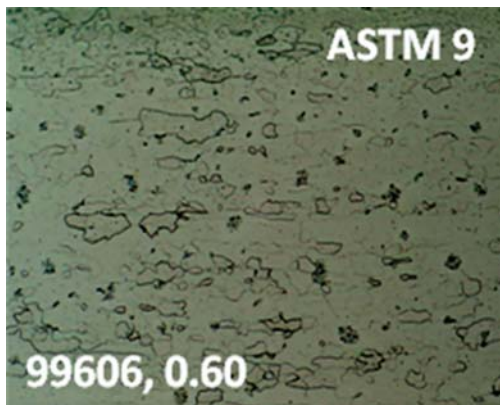
a). Lámina Recocida . Ataque Nital al 2% .200X



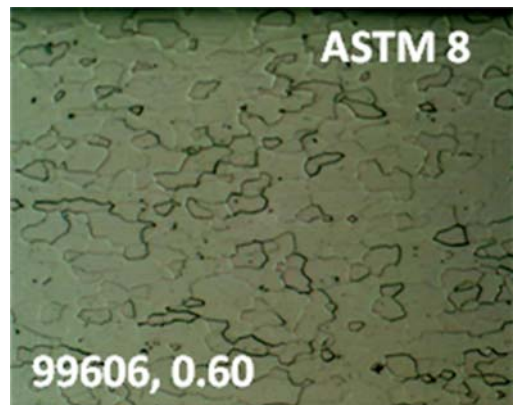
b). Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

### 6.6.2 Tamaño de Grano Acero IF segunda Corrida de Recocido

Figura 36. Micrografías Rollo 99606. Temperatura de Recocido = 690°C

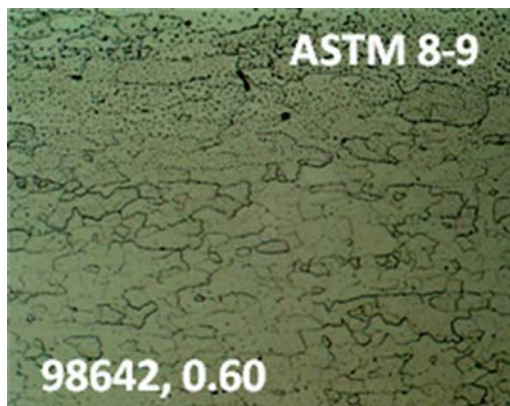


a). Lámina Recocida . Ataque Nital al 2% .200X

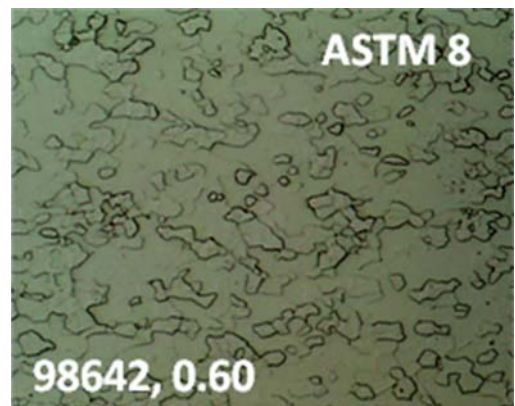


b). Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

Figura 37. Micrografías Rollo 98642. Temperatura de Recocido = 690°C



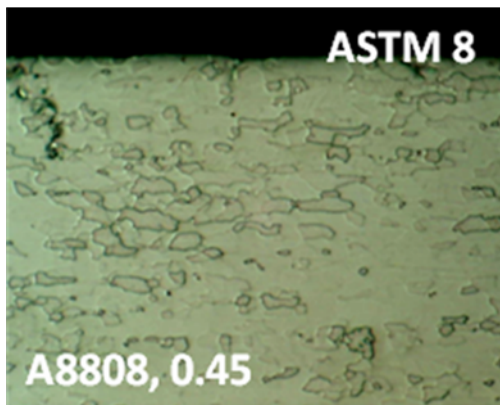
a). Lámina Recocida . Ataque Nital al 2% .200X



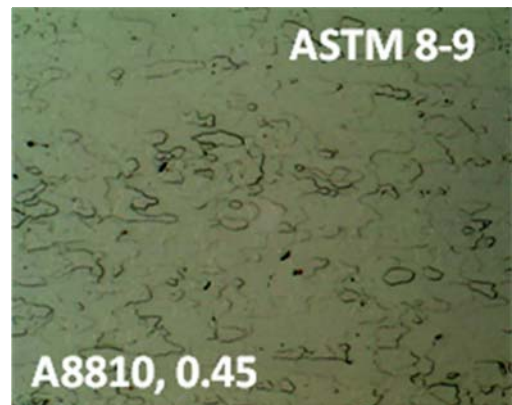
b). Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

### 6.6.3 Tamaño de Grano Acero IF tercera Corrida de Recocido

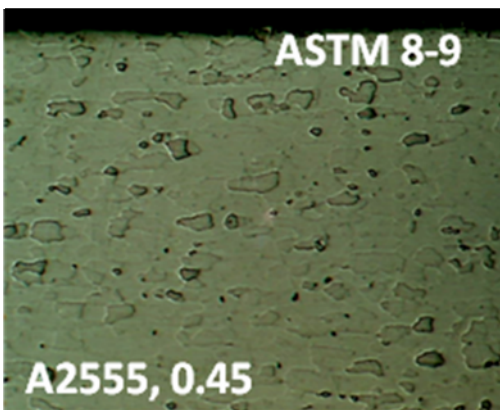
Figura 38. Micrografías Láminas 0.45 mm. Temperatura de Recocido = 680°C



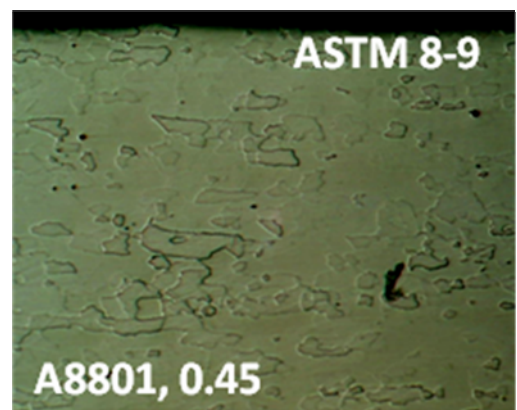
a) A8808. Lámina Templada . Ataque Nital al 2% .200X



b). A8810. Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

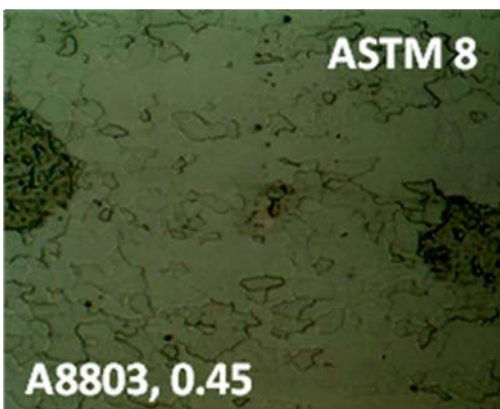


c) A2555. Lámina Templada . Ataque Nital al 2% .200X

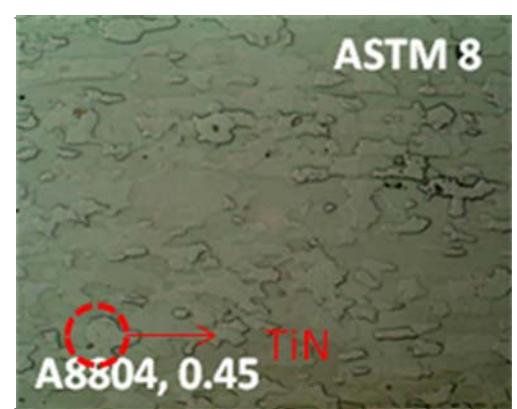


d). A8801. Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

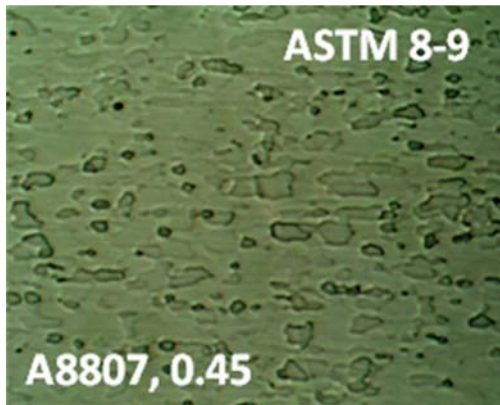
Figura 39. Micrografías Láminas 0.45 mm. Temperatura de Recocido = 690°C



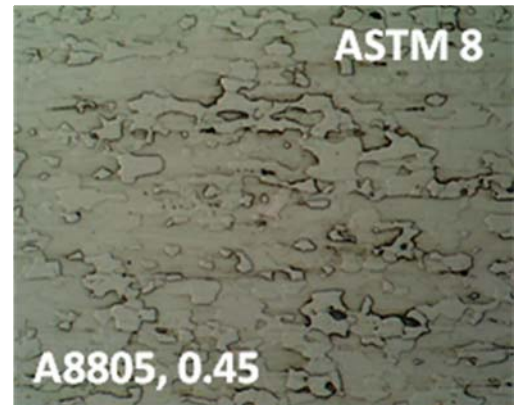
a) A8803. Lámina Templada . Ataque Nital al 2% .200X



b). A8804. Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

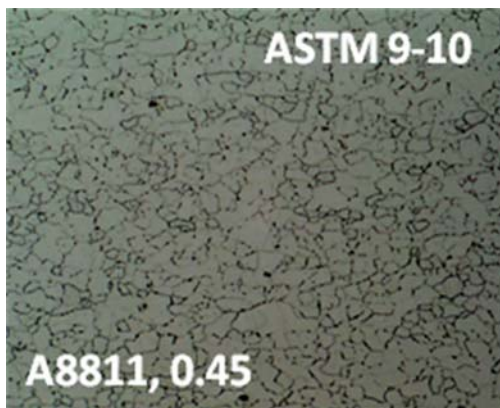


c) A8807. Lámina Templada . Ataque Nital al 2% .200X

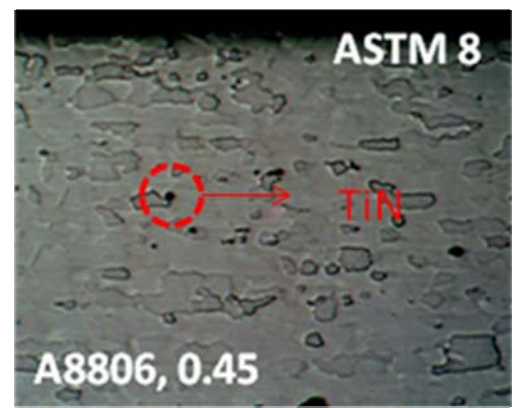


d). A8805. Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X

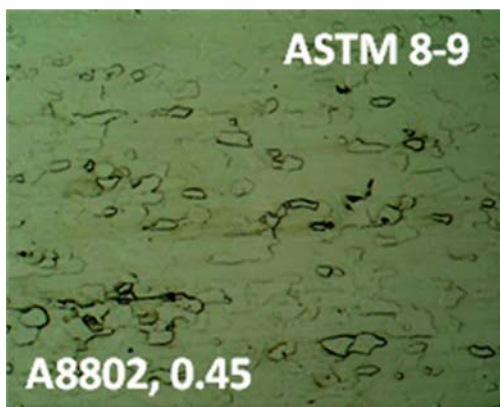
Figura 40. Micrografías Láminas 0.45 mm. Temperatura de Recocido = 700°C



a) A8811. Lámina Templada . Ataque Nital al 2% .200X



b). A8806. Lámina Templada. Ataque Nital al 2%. 200X



c) A8802. Lámina Templada . Ataque Nital al 2% .200X

En general para el acero IF a todas las temperaturas a las cuales fué recocido, con sus diferentes condiciones, se encontraron características microestructurales semejantes donde principalmente se observa la presencia

de una matriz ferrítica, esto debido a las pequeñas cantidades de carbono que posee este acero, que de acuerdo al diagrama de equilibrio de fases de Fe- Fe<sub>3</sub>C (figura 42) para ese porcentaje de carbono la fase estable es la ferrita ( $\alpha$ ).

En algunas de estas micrografías puede observarse la presencia 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→rojizo) y forma (rectangular) existe la probabilidad de que se tratan de nitruros de titanio.

Finalmente, para temperaturas de recocido 680°C, 690°C y 700°C, en el acero IF, luego del laminado de temple se observa un ligero aumento en el tamaño de grano de algunas de las láminas, unificando este valor para este acero entre 8 y 9. Se asume por ser una microestructura recristalizada y de grano fino, gran resistencia y al mismo tiempo ductilidad adquirida en el recocido.

## 7. CONCLUSIONES

- La variación del tamaño de grano es insignificante a los cambios de temperatura de recocido en campana en aceros IF; esto lo muestran las metalografías obtenidas, que arrojaron tamaños de grano pequeños, entre 8 y 9 para láminas de espesores de 0.60mm y 0.70mm, y entre 9 y 10 para láminas de acero IF de 0.45 mm de espesor.
- Según los análisis de varianza, la anisotropía normal o índice “r” es la variable que más se muestra significativa al cambio de temperatura para el acero IF de 0,60mm y 0,70mm de espesor; de igual manera, los resultados muestran que el coeficiente de endurecimiento por deformación o índice “n”, es la propiedad que se hace significativa a los cambios de temperatura para el acero IF de 0,45 mm de espesor.
- De acuerdo a 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”, la calidad final del producto terminado clasifica como un acero con calidad de embutición, en las diferentes temperaturas y espesores.
- Los análisis estadísticos reportaron que todas las propiedades mecánicas son significativas a la variación de temperatura. De igual manera se mostró que el temper rolling modifica la variación de las propiedades mecánicas, convirtiéndolas en no significativas a la variación de temperatura.
- El YPE en acero IF recocido a temperaturas de 690°C y 700, disminuye considerablemente.
- Para el acero IF 0.60 mm, el tamaño de grano se muestra más uniforme a temperaturas de 690°C y 700°C.

- En los recocidos a 690°C se evidenció menor tiempo en que el rollo monitoreado en la posición número 2 alcanzara la temperatura del gas.
- En algunas de las microestructuras, el acero IF (libres de elementos intersticiales) bajo estudio, presentaron matriz ferrítica con presencia de partículas de TiN, que fué lo esperado según la revisión bibliográfica, debido a la presencia de Nitrógeno como elemento intersticial; estos precipitados se observaron tanto en estado recocido como templado.
- Se obtuvieron tres rectas, con sus respectivas ecuaciones, donde cada una de ellas representa las temperaturas a las cuales deben llevarse los procesos de recocido en campana para el acero IF.  
Como el peso de las cargas de material fueron tanto altos para los espesores mayores, como bajos para los espesores de 0.45mm, se realizaron pruebas de acuerdo a los tiempos de proceso obtenidos con los valores de carga promedio trabajados, obteniendo la siguiente tabla.

Figura 41. Grafica recomendada para experimentos de Recocido

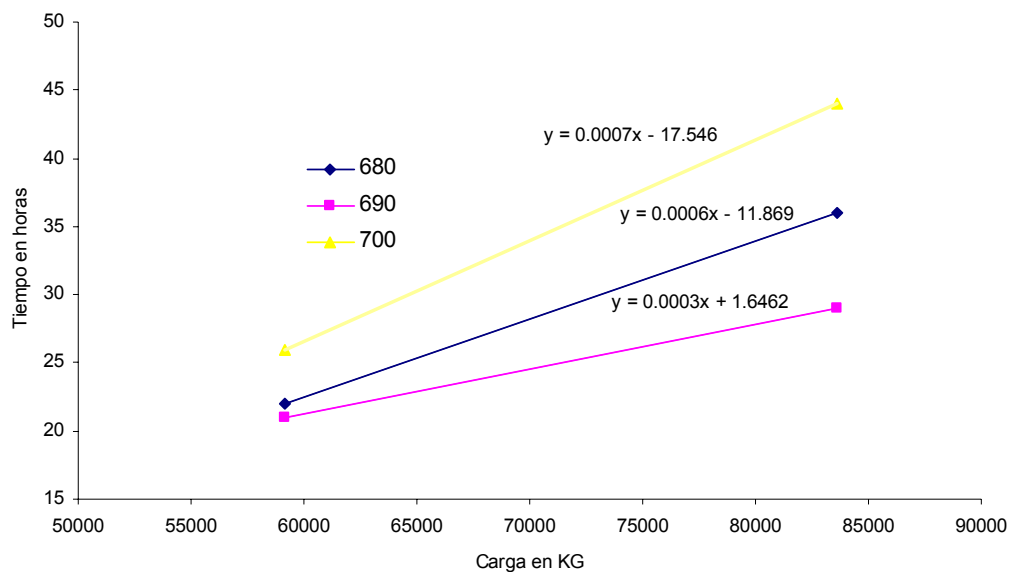


Tabla 30. Temperatura Vs cargas para las corridas de recocido de material IF.

T	59150	83600
680	22	36
690	21	29
700	26	44

Lo anterior indica, que al utilizar las ecuaciones de la curva de la figura 41, al seleccionar la temperatura de recocido a la cual se llevará a cabo el proceso, de acuerdo al peso de la carga que será X, se reemplaza en la ecuación, donde se obtendrá Y, que corresponderá al tiempo total del proceso.

- La recristalización completa del material y homogeneidad del tamaño de grano se ve beneficiada por velocidades de calentamiento lentas.
- El efecto del tratamiento térmico practicado a las bobinas de acero IF, fué positivo. Dicho análisis se basa en los resultados obtenidos de las variables de salida que determinan la calidad del material, propuestas en la tabla de diseño de experimentos.

## 8. RECOMENDACIONES

- Luego de un cuidadoso análisis de todos los resultados obtenidos durante el desarrollo de las pruebas mecánicas, del análisis metalográfico, y de los análisis de varianza realizados para los diferentes procesos de recocido del acero IF laminado en frío, deben confirmarse y establecerse las temperaturas de trabajo y tiempos de sostenimientos para rollos de diferentes espesores, así como los empleados para las pruebas realizadas en ACESCO S.C.A. El control de la temperatura en los procesos de recocido es indispensable, por el efecto que pueda ocasionar en el espesor de la lámina, y por ende, en la propiedades obtenidas; sin embargo, el uso de termocuplas, como se planteó al inicio del trabajo realizado, involucra aumentos en tiempos y costos de producción, razón por la cual se recomienda realizar pruebas que utilicen como herramienta la curva mostrada en la figura 43, obtenida por el análisis de variables de operación de todas las corridas de recocido realizadas para la elaboración del presente trabajo de grado, haciendo especial énfasis en los pesos de las cargas y los tiempos totales de recocido. Esto con el fin de mejorar los procesos de transformación de material laminado en frío, cuya aplicación deseada esté enfocada a procesos de conformado, logrando la calidad que final del producto, la cual fué de embutición.
- Se recomienda seleccionar preferiblemente, la temperatura de 690°C, la cual resultó más eficiente para todos los tratamientos térmicos de recocido, realizado para los diferentes espesores.

## BIBLIOGRAFIA

- 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) <sup>[1]</sup>
- 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<sup>[2]</sup>
- 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. <sup>[3]</sup>
- TAKECHI, Hiroshi. Metallurgical Aspects on Interstitial Free Sheet steel from Industrial Viewpoints. En: ISIJ International. Vol. 34, No. 1 (1994); p. 1-8<sup>[4]</sup>.
- 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<sup>[5]</sup>.
- \_\_\_\_\_. Standard test methods for tensión testing of metallic materials. United States: ASTM, 1995. 20 p, il. (ASTM E 8M) <sup>[6]</sup>
- \_\_\_\_\_. Standard test method for plastic strain ratio r for sheet metal. United States: ASTM, 1992. 6 p, .il. (ASTM E 517) <sup>[7]</sup>

- \_\_\_\_\_ . Standard test method for tensile strain-hardening exponents (n-values) of metallic sheet materials. United States: ASTM, 1993. 7 p, .il. (ASTM E 646)<sup>[8]</sup>
- \_\_\_\_\_ . Standard test methods for determining average grain size. United States: ASTM, 1996. 25 p, .il. (ASTM E 112)<sup>[9]</sup>
- COLAS, Rafael. Laminación en Frío de Aceros. Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León. p. 1-24<sup>[10]</sup>
- LANERO, Tomás. El Recocido<sup>[11]</sup>.
- ROSSI, Mario. Estampado en Frío de la Chapa. 8 ed. Barcelona, España: Científico-Médica, 1966. 567 p.<sup>[12]</sup>
- Fleje de acero en bajo carbono, laminado en frío, de tecnología avanzada. International Iron and Steel Institute and MATTER. University of Liverpool. 2002 – 2007. p. 1-2.<sup>[13]</sup>
- STARLING, James N.A. The Evolution of solute Carbon during Continuous Annealing of Interstitial Free Steel and its effects on Bake Hardenability. Queen`s University. Kingston, Ontario, Canadá. March 1998. p. 1 – 145.<sup>[14]</sup>
- GUY, A. G. Fundamentos de Ciencia de Materiales. Editorial Mc Graw Hill, 1980. p. 324.<sup>[15]</sup>
- DIETER, George E. Metalurgia Mecánica. Mc Graw Hill Company, Inc. 1967. p. 368.<sup>[16]</sup>
- MANCILLA, J. E., BÉJAR, L., HERNÁNDEZ, C. A. y PARAGUAY, F.. Estudio de los precipitados inducidos por deformación de un acero microaleado al niobio. Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

Chihuahua, Chih., México. Universidad Michoacana de San Nicolás Hidalgo.  
Morelia, Mich., México, Septiembre de 2001. p. 271-278.<sup>[17]</sup>

- <http://www.todomonografias.com/images/2006/07/548.gif>
- <http://www.infoacero.cl/acero/hornos.htm>.
- <http://www.memagazine.org/.../features/vacuum/56.gif>
- <http://www.hardnesstesters.com/rockwell-hardness-tester.htm>
- <http://www.mailxmail.com/curso/vida/metalografia/capitulo2.htm>
- [http://www.brushwellman.com/alloy/tech\\_lit/November-December%202005.pdf](http://www.brushwellman.com/alloy/tech_lit/November-December%202005.pdf)
- <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-333.pdf>