

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PROCESO DE UN HORNO DE
RECOCIDO EN CONTINUO, MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN
METALÚRGICA DE LOS ACEROS PROCESADOS**

ELVER SANTOS RÍOS

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

2015

**EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PROCESO DE UN HORNO DE
RECOCIDO EN CONTINUO, MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN
METALÚRGICA DE LOS ACEROS PROCESADOS**

ELVER SANTOS RÍOS

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Ing. Afranio Antonio Cardona Granados

Codirector

MsC. Jairo Alfonso Gómez Rodríguez

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES

BUCARAMANGA

2015

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, José Santos y Guillermina Ríos, quienes guiaron mi camino y me motivaron a seguir adelante. A Marisol Bernal, por ser esa compañía constante en esta trayectoria académica y personal. A Afranio Cardona, quien aportó su experiencia y sabiduría en mi formación profesional; a Jairo Gómez, por sus consejos, por su apoyo y por su enseñanza. A ACESCO por la acogida y la orientación brindada. A todos ellos: Muchas gracias.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	14
2. OBJETIVOS.....	16
2.1 OBJETIVO GENERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. MARCO TEÓRICO	17
3.1 RECOCIDO.....	17
3.1.1 Recocido industrial.....	17
3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS	20
3.3 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESO.....	22
3.3.1 Capacidad de proceso.....	22
4. METODOLOGÍA	24
4.1 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA	24
4.2 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA.....	25
4.2.1 Toma de muestras.....	25
4.2.2 Análisis metalográfico.....	26
4.2.3 Ensayo de dureza.....	27

4.2.4 Ensayos de Tensión.	28
4.3 CAPACIDAD REAL.....	29
5. RESULTADOS.....	31
5.1 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA	31
5.2 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA.....	39
5.3 CAPACIDAD REAL DEL HORNO DE RECOCIDO	43
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	46
6.1 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA	46
6.2 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA.....	51
6.3 ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD REAL	54
7. CONCLUSIONES	59
8. RECOMENDACIONES.....	61
REFERENCIAS	62
BIBLIOGRAFÍA.....	64
ANEXOS.....	67

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Clasificación de los aceros estructurales	21
Tabla 2. Clasificación de los aceros comerciales.....	21
Tabla 3. Especificación del diseño de experimentos.	30
Tabla 4. Muestreo para referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS).	33
Tabla 4. Muestreo para referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS). (Continuación)	34
Tabla 5. Resultados de la evaluación estadística.	39
Tabla 6. Muestreo y tamaños por referencia.	47

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Perfiles de temperatura en recocido. a) Campana. b) Continuo.	18
Figura 2. Perfil de temperatura, para el horno de recocido y la banda metálica. ...	19
Figura 3. a) Muestra inicial. b) Muestra dividida.....	26
Figura 4. Muestras troqueladas	26
Figura 5. Muestra para tensión y metalografía.....	27
Figura 6. Montaje de la muestras en baquelita.	27
Figura 7. Curva de tracción obtenida durante la prueba de capacidad real del horno.	28
Figura 8. Esquema de la nomenclatura utilizada.	29
Figura 9. Aproximación a la distribución térmica de PHT.	53
Figura 10. Cambios en la microestructura del acero comercial.	54
Figura 11. Cambios en la microestructura del acero estructural.	58

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Histograma de durezas para 0.72 mm x 1220 mm.....	35
Gráfica 2. Prueba de normalidad para 0.72 mm x 1220 mm (SS)	36
Gráfica 3. . Gráfico $\bar{X} - R$ para 0.72 mm x 1220 mm (SS).....	38
Gráfica 4. Perfil de 0.72 mm x 1220 mm (SS).....	41
Gráfica 5. Perfil de 0.67 mm x 1220 mm (CS).	41
Gráfica 6. Perfil de 0.52 mm x 1220 mm (CS).	42
Gráfica 7. Resistencia a la tracción, Vs posición para 0.82 mm x 1220 mm (CS)	43
Gráfica 8. Resistencia a la fluencia Vs posición, para 0.82 mm x 1220 mm (CS).	44
Gráfica 9. Resistencia a la tracción Vs posición, para 0.82 mm x 1220 mm (CS).	45
Gráfica 10. Resistencia a la fluencia Vs posición, para 0.72 mm x 1220 mm (SS).	45

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Valores de durezas para los gráficos de control	67
ANEXO B. Histograma, gráficos de control y prueba de normalidad	71
ANEXO C. Propiedades mecánicas para las referencias 0.52 y 0.82 x 1220 mm .	75
ANEXO D. Microestructuras obtenidas durante las pruebas de capacidad	76

RESUMEN

TÍTULO: EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD DE PROCESO DE UN HORNO DE RECOCIDO EN CONTINUO, MEDIANTE LA CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA DE LOS ACEROS PROCESADOS*

AUTOR: SANTOS RÍOS ELVER**

PALABRAS CLAVES: Recocido en continuo, laminación en frío, galvanización, Control estadístico de procesos.

RESUMEN: En este trabajo se evalúa la capacidad de proceso de un horno de recocido en continuo, integrado a una línea de galvanización, en la empresa Acerías de Colombia S.A.S. Los aceros empleados para esta evaluación son chapas laminadas en frío con contenidos de carbono inferiores a 0.1%, clasificados como estructurales y comerciales, de acuerdo con la norma ASTM A653.

Durante el desarrollo del proyecto se aborda la capacidad de proceso desde dos perspectivas, la capacidad estadística y la capacidad real del horno de recocido. En este sentido se llevan a cabo tres etapas, una evaluación estadística, una verificación de las propiedades y microestructura actuales, y finalmente se complementa con un diseño de experimentos encaminados a develar la capacidad máxima de la línea de galvanización.

Los resultados indican que el horno de recocido cuenta con una capacidad máxima de 24 Ton/H, para aceros estructurales y comerciales. Adicionalmente, se determina que los rangos de dureza establecidos como criterio de calidad están distanciados de la realidad del proceso, que el recocido de aceros con composición 1010 no es apto para obtener una calidad comercial y finalmente se logra establecer que la heterogeneidad en las propiedades mecánicas en el ancho de banda obedece a una recristalización parcial cuando se opera el horno a velocidades superiores a 24 Ton/H, generando ondulación en el material.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Afranio Antonio Cardona Granados, Codirector: Jairo Alfonso Gómez Rodríguez.

SUMMARY

TITLE: EVALUATION OF PROCESS CAPABILITY OF A CONTINUOUS-ANNEALING FURNACE, THROUGH THE METALLURGICAL CHARACTERIZATION OF PROCESSED STEELS *

AUTHOR: SANTOS RÍOS ELVER**

KEYWORDS: Continuous-annealing, Cold rolling, Galvanizing, Statistical Process Control.

SUMMARY: In this paper the processing capacity of a continuous annealing furnace, comprising a galvanizing line is evaluated, in the company Acerías de Colombia S.A.S. The steels used for this evaluation are cold-rolled sheets with lower carbon content to 0.1%, classified as structural and commercial, according to the ASTM A653 standard.

During the project development process capability is approached from two perspectives, statistical capacity and the real capacity of the annealing furnace. In this sense are carried out three stages, a statistical evaluation, verification of current properties and microstructure, and finally it is complemented with a design of experiments aimed at reveal the maximum capacity of the galvanizing line.

The results indicate that the annealing furnace has a maximum capacity of 24 ton / h, for structural and commercial steels; additionally, it is determined that the hardness ranges established as a quality criterion are distanced from the reality of the process and annealing of steels 1010 composition is not suitable for a commercial quality; and finally it is establish that the heterogeneity in the mechanical properties in bandwidth is due to a partial recrystallization when the oven operates at speeds above 24 ton / h, creating ripples in the material.

* Degree work

**Physical-Chemical Engineering Depart, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: Afranio Antonio Cardona Granados, Co-Director: Jairo Alfonso Gómez Rodríguez.

INTRODUCCIÓN

Una de las acciones planteadas por ACESCO radica en la introducción de estrategias encaminadas a optimizar los procesos productivos, con el ánimo de que cada una de las dependencias enfoque sus esfuerzos en la mejora de la calidad de los productos, la reducción de los costos de operación y el aumento de la producción. En el área de producción se cuenta con una línea de galvanización en continuo (LGC01) que procesa alrededor de 135000 Toneladas por año, a una tasa de producción ponderada de 21.2 Ton/H, sin embargo, esta tasa de producción se encuentra muy por debajo de la tasa sugerida por el fabricante de la línea, quien asegura que la línea puede alcanzar las 25 Ton/H. Este déficit en la velocidad de producción afecta la economía reduciendo sus márgenes de utilidades.

Es importante señalar que en 2009 después de actualizaciones que sufrió el horno de recocido, se declara una capacidad máxima de 25 Ton/H, desde entonces la línea no ha llegado a estas tasas de producción y se pretende establecer con este trabajo cuál es la capacidad máxima del horno de recocido, que a su vez limita la capacidad de la línea de galvanizado, garantizando el cumplimiento de las propiedades, de acuerdo con las normas ASTM A653 y ASTM A924, aprovechando mejor los recursos tecnológicos con los que cuenta la línea.

En el marco de este trabajo se podrá explorar los principios metalúrgicos en los que se fundamenta el recocido en continuo, en aras de conocer la microestructura y propiedades mecánicas de los aceros cuando se opera la línea de galvanización bajo condiciones normales y bajo condiciones de máxima capacidad, además se pretende conocer desde la estadística los rangos reales de dureza de las referencias de mayor importancia en producción y con base a esta información generar directrices que permitirán enfocar al proceso de recocido a un mejor

desempeño y a contribuir a la calidad de los productos. Adicionalmente este trabajo presenta una oportunidad para develar posibles problemas y oportunidades de mejora en el área de la galvanización en continuo.

A nivel práctico, este trabajo pretende sensibilizar al personal de producción y calidad acerca de las propiedades mecánicas, microestructurales de los aceros procesados y su relación con las variables más importantes de operación. Además de contribuir a la mejora de las tasas de producción y la mejora de la calidad en los productos laminados, recocidos y galvanizados.

Finalmente, este trabajo es de gran utilidad para la empresa ACESCO, pues permite caracterizar los aceros que se galvanizan en la línea LGC01, evidenciar problemas y oportunidades con miras a mejorar el desempeño, reducir los costos y mejorar la calidad de sus productos.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la capacidad de proceso de un horno de recocido en continuo por medio de la caracterización metalúrgica de los aceros procesados y de herramientas estadísticas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Describir de manera estadística el estado de operación del horno de recocido.
- Determinar el estado de control estadístico del horno de recocido de la línea LGC01, mediante el uso de Control Estadístico de Procesos.
- Determinar la idoneidad del recocido, por medio de la elaboración de los perfiles microestructurales y de propiedades mecánicas de los calibres que representan el 45% de los productos galvanizados por la línea LGC01.
- Proponer acciones para llevar el proceso de recocido a control estadístico.
- Aumentar la producción horaria en los calibres de banda que presenten oportunidades de mejora.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 RECOCIDO

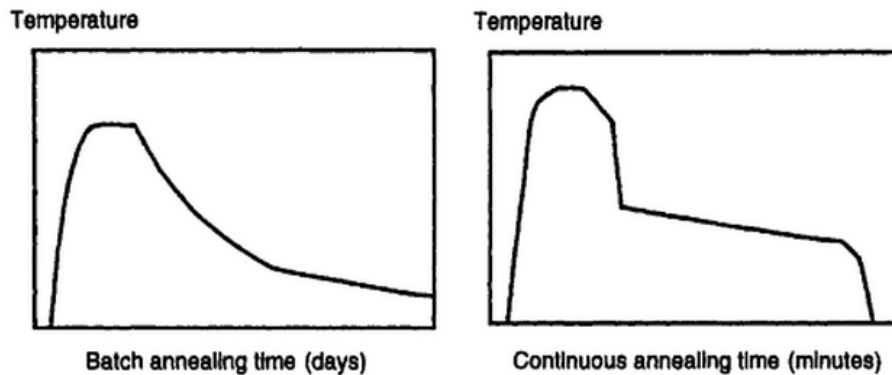
Cuando un material metálico se deforma en frío, experimenta un endurecimiento por deformación; el fenómeno se presenta en la mayoría de operaciones de conformado, como: trefilado, embutición, extrusión, laminación, entre otras. El endurecimiento de los materiales metálicos se da principalmente por la interacción progresiva entre las dislocaciones, lo que disminuye en el metal su ductilidad, y por extensión, su porcentaje de deformación; a su vez, se aumenta la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tracción del material.

Para anular los efectos del trabajo en frío en los metales y para darle propiedades de un material dúctil es necesario someter el material metálico a un tratamiento térmico de recocido. Asdrúbal Valencia, docente de la Universidad de Antioquia, expone que “el recocido consiste en calentar hasta una temperatura adecuada, dejar permanecer un determinado tiempo y enfriar correctamente con el fin primordial de ablandar los materiales metálicos” [1]. De acuerdo con esta afirmación, el recocido le confiere a un acero endurecido las características típicas de un material dúctil, disminuye la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tracción. Lo anterior como consecuencia de cambios en la microestructura del metal.

3.1.1 Recocido industrial. El recocido, en la industria de los aceros planos, se realiza de manera continua y discontinua. En el recocido discontinuo o en “campana”, las bobinas de acero laminado en frío se someten a elevadas

temperaturas; generalmente durante varias horas. Las bobinas se recubren con una campana que se encarga de elevar la temperatura y garantizar una atmósfera completamente reductora [2]. En el recocido en continuo la banda de acero laminado en frío recorre una serie de hornos que elevan la temperatura de la lámina en un periodo muy corto, comúnmente es del orden de segundos o minutos.

Figura 1. Perfiles de temperatura en recocido. a) Campana. b) Continuo.



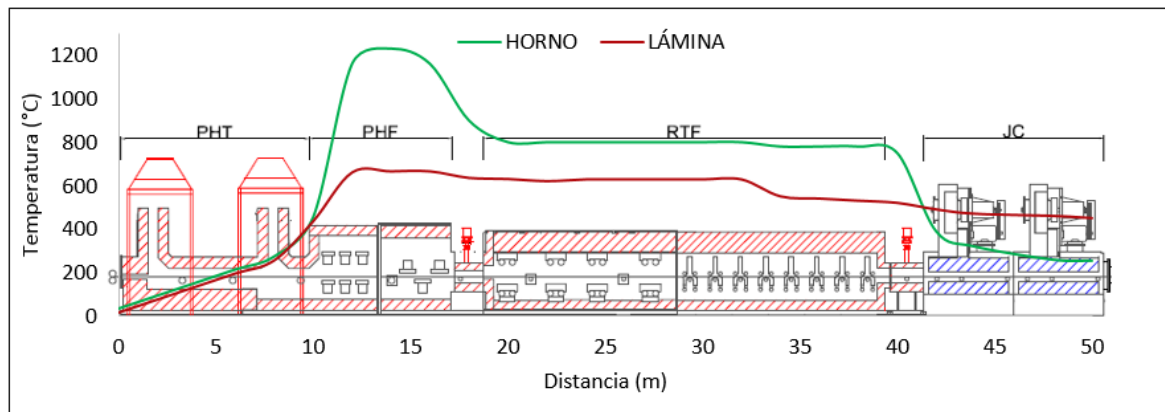
Fuente: LLEWELLYN, T y HUDD, R. Steels metallurgy and applications. 3 ed. Butterworth Heinemann. 1998. p. 6 [3]

El tratamiento térmico de recocido en continuo y discontinuo presentan las mismas etapas: calentamiento, sostenimiento y enfriamiento. Sin embargo, se generan diferentes perfiles de temperatura para cada uno de los procesos; en la Figura 1 se muestra esquemáticamente los perfiles que se obtienen en cada una de las formas de recocido.

En ACESCO, empresa líder en el mercado de los aceros planos en Colombia, se implementa el recocido en continuo a mediados de la década del 90, como parte de

una línea completa de galvanización por inmersión en caliente. El horno consta de cuatro partes fundamentales: zona de precalentamiento (PHT), horno de fuego directo (PHF), Hornos de tubos radiantes (RTF) y dos “Jet Coolers” (JC).

Figura 2. Perfil de temperatura, para el horno de recocido y la banda metálica.



En la figura 2 se muestra un bosquejo del horno de recocido con los respectivos perfiles de temperaturas del horno y la banda metálica. El horno permite restaurar la microestructura y preparar la banda metálica (que transita en su interior) para ser galvanizada por inmersión en caliente.

El horno de recocido de la línea LGC01 presenta diferentes temperaturas en cada una de las zonas; en La zona de precalentamiento (PHT) la banda metálica eleva su temperatura por acción de los gases que viajan en contraflujo. En los hornos de fuego directo (PHF) se ataca la banda metálica con una llama que puede alcanzar los 1200 °C. En esta zona el material se recupera sin que disminuyan sus propiedades mecánicas. En la zona de tubos radiantes (RTF) se lleva a cabo la recristalización, etapa donde la microestructura nuclea. Adicionalmente, la zona de

tubos radiantes permite el crecimiento de grano. En RTF se alcanzan temperaturas internas alrededor de los 850° C, mientras que la lámina alcanza temperaturas por debajo de la A1. La etapa final es la del enfriamiento; esta se lleva a cabo por medio de gases; un par de jet coolers (JC) envían una corriente de gas inerte, que hace que disminuya rápidamente la temperatura, que oscila alrededor de los 260 ° C en el recinto y la banda metálica abandona el horno a una temperatura promedio de 460° C y se dispone a entrar en la cuba de galvanización. Del proceso anterior, emerge un material dúctil, con menor resistencia a la fluencia y un menor valor en su resistencia máxima, garantizando una homogeneidad en todo el ancho de la banda. [4]

3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS ACEROS

La clasificación de los aceros planos galvanizados se hace de acuerdo con la norma ASTM A653. Esta clasificación está basada en los valores de la resistencia a la fluencia (YP), la resistencia a la tracción (TS) y el porcentaje de elongación (%E). En la tabla 1. se presenta los valores mínimos para la designación de los aceros estructurales (SS). Así, por ejemplo, un acero grado 40 debe cumplir con una resistencia a la fluencia (mínima) y resistencia a la tracción (mínima) de 40 y 55 Ksi, respectivamente, y una elongación mínima de 16%.

Tabla 1. Clasificación de los aceros estructurales

Designation	Grade	Inch-Pound Units		
		Yield Strength, min, ksi	Tensile Strength, min, ksi ^A	Elongation in 2 in., min, % ^A
SS	33	33	45	20
	37	37	52	18
	40	40	55	16
	50 Class 1	50	65	12
	50 Class 2	50	...	12
	50 Class 3	50	70	12
	50 Class 4	50	60	12

Fuente: ASTM A653. Standard Specification for Steel Sheet, Zinc Coated or Zinc-Iron Alloy-Coated by the Hot-Dip Process [5]

Adicionalmente, la norma establece los requerimientos mínimos para los aceros comerciales (CS). Estas especificaciones se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de los aceros comerciales.

Designation	(Longitudinal Direction)		
	Yield Strength		Elongation in 2 in. [50 mm], %
	ksi	[MPa]	
CS Type A	25/55	[170/380]	≥20
CS Type B	30/55	[205/380]	≥20
CS Type C	25/60	[170/410]	≥15

Fuente: ASTM A653. Standard Specification for Steel Sheet, Zinc Coated or Zinc-Iron Alloy-Coated by the Hot-Dip Process [5]

Bajo estos parámetros ACESCO, clasifica los productos recocidos y galvanizados en la línea LGC01.

3.3 CONTROL ESTADÍSTICO DE PROCESO

Los procesos industriales están sometidos a una serie de factores que son de carácter aleatorio y que afectan los productos finales. Este fenómeno hace que no se fabriquen artículos totalmente iguales, es decir, presentan una variabilidad. Lo anterior obedece a las fuentes de variación, algunas de ellas pueden ser de corto y largo plazo, como el ajuste de la máquina y el desgaste de la herramienta, entre otras.

La variabilidad no se desea en la producción y se debe trabajar para minimizarla y mantenerla bajo ciertos límites; en ese sentido, el control estadístico de proceso es una herramienta que permite evaluar la variabilidad y tomar acciones para mantenerla dentro de unos límites establecidos. [6] Esta herramienta también contribuye a conocer mejor el proceso, a mejorar la calidad de los productos y a optimizar los costos de producción.

Los procesos varían como respuesta a la aleatoriedad de los factores que influyen en las operaciones industriales. Las causas de la variación se dividen en dos: causas comunes y causas especiales; sin embargo, la frontera entre estas dos causas no está perfectamente definida.

3.3.1 Capacidad de proceso. La capacidad de un proceso mide que tan apto es para cumplir con una especificación de calidad, impuesta por los clientes o por la organización. Una forma de establecer cuantitativamente la capacidad del proceso es estableciendo una relación entre el intervalo de las especificaciones y la variabilidad natural del proceso [7]. Es decir, se toman las especificaciones de

calidad inferior y superior (LS y LI), que en otras palabras es la tolerancia y se divide entre la variación natural del proceso, 6σ , es de esta manera como se determina el índice de capacidad Cp.

$$Cp = \frac{LS - LI}{6\sigma}$$

Es decir, si el 99.37% de las características de calidad de un producto, representadas por la variación natural del proceso (6σ) se encuentran dentro de las especificaciones se dice que el proceso es capaz y posee un $Cp > 1$; cuando $Cp < 1$ se dice que el proceso no es capaz de cumplir con las especificaciones. Algunos autores recomiendan un Cp mínimo de 1.33 para considerar que el proceso realmente es capaz de satisfacer las especificaciones de calidad.

4. METODOLOGÍA

Durante este trabajo se estudian cinco referencias que representan el 45% de la producción de la línea de galvanización LGC01, 0.52 mm, 0.57 mm, 0.67 mm, 0.72 mm, y 0.82 mm; todas con un ancho de banda de 1220 mm. Estas bandas metálicas se dividen en dos grandes grupos, aceros de calidad comercial (CS – Commercial Steels) y aceros de calidad estructural (SS –Structural Steels), clasificados de acuerdo con la norma ASTM A653. En este caso para darle las características de aceros estructurales se emplea como materia prima acero con un contenido de carbono máximo del 0.1% en peso y para los aceros comerciales de un contenido de carbono máximo de 0.06% es decir corresponden a aceros SAE 1010 y acero SAE 1005.

4.1 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA

Para dar inicio al conocimiento del estado actual del recocido y galvanizado se crea una base de datos con información histórica, evaluando un periodo de cuatro meses, comprendido entre el 6 de junio de 2014 y el 6 de octubre de 2014; en esta se registran las variables más importantes que intervienen durante el proceso; permitiendo conocer las temperaturas alcanzadas, tanto en la banda metálica, como en cada una de las zonas, la velocidad de la línea, las dimensiones de la banda, entre otras variables. La información se extrae de las hojas de registro que llenan los operarios diariamente y se apoya con registros hechos por servidores de la

empresa*. Estos archivos son de alta confiabilidad, ya que los almacena de manera continua y cada 0.01 s.

Para llevar a cabo el análisis de capacidad, desde el punto de vista estadístico, se forma una base de datos alternativa, teniendo como fuente principal el sistema empleado en la empresa SAP se analizan las mismas cinco referencias, en el mismo periodo, tomando como característica de calidad la dureza para la evaluación de la capacidad del proceso. Para tal efecto, la empresa, de manera empírica, tiene establecido una tolerancia de dureza para cada calidad que produce; en este caso 55-65 HRB para CS y 65-75 HRB para SS. Estos rangos constituyen los límites superiores e inferiores que permiten el cálculo del Cp y el Ppk.

4.2 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA

4.2.1 Toma de muestras. Se cortan muestras de 0.50 m de largo por el ancho de la banda (1.220mm), (Figura 3 a). Esta muestra se extrae en la salida de la línea LGC01; se registra la hora, fecha y el lote. La muestra se divide en dos partes iguales, originando dos muestras de 0.25 m por el ancho de la banda (Figura 3b). De las bandas cortadas extraen las probetas para el ensayo de tensión (Figura 4); La mitad se guarda como testigo y la otra mitad de las muestras se destina para ensayo de tensión, para evaluación de la microestructura y para el ensayo de dureza.

* Los sistemas empleados son IBA y Calidad en Línea.

Figura 3. a) Muestra inicial. b) Muestra dividida.

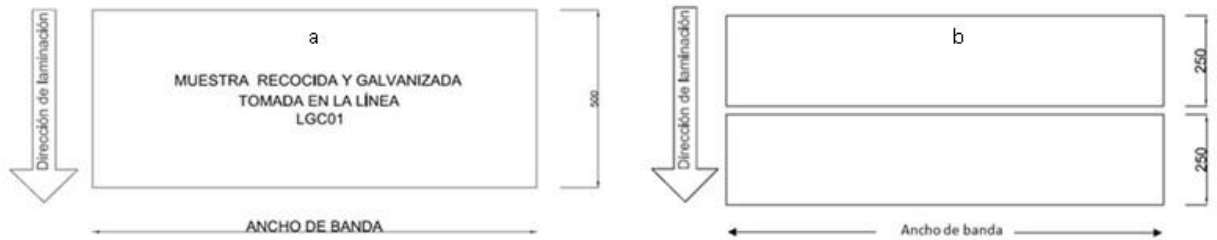
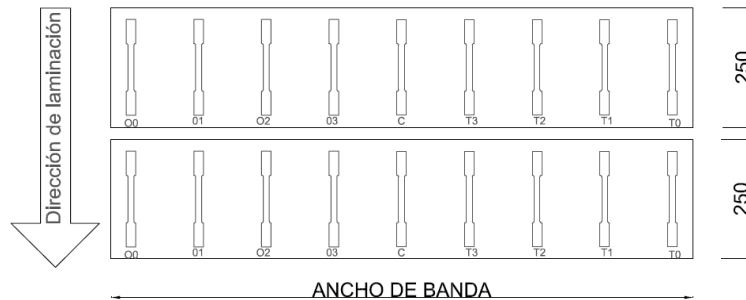


Figura 4. Muestras troqueladas



4.2.2 Análisis metalográfico. Para evaluar la metalografía de cada referencia estudiada se extrae un pequeño cuadro de 5 mm x 5 mm x el espesor de la lámina, en cada muestra (Ver figura 5), seguidamente, las muestras se organizan en orden estricto, y se montan en una matriz de baquelita (Ver figura 6).

La preparación se realiza de acuerdo con lo establecido en la norma ASTM E3-11 y ASTM E407-07 para la preparación metalográfica y el ataque químico, respectivamente. El tamaño de grano se determina de acuerdo con la norma ASTM E112-13.

Figura 5. Muestra para tensión y metalografía.

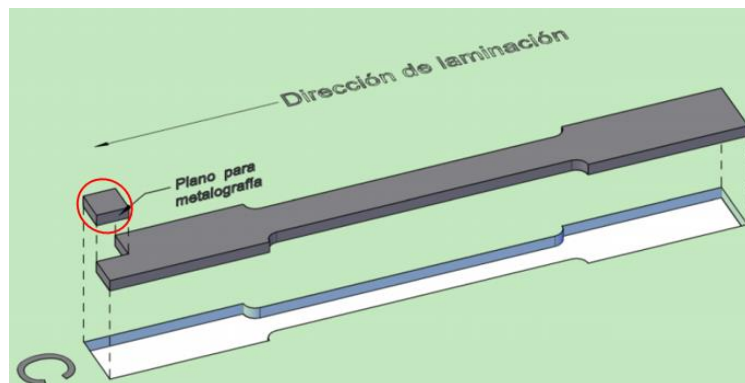
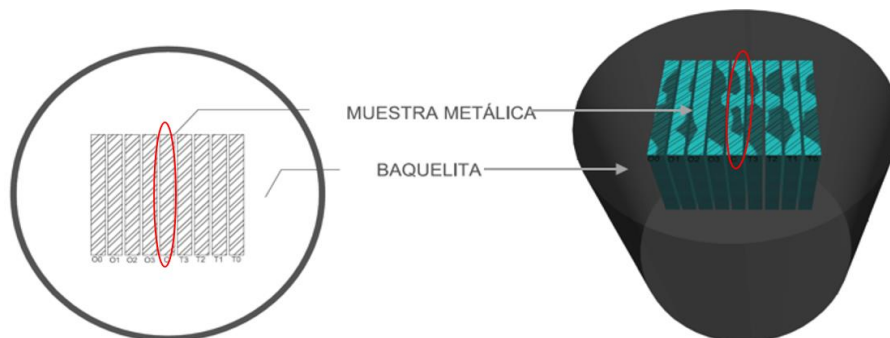


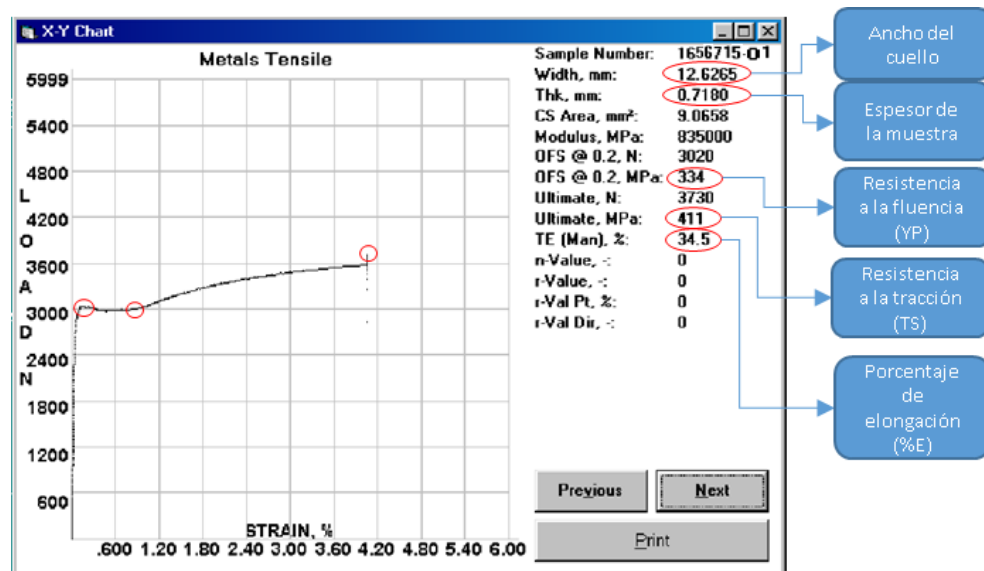
Figura 6. Montaje de la muestras en baquelita.



4.2.3 Ensayo de dureza. La medición de la dureza se realiza sobre la muestra antes de ser ensayada a tensión, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM E18-11. Para hacer estas mediciones se utiliza un durómetro Wilson/Rockwell de la serie 600. La dureza se mide en escala 30T y luego se convierte a la escala Rockwell B.

4.2.4 Ensayos de Tensión. Durante este trabajo se emplea una máquina de ensayos TINIUS-OLSEN model 129, de construcción modular y una capacidad de 150 kN. En la figura 7. se presenta la gráfica que se obtiene como resultado de ensayar la muestra O1 del lote 1656715, de calidad estructural, con un espesor de 0.72 mm.

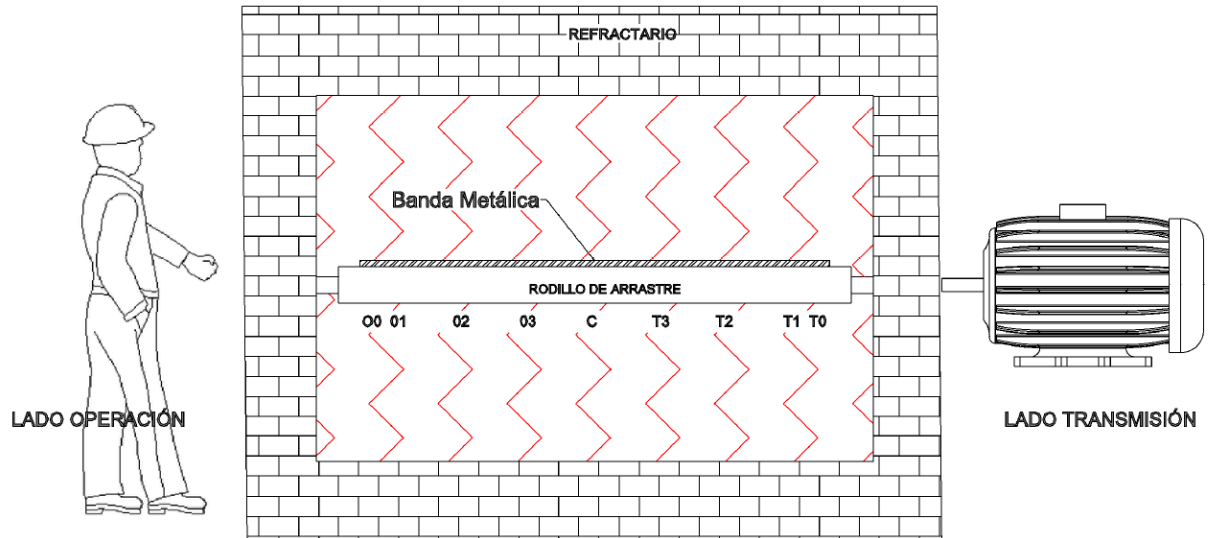
Figura 7. Curva de tracción obtenida durante la prueba de capacidad real del horno.



Fuente: Máquina universal de ensayos TINIUS-OLSEN model 129.

Con el propósito de identificar las muestras, se establece una nomenclatura basada en la posición en la que se extrae la probeta de ensayo. Estas se marcan en el extremo izquierdo (Figura 8) con “O0” que indica la posición Operación cero, y “T0” como Transmisión cero, los valores van aumentando a medida que se acerca al centro y este se denota con la letra C. En la Figura 8 la dirección de laminación y recorrido al interior del horno de recocido es perpendicular al plano del papel.

Figura 8. Esquema de la nomenclatura utilizada.



4.3 CAPACIDAD REAL

Una vez superada la etapa descrita anteriormente, se plantea un diseño de experimento, que tiene como hipótesis principal verificar si las propiedades mecánicas son homogéneas en el ancho de banda. Escrito de otra manera sería así:

$$H_0 = P_{OPERACIÓN} = P_{CENTRO} = P_{TRANSMISIÓN}$$

$$H_A = P_{OPERACIÓN} \neq P_{CENTRO} \neq P_{TRANSMISIÓN}$$

Es decir, la hipótesis nula, H_0 del diseño experimental indica que las propiedades mecánicas (denotadas con la letra P) son iguales en el lado Operación, Centro y

Transmisión y mientras que la hipótesis alternativa, H_A , señala todo lo contrario. En la tabla 3 se sintetizan los factores y niveles correspondientes al experimento.

Tabla 3. Especificación del diseño de experimentos.

Referencia	Factor A: Velocidad (Ton/H)	Factor B: Posición (mm)								
		00	01	02	03	C	T3	T2	T1	T0
0.82 x 1220 Calidad Comercial (AISI 1006)	22.4	25	130	290	450	610	770	930	1090	1195
	23.4									
	24.4									
	25.4									
0.72 x 1220 Calidad Estructural	25.8	25	130	290	450	610	770	930	1090	1195
	25.3									
	24.8									

El diseño experimental consiste en un diseño de dos factores (2^K con $K = 2$), la velocidad de la línea de galvanización, encargada de definir el tiempo permanencia de la banda metálica al interior del horno; y la posición en la banda, teniendo en cuenta la nomenclatura definida anteriormente y bajo el supuesto de que en cada corrida, se trata cada posición como si estuviera aislada de las demás partes de la banda. Este arreglo experimental no se lleva a cabo en las cinco referencias y sólo se hacen dos corridas, debido a la complejidad y costo por corrida.

5. RESULTADOS

5.1 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA

El propósito de esta evaluación de capacidad es resolver los siguientes interrogantes: ¿Qué tipo de acero, en cuanto a dureza, están produciendo? ¿Cuál es la dureza media para cada una de los tipos de acero? A continuación se muestran los resultados, descritos por medio de diferentes estadísticos.

Tabla 5. Datos de dureza para la referencia 0.72 mmx 1220mm (SS)

60	60	60	65	60	69	60	62	59	55
60	60	60	63	60	63	61	60	61	59
60	70	60	64	70	63	60	60	61	62
63	60	60	64	60	67	66	61	61	62
60	60	60	62	60	64	69	61	66	59
60	59	60	62	61	61	61	62	56	63
60	64	60	61	62	65	62	61	57	62
60	64	60	62	62	63	61	60	60	62
60	68	60	67	62	69	61	65	63	61
60	66	60	62	61	61	63	60	65	61

Fuente: SAP

Con los datos de la tabla anterior, el primer aspecto a conocer es la tendencia central de los datos, en otras palabras, determinar un valor al cual los datos tienden a aglomerarse. Las medidas de tendencia central son: la media, la moda y la mediana. El procedimiento es el siguiente:

Media

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

$$\bar{X} = 61.8 \text{ HRB}$$

Mediana o percentil 50

$$\check{X} = 61 \text{ HRB}$$

Moda

$$\text{moda} = 60 \text{ HRB}$$

Las medidas de tendencia central no son un criterio suficiente de calidad, [8] pues no se tiene en cuenta la dispersión de los datos. Una manera de verificar la variabilidad es mediante el cálculo de los estadísticos de dispersión, como la desviación estándar.

Desviación estándar

$$S = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

$$S = 2.785$$

A continuación se presentan los resultados del estudio de control estadístico para la referencia 0.72 mm x 1220 mm, los datos para este análisis se toman de la tabla 4.

Tabla 4. Muestreo para referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS).

Lote	Hora	Fecha	HRB	Lote	Hora	Fecha	HRB
0001159180	12:49:36 AM	06/06/2014	60	0001242619	5:48:26 AM	29/06/2014	60
0001159221	1:30:32 AM		60	0001242670	9:57:17 AM		60
0001159327	2:31:42 AM		60	0001242720	11:24:04 AM		70
0001159421	3:40:07 AM		63	0001242810	11:24:50 AM		60
0001159495	4:46:45 AM		60	0001242871	1:09:16 PM		60
0001192183	2:13:52 AM	21/06/2014	60	0001258816	12:57:09 PM	03/07/2014	65
0001192184	2:17:39 AM		60	0001258827	1:49:54 PM		63
0001192279	3:14:24 AM		60	0001258834	2:52:57 PM		64
0001192300	3:35:29 AM		60	0001258847	5:20:17 PM		64
0001192360	4:34:01 AM		60	0001258864	6:43:18 PM		62
0001198751	9:13:07 AM	24/06/2014	60	0001265105	12:02:23 AM	07/07/2014	69
0001198792	9:52:05 AM		60	0001265161	1:28:30 AM		63
0001198955	10:57:30 AM		70	0001265275	2:34:03 AM		63
0001199085	12:49:43 PM		60	0001265357	2:56:34 AM		67
0001199241	1:56:57 PM		60	0001265831	4:49:24 AM		64
0001199469	4:50:21 PM	24/06/2014	60	0001269592	10:04:16 AM	09/07/2014	59
0001199495	5:11:13 PM		60	0001269671	10:36:43 AM		64
0001199603	6:20:27 PM		60	0001269703	11:37:04 AM		64
0001199691	7:25:42 PM		60	0001269716	12:42:30 PM		68
0001199775	8:32:37 PM		60	0001269752	1:26:47 PM		66

Tabla 5. Muestreo para referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS). (Continuación)

Lote	Hora	Fecha	HRB	Lote	Hora	Fecha	HRB
0001210245	12:55:05 AM	29/06/2014	60	0001275924	10:02:08 AM	11/07/2014	62
0001210306	1:58:35 AM		60	0001276005	10:51:58 AM		61
0001210328	2:24:15 AM		60	0001276288	11:42:10 AM		62
0001210365	3:17:37 AM		60	0001276388	12:49:25 PM		67
0001210432	4:48:34 AM		60	0001276523	1:54:09 PM		62
0001210484	12:00:00 AM		61	0001276923	12:00:00 AM		61
0001210644	1:11:27 AM	17/07/2014	62	0001276986	1:10:29 AM	07/08/2014	65
0001210668	2:18:17 AM		62	0001277077	2:11:11 AM		63
0001210678	3:20:20 AM		62	0001277287	4:25:07 AM		69
0001210698	4:27:33 AM		61	0001277355	5:40:00 AM		61
0001217937	4:52:01 PM	27/07/2014	60	0001283221	12:11:54 AM	10/08/2014	62
0001218045	5:58:11 PM		61	0001283250	1:10:25 AM		60
0001218156	6:42:05 PM		60	0001283311	2:21:46 AM		60
0001218490	7:44:36 PM		66	0001283413	3:42:58 AM		61
0001218695	8:47:31 PM		69	0001283460	5:03:28 AM		61
0001223597	11:15:27 AM	31/07/2014	61	0001302764	12:16:34 PM	19/08/2014	62
0001223627	12:22:44 PM		62	0001302886	1:57:16 PM		61
0001223651	1:32:18 PM		61	0001303035	2:56:13 PM		60
0001223663	2:17:53 PM		61	0001303319	5:01:18 PM		65
0001223691	5:08:29 PM		63	0001303396	6:12:03 PM		60
0001228925	12:00:00 AM	03/08/2014	59	0001309092	10:50:41 AM	22/08/2014	55
0001228959	1:16:06 AM		61	0001309179	11:27:50 AM		59
0001229077	2:01:11 AM		61	0001309303	12:26:49 PM		62
0001229248	2:55:04 AM		61	0001309386	1:21:45 PM		62
0001229493	4:03:56 AM		66	0001309510	2:20:59 PM		59
0001233709	1:16:58 PM	06/08/2014	56	0001336997	12:20:36 AM	08/09/2014	63
0001233812	2:10:41 PM		57	0001337013	1:17:10 AM		62
0001233898	4:49:22 PM		60	0001337027	2:12:50 AM		62
0001234011	6:11:01 PM		63	0001337054	3:14:17 AM		61
0001234137	7:37:06 PM		65	0001337069	4:09:33 AM		61

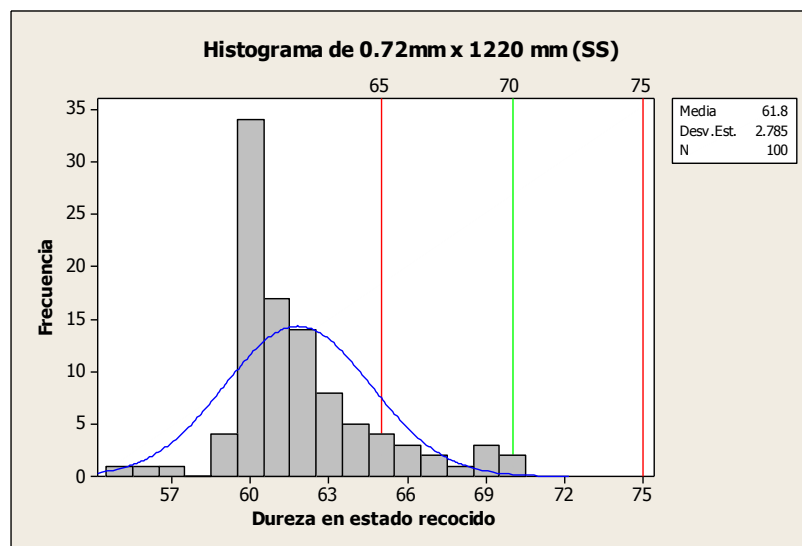
Fuente: ACESCO.

En este caso, el histograma de la gráfica 1 muestra que el proceso no se encuentra centrado, respecto a los rangos de calidad, adicionalmente la distribución de los datos se encuentra sesgada hacia la derecha y presenta una alta frecuencia de los datos en el valor de 60 HRB.

Con la información que se muestra en la gráfica 1, se observa que los datos de dureza para la referencia 0.72 mm x 1220 (SS) poseen una desviación estándar $\sigma = 2.785$, bajo el supuesto $\sigma = S = \sigma_L$. Con este valor se puede calcular la capacidad del proceso a largo plazo de la siguiente manera:

$$C_p' = \frac{LS - LI}{6\sigma} = \frac{75 - 65}{6(2.785)} = 0.598$$

Gráfica 1. Histograma de durezas para 0.72 mm x 1220 mm



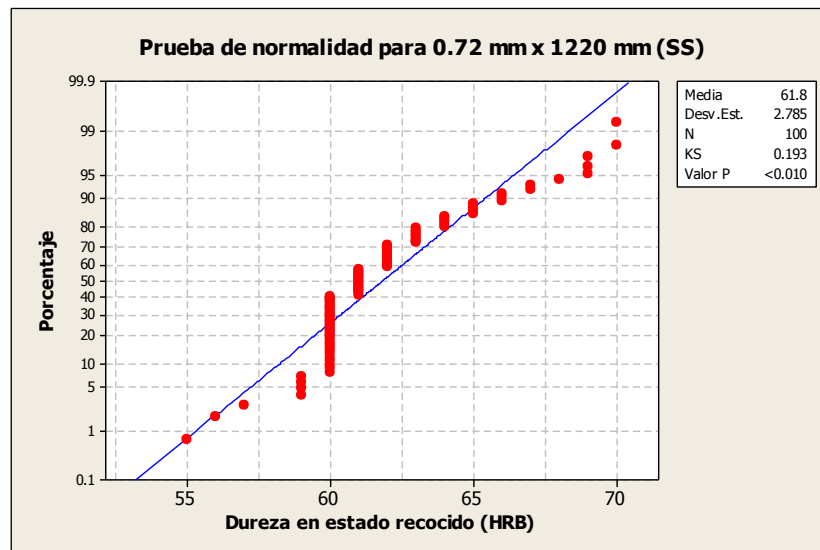
Con el valor de la desviación estándar es posible calcular el índice P_{pk} , que se define igual que el índice C_{pk} , pero utilizando la desviación estándar a largo plazo σ_L .

$$P_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{LS - \bar{X}}{3\sigma_L}, \frac{\bar{X} - LI}{3\sigma_L} \right\}$$

$$P_{pk} = \text{Min} \left\{ \frac{75 - 61.8}{3(2.785)}, \frac{61.8 - 65}{3(2.785)} \right\} = -0.386$$

Para continuar con el estudio de capacidad es determinar si los datos se agrupan bajo una distribución normal, para esto se verifica mediante la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Los resultados se muestran en la gráfica 2.

Gráfica 2. Prueba de normalidad para 0.72 mm x 1220 mm (SS)



De acuerdo con la gráfica 2. el valor p (0.010) está por debajo del valor de significancia (0.05), por lo tanto los datos para la calidad, 0.72 mm x 1220 mm (SS), no se agrupan con una distribución normal. En estos casos se acude a la definición

del reporte técnico ISO 12783 para calcular el índice de capacidad del proceso, este se define de la siguiente manera:

$$C_p = \frac{LS - LI}{P_{0.99865} - P_{0.00135}}$$

Dónde:

$P_{0.99865} - P_{0.00135}$ = Diferencia entre el percentil 99.865 y el percentil 0.135.

$LS - LI$ = Diferencia entre la especificación superior y la especificación inferior.

De esta manera, cualquiera que sea la distribución de los datos, el 99.73% estarán dentro de estos dos percentiles.

$$C_p = \frac{65 - 75}{70 - 55} = \frac{10}{15} = 0.667$$

Cartas de control $\bar{X} - R$

Para la referencia 0.72 mm x 1220 mm las especificaciones de dureza deben ser $LS = 75$ y $LI = 65$. Las cartas de control se elaboran fundamentalmente para evaluar la variabilidad y la estabilidad del proceso de recocido en continuo.

Ahora se calculan los límites de la carta de control \bar{X} .

$$LS = 61.8 + 0.577(5.99) = 65.25$$

$$LI = 61.8 - 0.577(5.99) = 58.343$$

El gráfico de control se presenta en la gráfica 3, donde se aprecia que no existe ningún punto fuera de control; es decir que el horno de recocido funciona de manera estable al momento de tratar térmicamente la referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS).

Ahora se calcula los límites de control para el gráfico de rangos, de la siguiente manera:

$LS = D_4\bar{R}$, $LC = \bar{R}$ y $LI = D_3\bar{R}$. Donde D_3 y D_4 están tabulados en la literatura y dependen del tamaño de grupo (n)

$$LS = 2.115(5.99) = 12.66$$

$$LI = 0(5.99) = 0$$

$$LC = 5.99$$

Los resultados de las referencias restantes se presentan en la tabla 5, mientras que los gráficos (histogramas, cartas de control y prueba de normalidad) se presentan en el anexo B.

Gráfica 3. . Gráfico $\bar{X} - R$ para 0.72 mm x 1220 mm (SS).

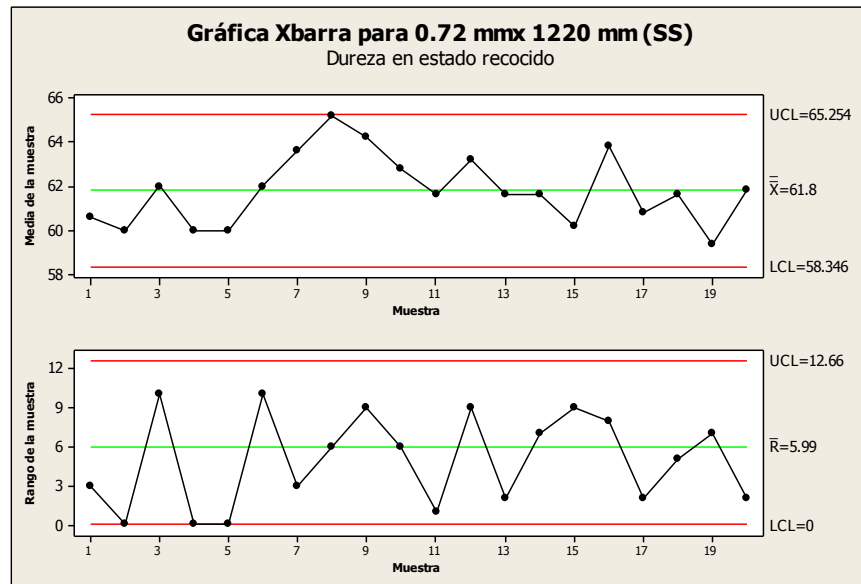


Tabla 6. Resultados de la evaluación estadística.

Referencia	Dureza en estado recocido (HRB)						Control estadístico					
							índices de capacidad			Gráfico de control X		
	Calidad	Media	Mediana	Rango	Moda	S	Cp	Cp'	Ppk	LS	LC	LI
0.72 mm x 1220 mm	SS	61.8	61	15	60	2.78	0.66	0.59	-0.38	65.25	61.8	58.34
0.82 mm x 1220 mm	CS	54.1	54.0	12.0	50.0	3.27	0.84	0.50	-0.09	58.69	54.15	49.6
0.67 mm x 1220 mm	CS	55.85	56	10	58	3.02	1.0	0.55	0.27	62.56	55.85	49.13
0.57 mm x 1220 mm	CS	55.72	55.33	10	55	2.50	1.0	0.67	-1.23	57.58	55.72	53.67
0.52 mm x 1220 mm	CS	56.01	57	10	57	2.87	1.01	0.59	0.117	58.38	56.01	53.646

5.2 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA

En esta etapa y con el ánimo de verificar las propiedades mecánicas y microestructurales de las referencias más importantes que se fabrican en la

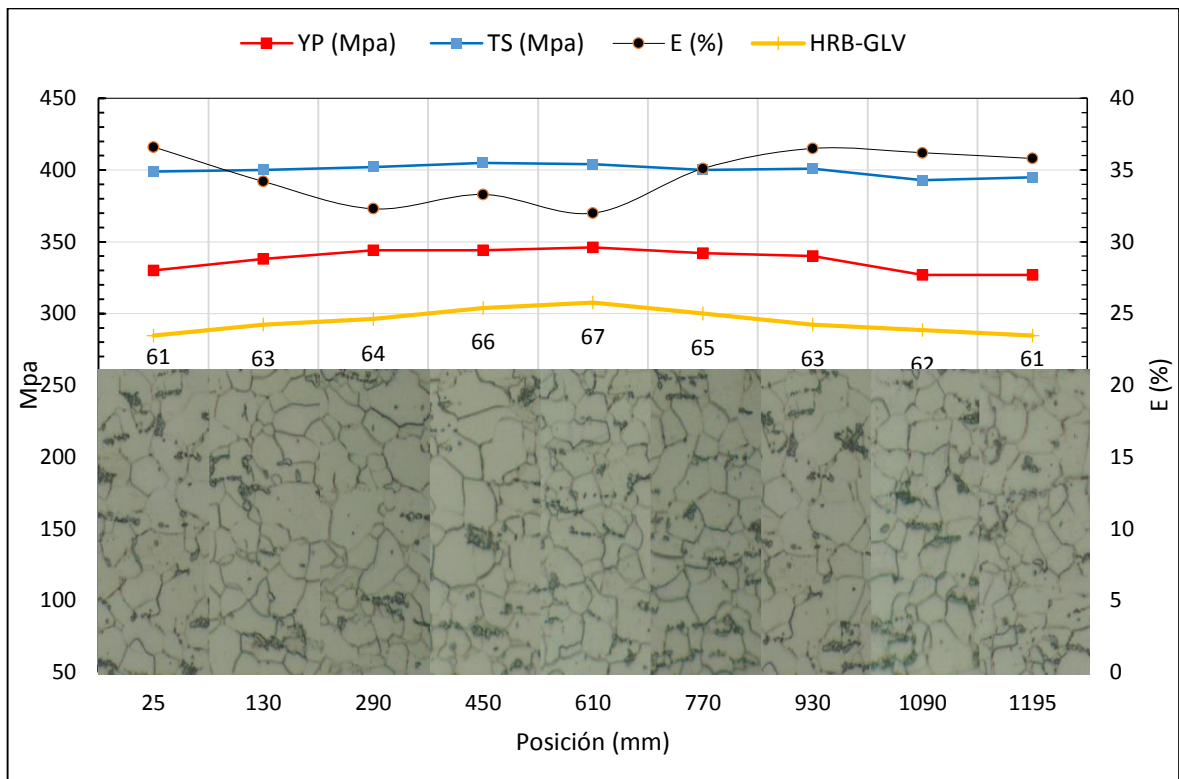
empresa, se extrae de manera aleatoria una serie de muestras, se determinan sus propiedades mecánicas y se evalúa su microestructura.

En la gráfica 4 se presentan las propiedades mecánicas y la microestructura de la referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS), con un contenido de carbono de 0.08% en peso. Este material fue procesado a una velocidad de 23.8 Ton/H. y alcanzó temperaturas de 628°C y 625°C a la salida del horno de fuego directo y a la salida del horno de tubos radiantes, respectivamente.

La gráfica 5 es el resultado de la evaluación para la referencia 0.67 mm x 1220 mm (CS) con un contenido de carbono de 0.05% en peso, procesado a una velocidad de 20.7 Ton/H alcanzó temperaturas de 627°C y 651°C a la salida del horno de fuego directo y a la salida del horno de tubos radiantes, respectivamente.

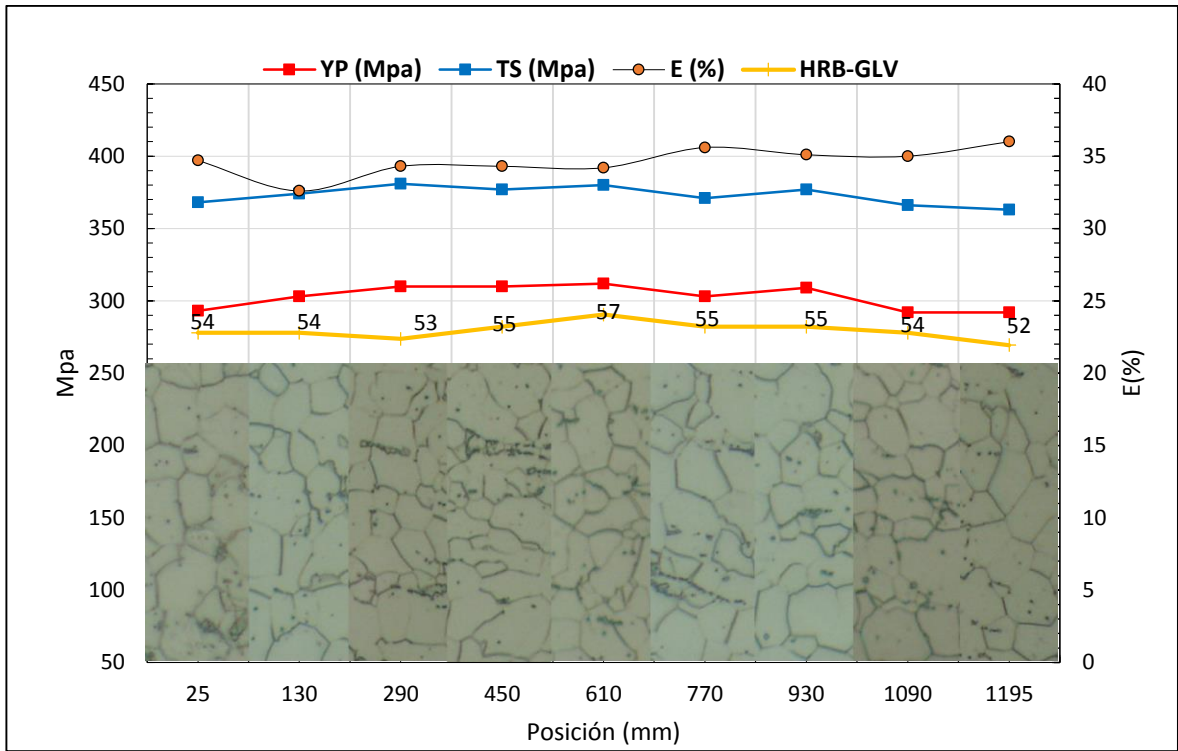
La muestra de referencia 0.52mm x 1220 mm (CS) (gráfica 6) con un contenido de carbono de 0.04% en peso alcanzó temperaturas de 656°C y 640°C a la salida del horno de fuego directo y en la salida del horno de tubos radiantes, respectivamente.

Gráfica 4. Perfil de 0.72 mm x 1220 mm (SS).

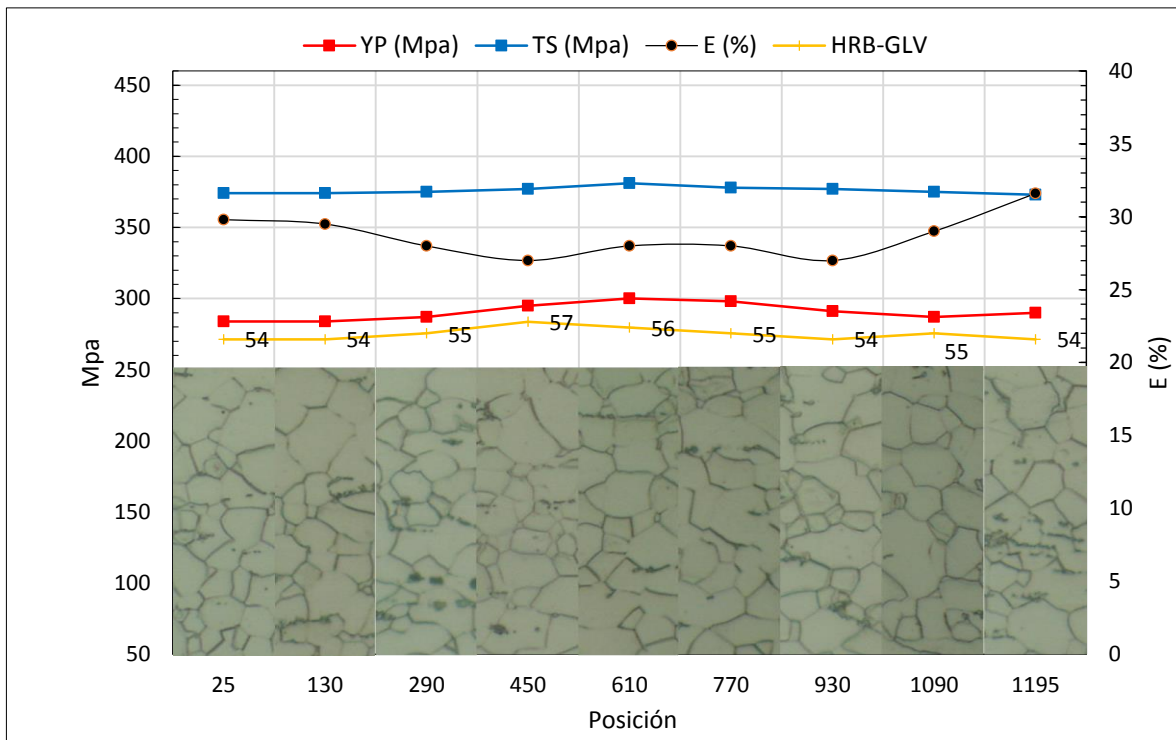


A las referencias de 0.57 mm, y 0.82 mm x 1220 mm no se les evaluó la microestructura, no obstante, se evaluaron las propiedades mecánicas y los resultados se encuentran resumidos en el Anexo C. Estas dos referencias presentan un comportamiento análogo a las expuestas en las gráficas 4, 5 y 6, con un leve aumento en las propiedades mecánicas en el centro de la banda.

Gráfica 5. Perfil de 0.67 mm x 1220 mm (CS).



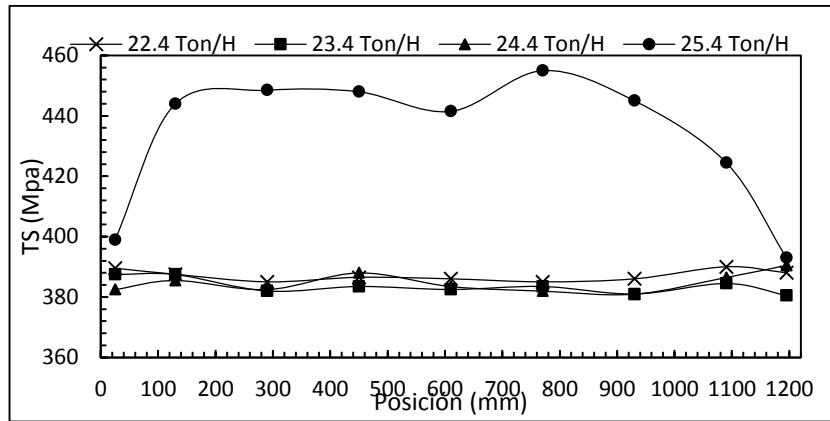
Gráfica 6. Perfil de 0.52 mm x 1220 mm (CS).



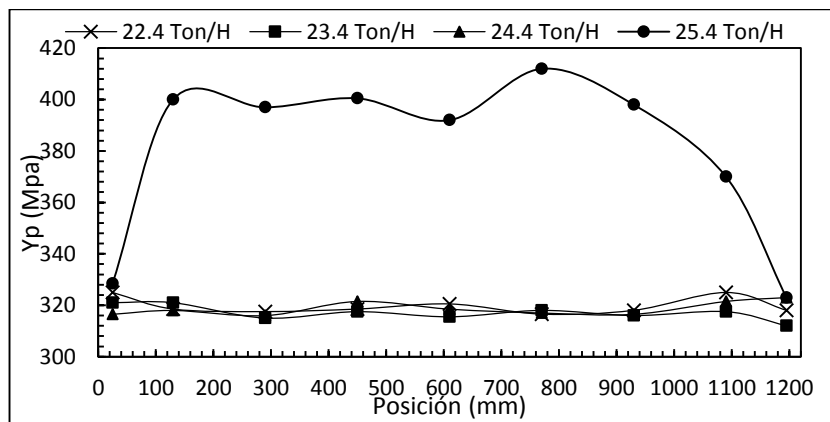
5.3 CAPACIDAD REAL DEL HORNO DE RECOCIDO

A continuación se presentan los resultados del diseño de experimentos con dos factores o 2^K con $K = 2$. El experimento se plantea en dos referencias 0.82 mm x 1220 y 0.72 mm x 1220 mm, calidad CS y SS, respectivamente. Para la referencia comercial se lleva a cabo un diseño factorial completo 4 x 9 con dos réplicas; se realizan 72 pruebas. Mientras que para la referencia estructural se lleva a cabo un diseño factorial completo de 3 x 9 con dos réplicas para un total de 54.

Gráfica 7. Resistencia a la tracción, Vs posición para 0.82 mm x 1220 mm (CS)



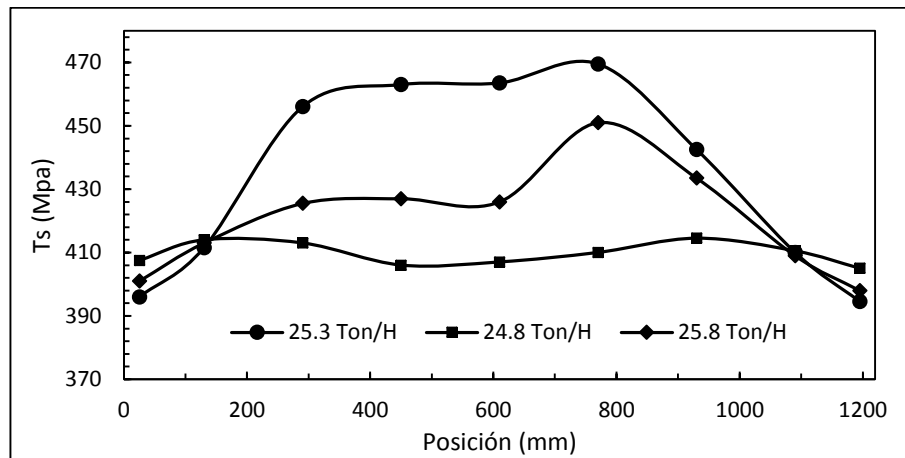
Gráfica 8. Resistencia a la fluencia Vs posición, para 0.82 mm x 1220 mm (CS).



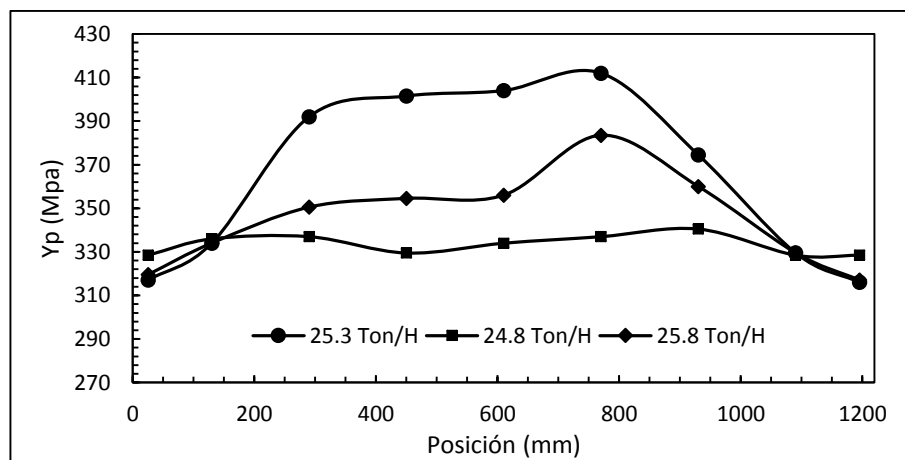
Los resultados (gráfica 7 y gráfica 8) de la prueba de capacidad en la referencia 0.82 x 1220 sugieren que cuando la banda metálica pasa por el horno a una velocidad superior a 25 Ton/H, las propiedades mecánicas en el centro de la banda son más elevadas en comparación con las muestras evaluadas a velocidades de producción menor. Para las velocidades de 22.4, 23.4 y 24.4 Ton/H, las propiedades mecánicas permanecen muy similares y mantienen una variabilidad baja.

Para la referencia 0.72 x 1220 (SS) los resultados (gráfica 9 y gráfica 10) son análogos, sin embargo, en este caso, cuando se realiza la prueba a 25.6 Ton/H, se obtienen propiedades mecánicas más bajas, que las propiedades obtenidas a una velocidad de 25.2 Ton/H.

Gráfica 9. Resistencia a la tracción Vs posición, para 0.82 mm x 1220 mm (CS).



Gráfica 10. Resistencia a la fluencia (Yp) Vs posición, para 0.72 mm x 1220 mm (SS).



6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La evaluación de la capacidad de proceso se aborda durante este trabajo, desde dos perspectivas: la primera es la capacidad de proceso estadística, que permite la evaluación de las especificaciones de calidad, tomando como referencia la dureza de la banda metálica en estado recocido y galvanizado. La segunda, es la capacidad desde la perspectiva de la metalurgia, evaluando las propiedades mecánicas y la microestructura del producto en estado recocido y galvanizado.

Durante este trabajo se evalúan 5 referencias divididas en dos grupos, aceros estructurales y aceros comerciales (clasificados de acuerdo con la normas ASTM A653). Las cinco referencias evaluadas representan el 45% del total de la producción de la línea de galvanización LGC01 de ACESCO que procesó alrededor de 135000 toneladas anuales de acero.

6.1 EVALUACIÓN ESTADÍSTICA

El análisis de los datos de un periodo de cuatro meses es útil ya que refleja el comportamiento general de la dureza en cada una de las cinco referencias de estudio. Para cada referencia se hace un muestreo con un tamaño n , distribuidos según la Tabla 6.

Para la **referencia 0.82 mm x 1220 mm (CS)** (Ver Anexo B) se puede asegurar que la media de durezas de esta referencia es de $\bar{X} = 54.1 HRB$ en estado recocido

y galvanizado, con una desviación estándar de 3.27 HRB, El valor de la media se encuentra lejos del objetivo de dureza (60 HRB).

Tabla 7. Muestreo y tamaños por referencia.

Referencia	Muestras	Tamaño	Total datos
0.82 mm x 1220 mm (CS)	21	3	63
0.72 mm x 1220 mm (SS)	20	5	100
0.67 mm x 1220 mm (CS)	36	2	72
0.57 mm x 1220 mm (CS)	24	3	72
0.52 mm x 1220 mm (CS)	15	3	45

Esta referencia cuenta con una capacidad potencial de $C_p = 0.84$ y una capacidad a largo plazo $C_p' = 0.5$, esto indica que el proceso lo que refleja un pobre desempeño, y sugiere que se deben hacer modificaciones para mejorar la calidad satisfactoria. Entre tanto, el índice P_{pk} es el más bajo de los grupos analizado y refleja la incapacidad del proceso de cumplir con los rango de dureza establecidos.

En la carta de control $\bar{X} - R$ (Ver anexo B) el grupo 7 se encuentra por fuera de los límites de control superior, lo que inmediatamente califica al proceso como fuera de control, para la referencia 0.82 mm x 1220 mm (CS). Lo anterior obedece a la entrada de materia prima con un contenido de carbono de 0.1%, lo que le confiere al producto propiedades de un acero estructural.

La **referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS)**, es una de las más importantes en la producción, pues abarca un 17% del total de la línea. Esta referencia, de acuerdo

con la evaluación estadística, posee una media de dureza de 61.8 HRB y una desviación estándar de 2,78. El valor de la media muestra que el proceso se encuentra a 8.2 unidades de dureza del objetivo para aceros estructurales.

La carta de control $\bar{X} - R$ (gráfica 3) no aparecen ningún punto por fuera de los límites y tampoco se presenta algún patrón de comportamiento en los puntos del gráfico, por lo que se declara el proceso para elaborar la referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS) dentro del control estadístico.

La capacidad potencial y largo plazo es de 0.66 y 0.59, respectivamente, lo que indica que el proceso es incapaz de cumplir con los requerimientos de calidad. Además, el índice Ppk es de -0.38, lo que indica que el proceso está distanciado de las especificaciones de calidad.

Los resultados en la **referencia 0.67 mm x 1220 mm (CS)**, señalan que esta cuenta con una media de dureza de 55.8 HRB y una desviación estándar de 3.02, nuevamente, la media se ubica lejos del objetivo de calidad.

El proceso posee un $C_p=1$, indicando que el proceso tiene la capacidad de cumplir con las especificaciones, la capacidad a largo plazo ($C_{p'}=0.55$) y el indicador de desempeño ($P_{pk}= 0.27$) siguieren que el proceso presenta un pobre comportamiento debido a que no es un proceso centrado.

La carta de control $\bar{X} - R$ (Ver anexo B) no aparecen puntos por fuera de los límites y no presenta ningún tipo de patrón de comportamiento, es decir mantiene una variación estable en los valores de dureza.

La **referencia 0.57 mm x 1220 mm** (Ver anexo B) cuenta con una media de dureza 55.72 HRB y una desviación estándar de 2.5 HRB. La media se ubica a 14.28 unidades del objetivo para los aceros estructurales, probablemente la designación de acero estructural no se ajusta para esta referencia, teniendo en cuenta su que su valor medio de dureza se asemeja más al de un acero comercial.

Esta referencia cuenta con un $C_p=1$, pero la capacidad a largo plazo ($C_p'=0.67$) y el indicador de desempeño ($Ppk=-1.23$) sugieren que el proceso para elaborar esta referencia no cuenta con la capacidad para cumplir con las especificaciones de dureza y que es un proceso descentrado y con alta inestabilidad.

La **referencia de 0.52 mm x 1220 mm** (CS), presenta una media de durezas de 56.0 HRB y una desviación 2.87 HRB, estos valores están lejos del objetivo de dureza para los aceros comerciales.

La distribución de los datos (Ver anexo B), presenta una particularidad, se aprecia distribución bimodal, un grupo de datos con una dureza superior a 56HRB y el otro grupo de datos con una dureza inferior a 56HRB. Y la distribución es normal debido a que el valor P de la gráfica de normalidad es mayor que el valor de significancia, 0.05.

Se cuenta con un $C_p=1.01$, que indica que el proceso es capaz, sin embargo, los índices de capacidad a largo plazo y el indicador de desempeño, desmienten esta capacidad, por lo que se puede declarar al proceso como incapaz, descentrado y de un pobre comportamiento.

La carta de control $\bar{X} - R$ 5 grupos se encuentran por encima de los límites del proceso y tres puntos por debajo de estos límites; los grupos 3, 4, 9, 10 y 15, corresponden a aceros con contenidos de carbono mayores a 0.09% que se han introducido al proceso, por este motivo, la dureza difiere de los demás grupos. Los grupos por debajo de los límites, son aceros 1005, que fueron procesados a velocidades de entre 16 Ton/H para el grupo 1, 19 Ton/H para el grupo 2, y 18 Ton/H para el grupo 15. En situaciones de operación normales la velocidad de este material está alrededor de 20.5 Ton/H, de acuerdo con información suministrada por el sistema de supervisión. Una menor velocidad de proceso genera un mayor tiempo de permanencia al interior del horno de recocido, situación que contribuye a disminuir las propiedades mecánicas del material. Adicionalmente, los cambios de materia prima desestabilizan el proceso, modifican las propiedades mecánicas del material y pone en riesgo la homogeneidad en las propiedades de lotes que se cobijan bajo la misma referencia.

De la verificación del estado de control estadístico se puede decir que la inestabilidad generada en las referencias, obedece a causas especiales, como cambios en la materia prima, condiciones anómalas de operación, baja velocidad de la línea y altas temperaturas en las zonas del horno de recocido.

El análisis realizado indica que el proceso de recocido en continuo no tiene la capacidad para alcanzar los estándares de durezas establecidos en ninguna de las referencias analizadas y en todas las referencias se observa que los límites están claramente distanciados de la realidad del proceso, y no se descarta que sean estos límites, que fueron establecidos de manera empírica por la empresa, lo que estén errados, pues en la actualidad, los aceros estructurales y comerciales cumplen con la clasificación de la norma ASTM A653 y no se reportan reclamos por parte de clientes en los valores de dureza. Por tal razón es importante reevaluar estos límites de dureza y constatar su aplicabilidad para evaluaciones posteriores de capacidad.

6.2 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA

La caracterización metalúrgica se realiza fundamentalmente para conocer cuáles son las propiedades mecánicas y para identificar la microestructura de las muestras referenciadas, cuando se procesan bajo condiciones normales (velocidad del material y temperaturas del horno).

Para cada uno de los lotes evaluados se registra la temperatura que alcanza la lámina y la velocidad; otras variables que modifican las propiedades mecánicas como el tensionivelado y el Skin-Pass, se mantienen constantes y se ignoran, asumiendo que solo interviene en el recocido la velocidad de la línea (que determina la permanencia del material al interior del horno) y la temperatura que alcanza la lámina.

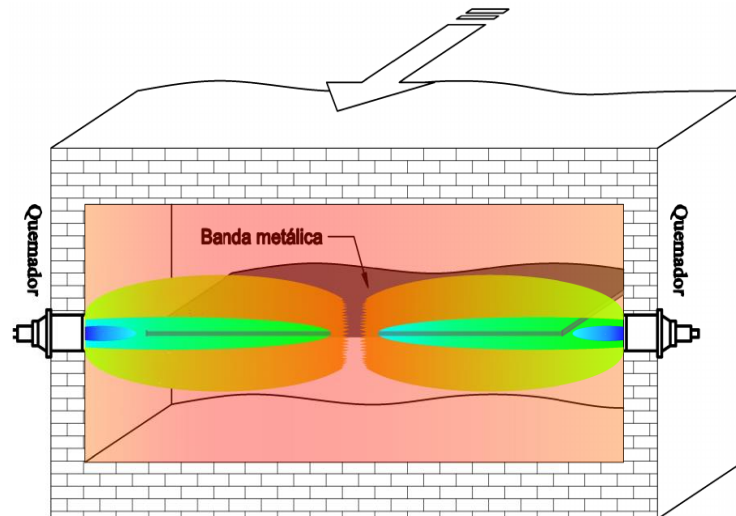
En el caso del lote de 0.72 mm x 1220 mm (gráfica 4) el perfil presenta las propiedades mecánicas y las relaciona con la microestructura (micrografías a 500X).

La microestructura está completamente regenerada, no existen rastros de granos alargados ni orientados en la dirección de laminación. La microestructura está formada por ferrita y por pequeñas colonias de carburos que aparecen en los bordes de grano, esta microestructura es típica de los aceros de bajo carbono sometidos a un recocido. La morfología de los granos y el tamaño presenta una homogeneidad relativa en todo el ancho de la banda metálica. Sin embargo, en zona central de la banda aparecen granos que no alcanzaron a crecer completamente y una mayor cantidad de carburos en los límites de grano, esto contribuye a que las propiedades mecánicas presenten un aumento en la zona central.

La referencia de 0.67 mm x 1220 mm (CS) (gráfica 5), presenta una microestructura completamente recristalizada y con una cantidad menor de carburos en comparación con la referencia analizada anteriormente, esta limpieza en la microestructura obedece principalmente al menor contenido de carbono (0.05%), y que esta referencia alcanzó una mayor temperatura, este fenómeno favorece la disolución de los carburos. El tamaño de grano ASTM 10, indica un tamaño de grano superior a la referencia estructural.

Entre tanto, la referencia 0.52 mm x 1220 mm (gráfica 6) presenta una microestructura completamente de ferrita recristalizada en todo el ancho de banda, con una menor cantidad de carburos que las dos referencias anteriores, debido a un menor contenido de carbono (0.04%). La microestructura contiene pequeñas diferencias entre el centro de la banda y los extremos, en el centro existe una mayor cantidad de granos en comparación con los extremos; situación que explica en parte el leve aumento en las propiedades mecánicas y una disminución en el porcentaje de deformación. En la Figura 9 se presenta un esquema del funcionamiento del horno de fuego directo PHT.

Figura 9. Aproximación a la distribución térmica de PHT.



La heterogeneidad en las propiedades mecánicas, obedece, entre otras cosas, al gradiente de temperatura que se genera entre el centro de la banda metálica y los extremos; este gradiente es especialmente notorio en la zona de fuego directo, en donde cuatro quemadores emiten una llama desde los extremos hacia el centro de la banda metálica. Esta distribución de los quemadores no asegura una temperatura uniforme en el ancho de banda generando diferentes perfiles térmicos en el ancho de la banda.

6.3 ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD REAL

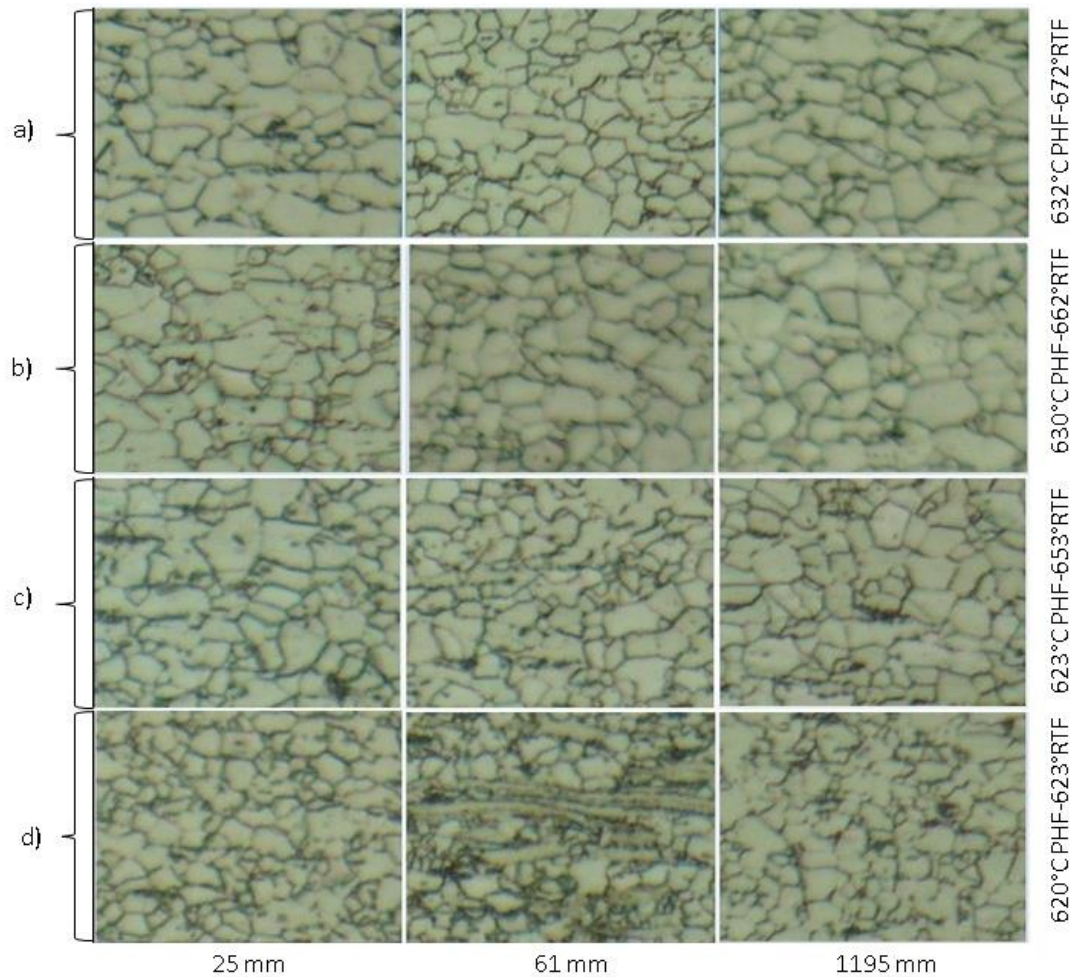
Los resultados expuestos en las gráficas 7, 8, 9, y 10, señalan en general un aumento en las propiedades mecánicas en el centro de la banda, cuando se alcanza velocidades por encima de 24.8 Ton/H.

Este fenómeno obedece al gradiente de temperatura en el ancho de banda lo que su vez repercute en la microestructura del material. Para evidenciar los cambios microestructurales, se evaluó por microscopía óptica una muestra por cada posición en el material. En la Figura 10, se presentan perfil micro estructural para la referencia 0.82mm x 1220 mm (CS), en las posiciones O0, C y T0, a 200x.

En la figura 10 se aprecia la manera como cambia morfología de grano, en los extremos de la banda metálica, pasando de un grano limpio y completamente recristalizado, con un tamaño de grano ASTM 8, para una velocidad de 23.4 Ton/H y temperaturas de 605° PHT y 648° RTF, a un grano con la presencia de carburos precipitados, parcialmente recristalizado y con un tamaño de grano ASTM 9, para una velocidad de 25.4 Ton/H y temperaturas de 620° en PHT y 623° en RTF.

En el centro de la banda metálica (61 mm) aparece una microestructura completamente recristalizada y compuesta por ferrita para las todas las velocidades, excepto para 25.4 Ton/H en donde se observa granos alargados y carburos alineados en la dirección de laminación, lo que deja en evidencia que la temperatura alcanzada (620° en PHT y 623° en RTF) y la velocidad con la que atravesó el horno la banda metálica, no son suficientes para recristalizar de manera homogénea el material en las zonas centrales.

Figura 10. Cambios en la microestructura del acero comercial.



El análisis estadístico de los resultados indica que son significativas las propiedades mecánicas a la velocidad y a la posición de la banda metálica; y que las propiedades mecánicas de la banda de acero no son homogéneas cuando la velocidad de la línea es de 25 Ton/H. Sin embargo, mediante una comparación de medias de los procesos se determina que al recocer a 22.4, 23.4 y 24.4 Ton/H se obtienen las mismas propiedades mecánicas en la referencia 0.82 mm x 1220 mm (CS).

Las gráficas 12 y 13 se presentan los resultados de las pruebas realizadas en el material 0.72mm x 1220 mm (SS), los resultados sugieren que las propiedades mecánicas aumentan en la zona central de la banda metálica, cuando se trata térmicamente a velocidades por encima de 24.8 Ton/H, a diferencia de las pruebas realizada con la referencia comercial, a la máxima velocidad de la prueba (25.8 Ton/H) las propiedades no fueron las más altas; este fenómeno sucede porque la banda metálica a 25.3 Ton/H registró una menor temperatura de recocido (599°C PHF y 621° RTF), mientras que a 25.8 Ton/H, la temperatura de recocido fue superior (607°C PHF y 633°C RTF).

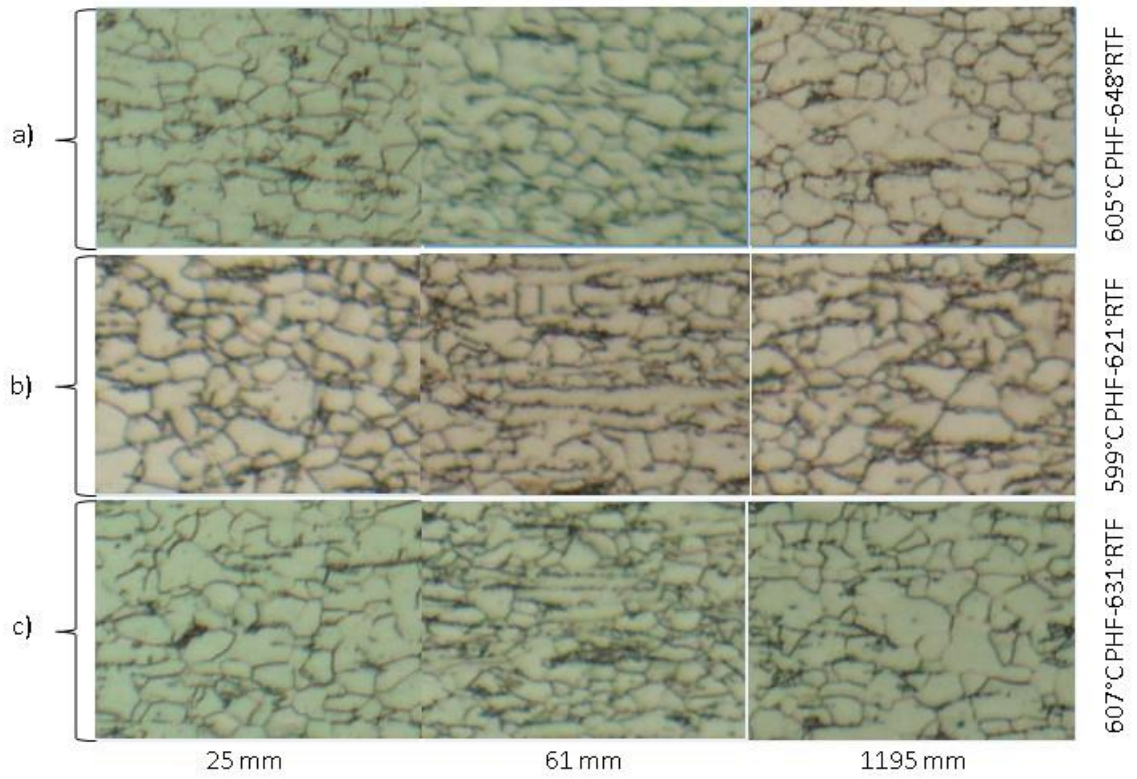
La microestructura de la referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS), recocida a 24.8 Ton/H, con temperatura de recocido de (605°C PHF y 648°C RTF) se encuentra completamente recristalizada en todo el ancho de banda, está compuesta principalmente por ferrita y carburos precipitados y con una leve alineación en la dirección de laminación y cuenta con un tamaño de grano 10. Este material posee una media de fluencia de 333 MPa, con una desviación de 4.61 MPa. , y una Resistencia a la tracción media de 409 MPa y una desviación de 3.55 MPa.

Cuando la velocidad de la línea aumenta, la habilidad del horno de recocido para elevar y mantener la temperatura en la banda metálica disminuye, y los resultados en las velocidades de 25.3 y 25.8 Ton/H, indican que la máxima temperatura alcanzada es de 607° en PHF y 631 en RTF. Estas temperaturas alcanzadas son insuficientes para garantizar una recristalización completa en todo el ancho de banda, pues a 25.3 Ton/H se observa en la zona central de la banda carburos y granos alineados en la dirección de laminación, este mismo fenómeno se repite a la velocidad de 25.8 Ton/H; esto significa que la por encima de 24.8 Ton/H no logra una recristalización completa y uniforme en el ancho de banda. Como consecuencia

la media de la resistencia a la fluencia aumenta a 364 MPa, con una desviación de 40.1 MPa, y 344 MPa con una desviación de 21.5 MPa, para 25.3 y 25.8 Ton/H, respectivamente. Entre tanto, la resistencia a la tracción aumenta a 434 MPa, con una desviación de 30.4 MPa, y 420 con una desviación de 16 MPa Para 25.3 Ton/H y 25.8 Ton/H respectivamente. En la Figura 11, se muestra un perfil de las microestructuras obtenidas en las pruebas con la referencia 0.72 mm x 1220 mm (SS).

El análisis de los resultados estadísticos indica que velocidad y la posición de la banda metálica son significativas para las propiedades mecánicas, mientras que el análisis de la comparación de medias sugiere que al recocer material de 0.72 mm x 1220 mm a 25.3 Ton/H y a 25.8 Ton/H se obtienen las mismas propiedades, es decir, recocido en los extremos y duro en el centro, en otras palabras material no conforme de acuerdo con las exigencias de calidad.

Figura 11. Cambios en la microestructura del acero estructural.



7. CONCLUSIONES

La capacidad máxima del horno de recocido, para tratar térmicamente aceros estructurales AISI/SAE 1010, garantizando propiedades homogéneas en el ancho de banda, es de 24 Ton/H manteniendo un control de lámina con temperatura superior a 605°C en PHT y de 649°C en RTF.

La capacidad máxima del horno de recocido para tratar térmicamente aceros comerciales AISI/SAE 1006, garantizando propiedades homogéneas en el ancho de banda, es de 24 Ton/H manteniendo un control de lámina con temperatura superior a 623 °C en PHF y de 653 °C en RTF.

Los límites de dureza establecidos por la empresa, no están de acuerdo con la realidad del proceso, pues durante el proceso de evaluación se determinó que los aceros comerciales cuentan con una dureza media de 55 HRB y los aceros estructurales con una dureza de 62 HRB.

Introducir un acero 1010 a la línea para obtener un producto de calidad comercial, altera la estabilidad del proceso, sacándolo del control estadístico y otorgando al material diferencias en la microestructura y por consiguiente en las propiedades mecánicas.

La heterogeneidad de las propiedades mecánicas en el ancho de banda, obedecen a la recristalización parcial que sufre el material, siendo este fenómeno la principal razón para que el material sufra ondulación.

8. RECOMENDACIONES

No operar la línea LGC01 a velocidades superiores a 24Ton/H, para garantizar la homogeneidad en las propiedades mecánicas de la banda metálica.

Reevaluar los límites de dureza para los aceros comerciales y estructurales, pues los resultados encontrados revelan que los valores de dureza actuales se encuentran desfasados de las especificaciones establecidas por la empresa; sin embargo, las propiedades mecánicas son aptas para ser clasificados bajo la norma ASTM A653-13.

No utilizar acero 1010 para obtener un acero de calidad comercial, ya que esto altera significativamente las propiedades del producto, aunque esté agrupado bajo una sola referencia.

Cuando el material esté presentando ondulación, se debe disminuir la velocidad de la línea, esto garantiza un mayor tiempo de sostenimiento que propende por una recristalización completa y homogénea en el ancho de banda.

Controlar la temperatura de cada zona del horno, de acuerdo con la temperatura de la banda metálica y no con la temperatura de hogar.

REFERENCIAS

- [1] VALENCIA GIRALDO, Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Medellín. Universidad de Antioquia. 2009. P. 251.

- [2] MANTILLA RAMIREZ, Diana Isabel. Efecto de la temperatura del proceso de recocido en campana sobre el tamaño de grano y las propiedades mecánicas del acero IF. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica. 2008.

- [3] LLEWELLYN, T y HUDD, R. Steels metallurgy and applications. 3 ed. Butterworth Heinemann. 1998. p. 6

- [4] CASTRO, E, *et al.* Diseño y construcción de un horno simulador de recocido en continuo. En: CONAMET/SAM. 2012

- [5] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process, ASTM A653: ASTM. 2013.

- [6] RUIZ, Arturo y ROJAS, Falcó. Control estadístico de proceso. Madrid: Universidad Podificia ICAI ICADE. 2006. p. 4-5.

- [7] ÁLVAREZ BORREGO, Josué. Control estadístico de procesos. MÉXICO D.F.: Instituto Politécnico Nacional. 2012.
- [8] GUTIÉRREZ, H. y DE LA VARA SALAZAR, R. Control estadístico de calidad seis sigma. 2 ed. México D.F.: McGraw Hill. 2010

BIBLIOGRAFÍA

ÁLVAREZ BORREGO, Josue. Control estadístico de procesos. MÉXICO D.F.: Instituto Politécnico Nacional. 2012.

ÁLVAREZ, Lilián. y SERRANO, Iván. Diseño e implementación de un sistema de control estadístico de procesos en la empresa FORCOL LTDA. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. 2009

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. ASTM. (ASTM. E112). 2013.

_____. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM. (ASTM E3-11) 2011.

_____. Standard Practice for Microetching Metals and Alloys. ASTM. (ASTM E407-07). 2007

_____. Standard Specification for Steel Sheet, Zinc-Coated (Galvanized) or Zinc-Iron Alloy-Coated (Galvannealed) by the Hot-Dip Process. ASTM. (ASTM 653). 2013.

_____. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM. (ASTM E8/E8M – 15a). 2013

CASTRO, E, *et al.* Diseño y construcción de un horno simulador de recocido en continuo. En: CONAMET/SAM. 2012

SMITH, William. y HASHEMI, Javad. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. 4 ed. México, D.F.: McGraw-Hill INTERAMERICANA, 2006.

GÓMEZ GARCÍA, Aura Paola. Control estadístico del proceso bajo la metodología seis sigma aplicado en el proceso de beneficio de bovinos de frigorífico Vijagual. Trabajo de grado Ingeniera Industrial. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. 2010.

GUITÉRREZ, H. y DE LA VARA SALAZAR, R. Análisis y diseño de experimentos. 2 ed. México, D.F.: McGraw-Hill. (2008)

GUTIÉRREZ, H. y DE LA VARA SALAZAR, R. Control estadístico de calidad seis sigma. 2 ed. México D.F.: McGraw-Hill. 2010

MANTILLA RAMIREZ, Diana Isabel. Efecto de la temperatura del proceso de recocido en campana sobre el tamaño de grano y las propiedades mecánicas del acero IF. Trabajo de grado Ingeniero Metalúrgico. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico Químicas, Escuela de Ingeniería Metalúrgica. 2008.

PETITE, M. y GUTIERREZ, I. Evolución de la textura durante el recocido continuo. Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio. En: Metal. Madrid. Vol 34, mayo de 2004. P. 289-282.

ASKELAND, Donald; PRADEED, Fulay y WENDELIN, Wright. The science and engineering of materials. 6 ed. CENGAGE Learnig. 2010.

RAMIREZ CÉLIS, Ángela María. Control estadístico de proceso bajo la metodología seis sigma aplicado en el proceso de extracción de aceite de palma en OLEAGINOSA LAS BRISAS S.A. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. 2005.

ROCHA, R.; MELO, T.; PERELOMA, E y SANTOS, D. Microstructural evolution at the initial stages of continuous annealing of cold rolled dual-phase steel. En: Materials Science and Engineering. 2005. Vol. 391, p. 296-304.

RUIZ, Arturo y ROJAS, Falcó. Control estadístico de proceso. Madrid: Universidad Podificia ICAI ICADE. 2006.

LLEWELLYN, T y HUDD, R. Steels metallurgy and applications. 3 ed. Butterworth Heinemann. 1998.

VALENCIA GIRALDO, Asdrúbal. Tecnología del tratamiento térmico de los metales. Medellín. Universidad de Antioquia. 2009. P. 251-256.

ANEXO A

VALORES DE DUREZAS PARA LOS GRÁFICOS DE CONTROL

Tabla 1. Para 0.82 mm x 1220 mm (CS)

Lote	Fecha	Hora	HRB	Lote	Fecha	Hora	HRB
0001194567	23/06/2014	1:42:00 a. m.	49	0001339762	09/09/2014	11:33:14 a. m.	52
0001194631		2:46:32 a. m.	50	0001339838		12:35:00 p. m.	53
0001194695		3:44:21 a. m.	52	0001339907		1:32:17 p. m.	55
0001231003	10/07/2014	9:04:35 a. m.	54	0001342122	10/09/2014	6:27:22 a. m.	52
0001231121		10:09:06 a. m.	55	0001342189		7:31:42 a. m.	50
0001231143		11:09:06 a. m.	55	0001342337		8:31:07 a. m.	52
0001243282	17/07/2014	10:52:26 a. m.	50	0001342408	10/09/2014	9:34:37 a. m.	60
0001243310		10:59:47 a. m.	50	0001342506		10:40:30 a. m.	53
0001243338		11:58:45 a. m.	52	0001342577		11:40:30 a. m.	52
0001247661	20/07/2014	2:06:40 a. m.	56	0001351947	16/09/2014	12:04:27 a. m.	56
0001247712		3:09:30 a. m.	55	0001351978		12:52:41 a. m.	58
0001247763		4:07:22 a. m.	57	0001352046		1:52:41 a. m.	55
0001251032	28/07/2014	2:02:29 p. m.	56	0001386126	02/10/2014	9:18:49 p. m.	54
0001259886		3:07:08 p. m.	50	0001386233		10:22:42 a. m.	56
0001259959		4:05:49 p. m.	60	0001386340		11:21:29 a. m.	54
0001259987	28/07/2014	4:10:17 p. m.	56	0001386443	02/10/2014	12:17:36 p. m.	53
0001260036		5:09:44 p. m.	60	0001386545		1:21:19 p. m.	53
0001260085		6:13:57 p. m.	56	0001386603		2:18:29 p. m.	54
0001260192	28/07/2014	7:18:56 p. m.	60	0001397573	07/10/2014	9:49:46 a. m.	57
0001260294		8:24:03 p. m.	60	0001397647		10:46:38 a. m.	59
0001260356		9:27:23 p. m.	61	0001397702		11:42:22 a. m.	51
0001261155	29/07/2014	9:04:25 a. m.	55	0001440968	30/10/2014	10:07:23 p. m.	55
0001261210		9:46:31 a. m.	53	0001440707		11:16:31 p. m.	50
0001261255		10:43:22 a. m.	52	0001440717		12:05:57 a. m.	60
0001279125	08/08/2014	1:31:20 a. m.	51	0001440811	30/10/2014	1:21:08 a. m.	50
0001279211		2:50:41 a. m.	52	0001440913		2:28:13 a. m.	50
0001279297		3:57:42 a. m.	53	0001440978		3:25:12 a. m.	53
0001299917	17/08/2014	9:04:37 a. m.	54	0001446052	01/11/2014	4:06:19 a. m.	50
0001299924		9:28:13 a. m.	51	0001446103		5:10:56 a. m.	50
0001299949		10:31:22 a. m.	57	0001446117		6:08:56 a. m.	52
0001332749	04/09/2014	6:06:31 p. m.	61				
0001332787		6:28:29 p. m.	52				
0001332825		7:31:29 p. m.	55				

Fuente: ACESCO.

Tabla 2. Para 0.67 mm x 1220 mm (CS)

Lote	Fecha	Hora	HRB	Lote	Fecha	Hora	HRB
0001167068	10/06/2014	9:00:22 a. m.	56	0001345801	12/09/2014	12:00:00 a. m.	60
0001167211		10:32:56 a. m.	50	0001345883		1:19:21 a. m.	55
0001166281	10/06/2014	12:00:00 a. m.	54	0001345895	12/09/2014	1:38:06 a. m.	56
0001166373		1:19:22 a. m.	58	0001346030		4:15:17 a. m.	56
0001166521	10/06/2014	2:29:57 a. m.	60	0001352705	16/09/2014	12:16:44 p. m.	60
0001166659		3:38:44 a. m.	51	0001352919		1:49:02 p. m.	55
0001207778	28/06/2014	12:00:00 a. m.	50	0001362352	20/09/2014	5:22:55 p. m.	58
0001207863		1:50:57 a. m.	51	0001362472		7:15:17 p. m.	58
0001215492	02/07/2014	11:09:26 a. m.	53	0001362489	20/09/2014	7:30:39 p. m.	59
0001215714		1:14:31 p. m.	56	0001362610		9:29:31 p. m.	60
0001247596	20/07/2014	12:10:23 a. m.	58	0001362724	21/09/2014	12:05:20 a. m.	57
0001247656		1:59:37 a. m.	55	0001362821		2:02:07 a. m.	59
0001260787	29/07/2014	3:26:51 a. m.	52	0001362863	21/09/2014	2:56:31 a. m.	60
0001260843		4:31:19 a. m.	57	0001362869		3:09:30 a. m.	56
0001274639	06/08/2014	12:56:40 a. m.	54	0001374974	27/09/2014	12:00:00 a. m.	58
0001274760		2:44:12 a. m.	52	0001374992		12:35:22 a. m.	55
0001277572	07/08/2014	9:00:55 a. m.	56	0001393247	05/10/2014	9:16:16 a. m.	60
0001277628		9:33:17 a. m.	51	0001393256		9:44:31 a. m.	56
0001282670	09/08/2014	5:00:55 p. m.	53	0001393319	05/10/2014	10:39:24 a. m.	59
0001282760		5:50:24 p. m.	52	0001393348		11:24:16 a. m.	56
0001299957	17/08/2014	10:36:07 a. m.	55	0001393383	05/10/2014	12:30:42 p. m.	50
0001299993		12:07:00 p. m.	52	0001393507		1:57:46 p. m.	58
0001299983	17/08/2014	11:37:25 a. m.	52	0001410494	13/10/2014	8:35:21 p. m.	57
0001299999		12:28:12 p. m.	54	0001410639		9:45:25 p. m.	51
0001301781	19/08/2014	12:26:19 a. m.	52	0001410875	14/10/2014	12:01:30 a. m.	59
0001301819		1:25:45 a. m.	59	0001410949		12:54:26 a. m.	55
0001309687	22/08/2014	5:14:27 p. m.	52	0001410958	14/10/2014	1:12:02 a. m.	58
0001310134		7:59:39 p. m.	51	0001411055		2:04:17 a. m.	53
0001311017	23/08/2014	9:53:39 a. m.	58	0001411138	14/10/2014	2:56:50 a. m.	51
0001311123		10:59:21 a. m.	57	0001411266		4:24:51 a. m.	53
0001316275	27/08/2014	12:06:37 a. m.	55	0001434995	26/10/2014	9:11:39 a. m.	53
0001316339		1:22:23 a. m.	57	0001435003		9:32:27 a. m.	56
0001328136	02/09/2014	7:42:10 p. m.	58	0001435007	26/10/2014	9:49:00 a. m.	55
0001328223		8:44:15 p. m.	53	0001435023		10:06:01 a. m.	58
0001328602	03/09/2014	12:00:00 a. m.	59	0001435076	26/10/2014	11:02:47 a. m.	59
0001328656		1:23:19 a. m.	51	0001435108		12:00:27 p. m.	55

Fuente: ACESCO.

Tabla 3. Para 0.57 mm x 1220 mm (CS)

Lote	Fecha	Hora	HRB	Lote	Fecha	Hora	HRB
0001164137	08/06/2014	3:35:57 PM	56.7	0001270087	02/08/2014	7:40:00 PM	50.0
0001164149		4:05:02 PM	55.3	0001270107		8:08:08 PM	50.0
0001164158		4:35:53 PM	55.3	0001270113		8:36:08 PM	53.0
0001180217	16/06/2014	6:23:38 PM	57.0	0001314132	01/11/2014	11:25:52 PM	54.0
0001180246		6:34:52 PM	55.0	0001314140		12:25:52 AM	52.0
0001180287		7:08:22 PM	55.0	0001314157		10:39:17 AM	52.0
0001180317	16/06/2014	7:42:29 PM	54.7	0001314172	26/08/2014	1:46:37 AM	52.0
0001180375		8:51:34 AM	58.0	0001314187		2:08:14 AM	53.0
0001180424		9:40:20 AM	58.0	0001314200		2:32:25 AM	53.0
0001180660	16/06/2014	10:40:20 AM	54.3	0001314222	26/08/2014	2:54:14 AM	54.0
0001180729		7:40:00 PM	53.3	0001314230		2:16:55 AM	52.0
0001180804		8:36:08 PM	53.3	0001314234		2:38:34 AM	52.0
0001230192	09/07/2014	8:43:14 PM	58.3	0001314244	26/08/2014	3:45:22 AM	52.0
0001230234		9:05:16 PM	59.0	0001314256		4:11:57 AM	55.0
0001230286		9:27:18 PM	59.0	0001314269		4:45:28 AM	55.0
0001230334	09/07/2014	9:51:24 PM	60.0	0001314289	26/08/2014	5:15:33 AM	56.0
0001230377		10:13:08 PM	56.0	0001314303		5:45:44 AM	55.3
0001230443		10:35:12 PM	56.0	0001314330		6:16:23 AM	55.3
0001230464	09/07/2014	11:54:26 AM	59.7	0001324164	30/08/2014	6:33:35 PM	59.3
0001230466		1:46:37 AM	58.7	0001324187		7:01:24 PM	57.7
0001230496		2:54:14 AM	58.7	0001324211		8:29:52 PM	57.7
0001249164	21/07/2014	3:54:14 AM	59.0	0001324227	30/08/2014	7:56:12 PM	57.0
0001249186		5:15:33 AM	56.0	0001324253		8:25:25 PM	59.3
0001249232		6:46:20 AM	56.0	0001324272		8:53:16 PM	59.3
0001257649	26/07/2014	6:34:52 AM	54.7	0001343902	11/09/2014	7:40:00 AM	55.0
0001257655		7:00:35 AM	54.0	0001343909		8:11:32 AM	55.0
0001257659		7:26:12 AM	54.0	0001343929		8:43:02 AM	55.0
0001257670	26/07/2014	7:51:43 AM	58.3	0001349375	13/09/2014	11:15:10 AM	57.0
0001257688		7:17:00 AM	56.3	0001349395		11:45:02 AM	55.0
0001257697		7:45:02 AM	56.3	0001349414		12:16:55 PM	55.0
0001269337	02/08/2014	5:32:29 PM	54.0	0001349638	13/09/2014	4:30:55 PM	55.0
0001269350		6:32:29 PM	55.0	0001349647		5:02:23 PM	55.0
0001269378		10:02:38 PM	55.0	0001349656		5:35:24 PM	52.0
0001269852	02/08/2014	8:51:34 AM	58.0	0001363585	22/09/2014	7:01:12 AM	59.0
0001269858		9:15:18 AM	58.0	0001363600		7:31:45 AM	60.0
0001269870		9:40:20 AM	57.0	0001363627		8:00:57 AM	60.0

Fuente: ACESCO.

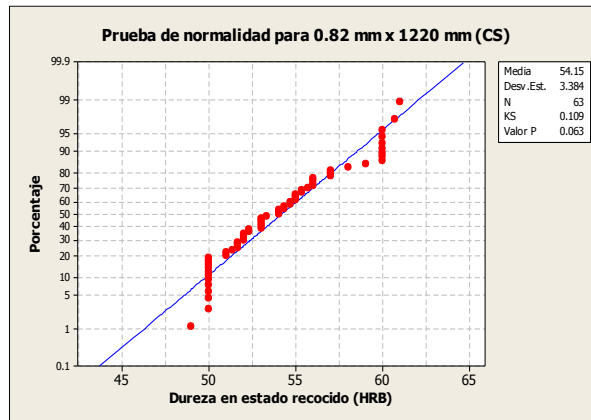
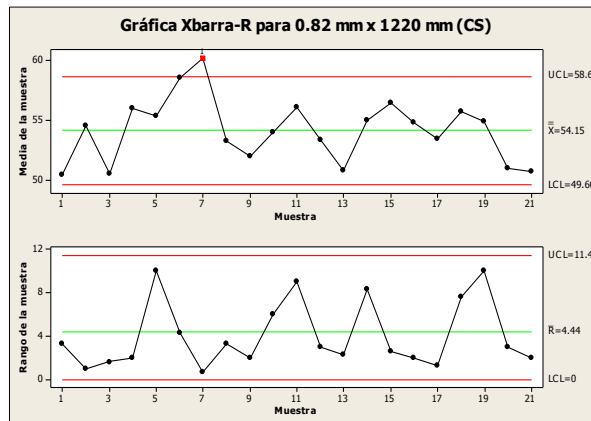
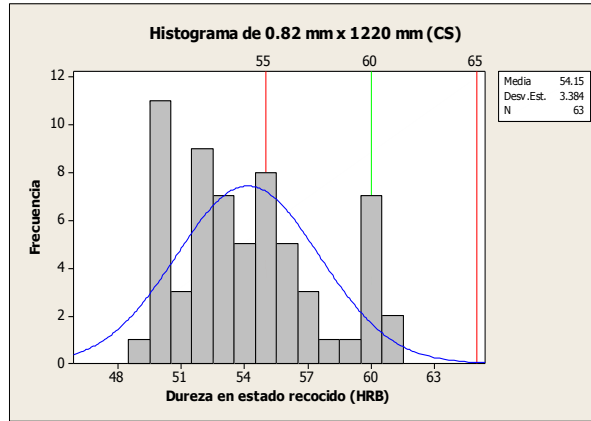
Tabla 4. Para 0.52 mm x 1220 mm (CS)

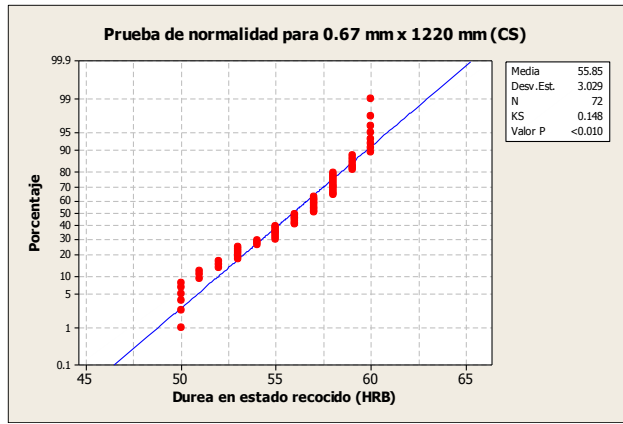
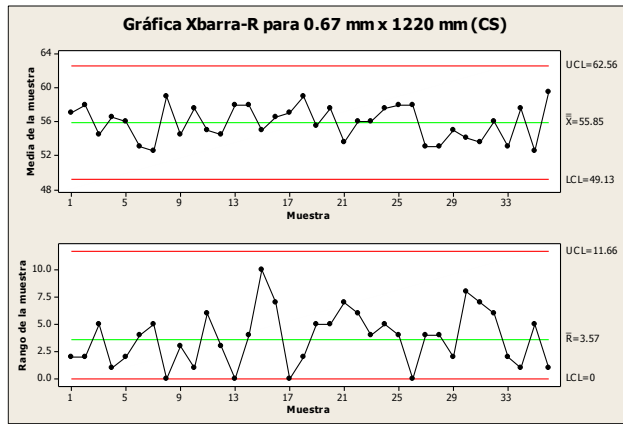
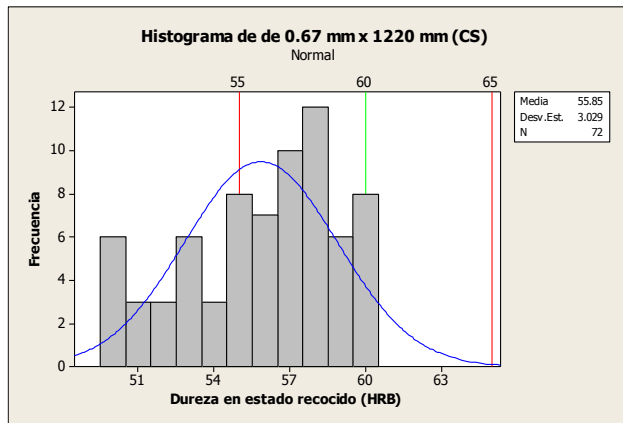
Lote	Fecha	Hora	HRB	Lote	Fecha	Hora	HRB
0001174539	13/06/2014	09:25:12 PM	50	0001332140	04/09/2014	1:25:22 PM	59
0001174672		10:07:03 PM	53	0001362965	21/09/2014	5:06:58 AM	58
0001174793		10:36:24 PM	53	0001363025		6:10:58 AM	57
0001194540	23/06/2014	12:04:45 AM	51	0001363074	21/09/2014	7:38:28 AM	59
0001194548		12:49:21 AM	52	0001363108		8:33:20 AM	59
0001194556		1:37:21 AM	54	0001363127		7:08:24 AM	60
0001215230	02/07/2014	8:44:56 AM	59	0001363142	25/09/2014	9:33:54 AM	58
0001215376		9:54:33 AM	57	0001370097		12:00:00 AM	59
0001215522		10:52:45 AM	60	0001371150		1:03:23 PM	57
0001234493	11/07/2014	6:16:26 PM	57	0001371253	02/10/2014	2:05:02 PM	58
0001234516		6:34:44 PM	60	0001385764		5:18:37 AM	60
0001234539		7:03:44 PM	58	0001385836		5:58:04 AM	57
0001260654	29/07/2014	12:48:38 AM	53	0001385908	07/10/2014	6:56:25 AM	57
0001260680		1:30:10 AM	56	0001396842		1:23:37 AM	53
0001260706		2:17:42 AM	55	0001396983		2:33:14 AM	54
0001294703	14/08/2014	10:09:51 AM	56	0001397043	07/10/2014	3:18:08 AM	53
0001295068		11:22:38 AM	54	0001397069		3:58:37 AM	52
0001295116		12:17:45 PM	53	0001397095		4:56:42 AM	54
0001295933	14/08/2014	6:15:05 PM	54	0001397131	07/10/2014	4:48:47 AM	60
0001296030		7:19:24 PM	53	0001397179		5:36:37 AM	60
0001296132		8:24:52 PM	54	0001397227		6:59:55 AM	58
0001331924	04/09/2014	11:48:03 AM	57	0001397781		12:32:25 AM	59
0001331982		12:36:28 PM	58				

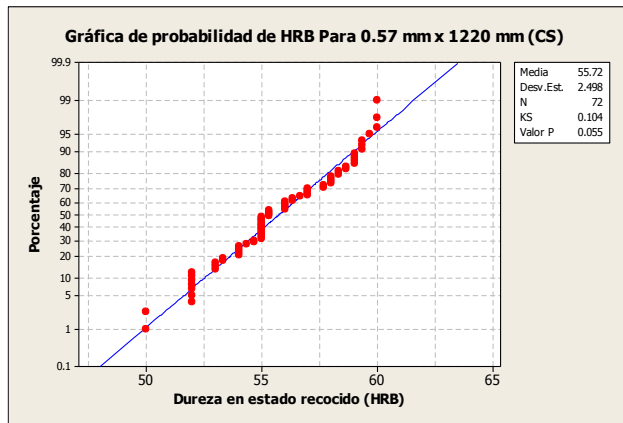
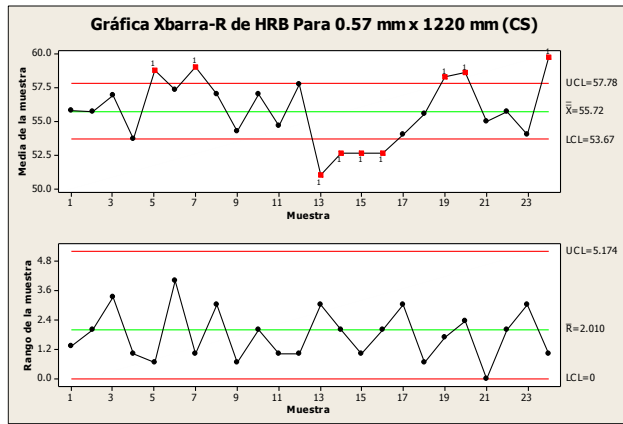
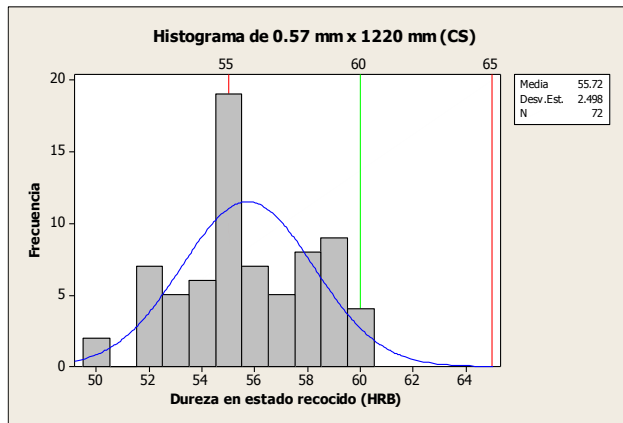
Fuente: ACESCO.

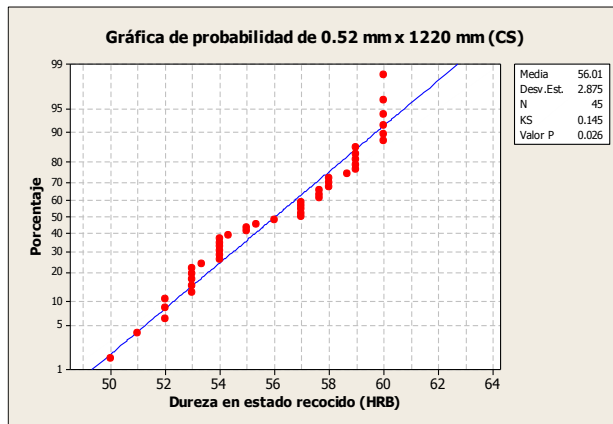
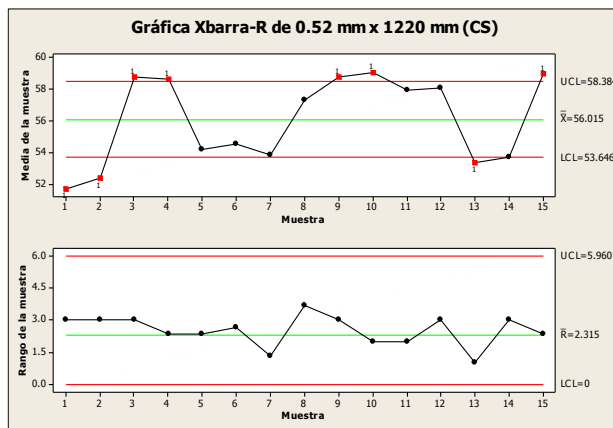
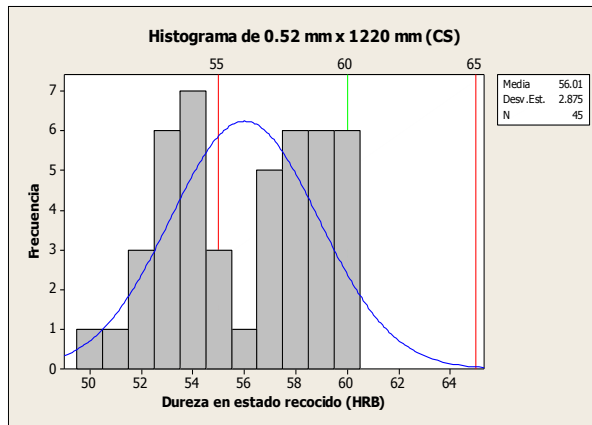
ANEXO B

HISTROGRAMAS, GRÁFICOS DE CONTROL Y PRUEBA DE NORMALIDAD





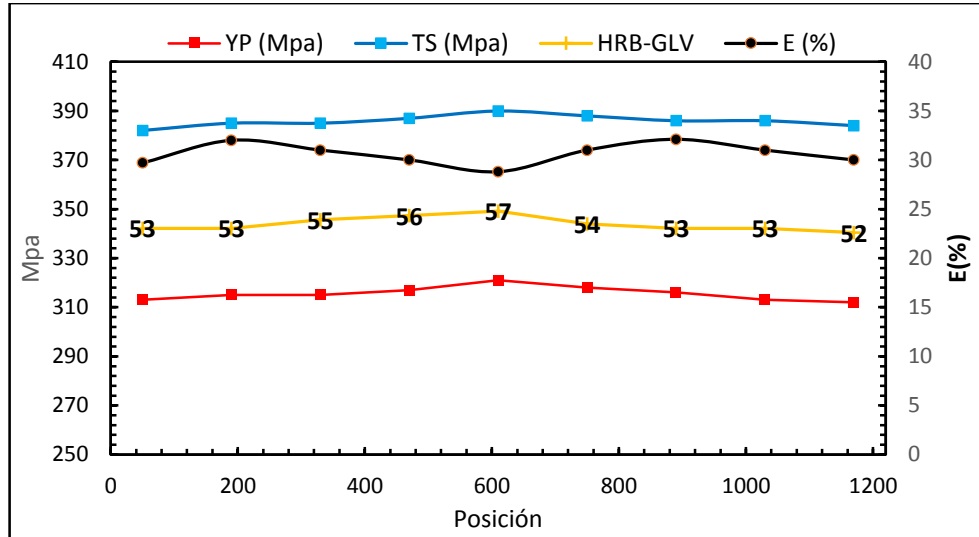




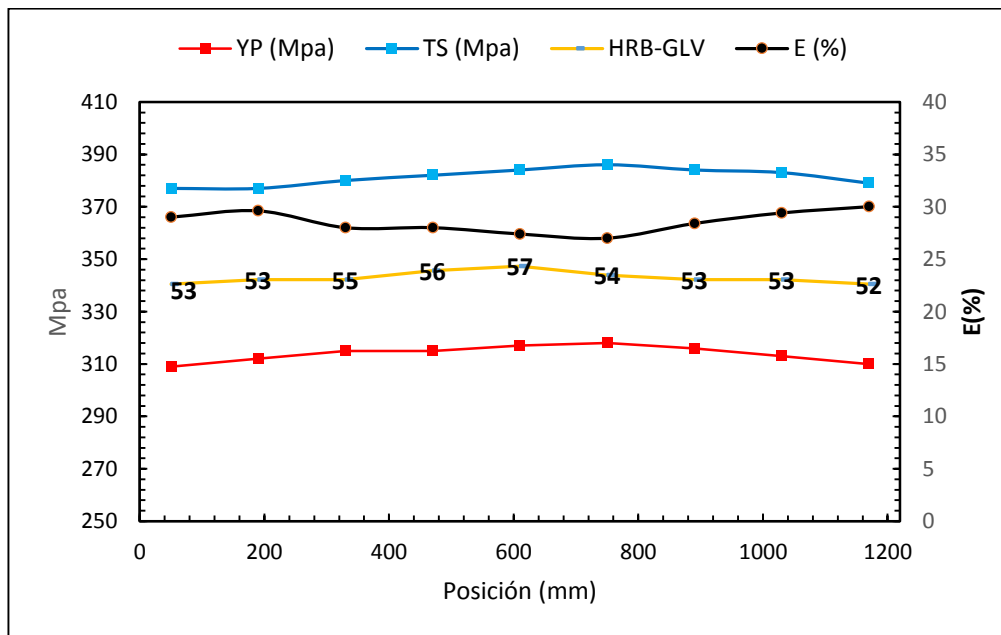
ANEXO C

PROPIEDADES MECÁNICAS PARA LAS REFERENCIAS 0.52 y 0.82 x 1220 mm

. Perfil de 0.82 mm x 1220 mm (CS).

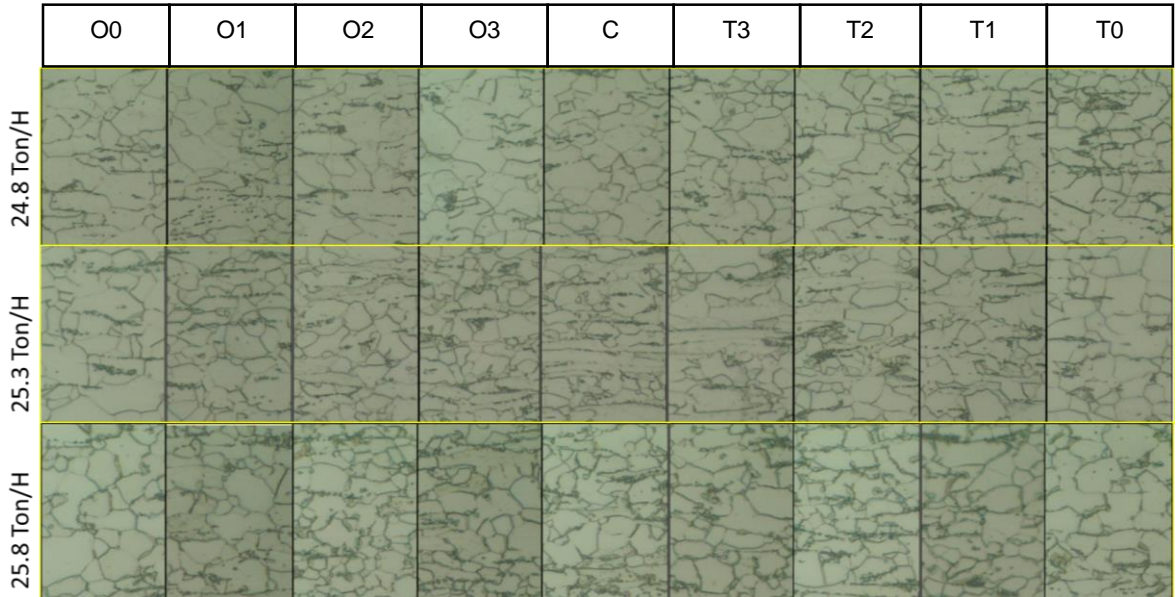


. Perfil de 0.57 mm x 1220 mm (CS).

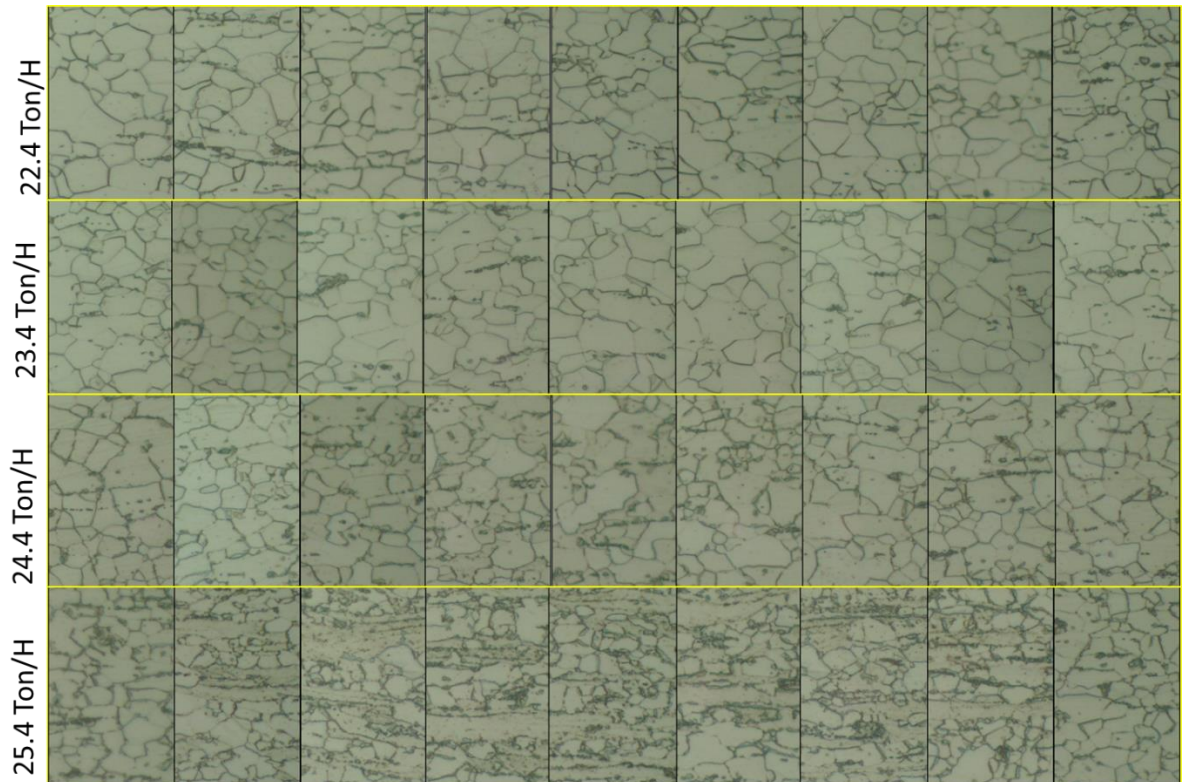


ANEXO D

MICROESTRUCTURAS OBTENIDAS DURANTE LAS PRUEBAS DE CAPACIDAD



0.72 mm x 1220 mm (SS)



0.82 mm x 1220 mm (CS)