

**DIAGNÓSTICO DEL PROCESO DE RECOCIDO DE RECRISTALIZACIÓN PARA
ACEROS DE BAJO CARBONO TREFILADOS EN LA EMPRESA INDUSTRIAS
METÁLICAS CORSAN S.A.**

**INFORME FINAL DE SEMESTRE DE INDUSTRIA
RICARDO ANDRÉS CARRILLO MENESES**

**REQUISITO PARA OPTAR AL TÍTULO DE:
INGENIERO DE MATERIALES**

**ASESOR POR PARTE DE LA UNIVERSIDAD
CLAUDIA PATRICIA SERNA GIRALDO**

**ASESOR POR PARTE DE LA EMPRESA
ALVARO SALAZAR**

**UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MATERIALES
MEDELLÍN**

2019

Contenido

LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABLAS	
LISTA DE ECUACIONES	
1 RESUMEN	
2 INTRODUCCIÓN	
3 OBJETIVO GENERAL.....	
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	
4 MARCO TEÓRICO.....	
4.1 Trefilación	
4.2 Recocido de recristalización.....	
5 DESARROLLO DE LA PRÁCTICA.....	
5.1 Revisión bibliográfica.....	
5.2 Identificación de materia prima	
5.2.1 Caracterización microestructural de la materia prima	
5.2.2 Nivel de inclusiones en el material de partida	
5.2.3 Medida del tamaño de grano de la materia prima	
5.2.4 Ensayo de tracción para materia prima	
5.3 Seguimiento al alambre trefilado con diferentes porcentajes de deformación (32, 66 y 91 %)	
5.3.1 Caracterización microestructural del material trefilado en las tres distintas condiciones de deformación	
5.3.2 Ensayo de tracción para el material trefilado a distintas condiciones de deformación	
5.4 Seguimiento al proceso de recocido de recristalización en planta	
5.4.1 Caracterización microestructural de alambre recocido en plata.....	
5.4.2 Ensayo de tracción para el material recocido en planta a las tres condiciones de deformación	
5.5 Tratamiento térmico de recocido de recristalización en laboratorio.	
5.5.1 Caracterización microestructural de alambre recocido en laboratorio..	
5.5.2 Ensayo de tracción para el material recocido a escala de laboratorio a tres distintas condiciones de deformación	
6 CONCLUSIONES	
7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Esquema de maquina trefiladora con acumulación y torsión.
- Figura 2.** Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades y en la estructura cristalina del material.
- Figura 3.** Esquema de la secuencia de recuperación-recristalización-crecimiento de grano durante el recocido.
- Figura 4.** Efecto de la deformación sobre la recristalización.
- Figura 5.** Cinética de recristalización del acero deformado.
- Figura 6.** Variación del tañano de grano recristalizado en función del tamaño de grano inicial y deformación.
- Figura 7.** Micrografía materia prima acero AISI 1006 sin ataque.Tabla de conversión de longitud promedio a número A.S.T.M.
- Figura 8.** Micrografía materia prima acero AISI 1006. Muestra atacada con Nital 1%. Microscopio NIKON ECLIPSE MA100.
- Figura 9.** Máquina de tracción.
- Figura 10.** Comportamiento mecánico alambroón acería Paz Del Río calidad AISI 1006
- Figura 11.** Alambroón AISI 1006.
- Figura 12.** Trefiladora número 8.
- Figura 13.** Micrografía acero AISI 1006 trefilado con una deformación del a) 32 %, b) 66 % y c) 99 % respectivamente. Muestra atacada con Nital 1%. Micrografía materia prima acero AISI 1006 sin ataque.
- Figura 14.** Comportamiento del alambre brillante a distintas deformaciones.
- Figura 15.** Esquema de la ubicación de probetas dentro del horno de tratamiento térmico. Horno 1 y base 3.
- Figura 16.** Micrografía acero AISI 1006 recocido en planta a 670 °C con un tiempo de sostenimiento de 210 minutos, las muestras se ubicaron en la parte superior del horno, las imágenes corresponden a una deformación inicial del l a) 32%, b) 66% y c) 91%. Muestra atacada con Nital 1%.
- Figura 17.** Disposición de quemadores en el horno tipo campana para recocido de recristalización.
- Figura 18.** Micrografía acero AISI 1006 recocido en planta a 670 °C con un tiempo de sostenimiento de 210 minutos, las muestras se ubicaron en la parte inferior del horno, las imágenes corresponden a una deformación inicial del l a) 32%, b) 66% y c) 91%. Muestra atacada con Nital 1%.
- Figura 19.** Comportamiento del alambre recocido en la parte inferior del horno.
- Figura 20.** Micrografía acero AISI 1006 recocido de recristalización (Condición 1) para muestras con una deformación del a) 32, b) 66 y c) 91 %. Muestra atacada con Nital 1%.
- Figura 21.** Micrografía acero AISI 1006 recocido de recristalización (Condición 2) para muestras con una deformación del a) 32, b) 66 y c) 91 %. Muestra atacada con Nital 1%.
- Figura 22.** Comportamiento del Alambre recocido en el laboratorio.

LISTA DE TABLAS

- Tabla 1.** Clasificación AISI de acero bajo carbono trefilable.
- Tabla 2.** Dimensión de acero bajo carbono y rango aceptable de tolerancias.
- Tabla 3.** Tiquete alambón AISI 1006 Número total de ensayos realizados en el seguimiento a nivel de laboratorio del tratamiento térmico
- Tabla 4.** Composición química alambón SAE 1006 5.5 mm
- Tabla 5.** Reporte de calidad alambón SAE1006 Paz Del Río
- Tabla 6.** Conversión de longitud promedio a número A.S.T.M.
- Tabla 7.** Resultados del ensayo de tracción para alambón.
- Tabla 8.** Porcentajes de deformación
- Tabla 9.** Resultados del ensayo de tracción para alambre trefilado a tres distintas condiciones de deformación.
- Tabla 10.** Carga total de horno 1. Condiciones del tratamiento térmico para alambre brillante con porcentajes de deformación de 32, 66 y 91 %
- Tabla 11.** Condiciones del tratamiento térmico para alambre brillante con porcentajes de deformación de 32, 66 y 91 %
- Tabla 12.** Número total de ensayos realizados en el seguimiento en planta del tratamiento térmico
- Tabla 13.** Tamaño de grano. Ensayo en planta 670°C (210 min sostenimiento).
- Tabla 14.** Tamaño de grano. Ensayo en planta 670°C (210 min sostenimiento).
Tamaño de grano promedio para el alambón
- Tabla 15.** Resultados del ensayo de tracción para alambre recocido a tres distintas condiciones de deformación inicial
- Tabla 16.** Condiciones del tratamiento térmico para alambre brillante con porcentajes de deformación de 32, 66 y 91 %
- Tabla 17.** Número total de ensayos realizados en el seguimiento a nivel de laboratorio del tratamiento térmico.
- Tabla 18.** Tamaño de grano. Ensayo en laboratorio, temperatura de recocido de 650°C y tiempo de sostenimiento de 30 minutos.
- Tabla 19.** Tamaño de grano. Ensayo en laboratorio, temperatura de recocido de 650°C y tiempo de sostenimiento de 60 minutos.
- Tabla 20.** Ensayos mecánicos para el material recocido a escala de laboratorio.

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Porcentaje de elongación.

Ecuación 2. Porcentaje de estricción.

1. RESUMEN

En la empresa Corsan S.A se ha venido proyectando un crecimiento del 15 % en la producción, buscando mejorar entregas a tiempo con calidad y menor costo. En el área de recocido los productos no conformes obligan a reprocesar el material. Estas inconformidades se presentan en alambres de diferentes calibres que sufren aplastamiento, quedando unidos, también, en alambres donde las propiedades mecánicas son heterogéneas por lo que no son acordes a las exigencias del cliente. Es por lo anterior que es de vital importancia realizar un diagnóstico del proceso de recocido de recristalización para alambres de acero bajo carbono calidad AISI 1006 trefilados a porcentajes de deformación de 33, 66 y 91 por ciento, estos porcentajes de reducción se eligieron ya que representan las condiciones de carga de material en el horno de recocido en un día normal de producción, todo esto se hace con el objetivo de evaluar el efecto que tiene el recocido de recristalización y así garantizar que el producto cumple con los requerimientos de microestructura y propiedades mecánicas exigidos por el cliente. Además, se realizaron tratamientos de recocido de recristalización a escala de laboratorio, ya que, al tener la facilidad de controlar la temperatura en todos los ciclos del tratamiento, se pueden establecer los parámetros del tratamiento y al realizar una comparación con el proceso actual que se realiza en la empresa, es posible realizar sugerencias para su mejora.

2. INTRODUCCIÓN

Cuando el acero de bajo carbono se deforma en frío, especialmente por trefilado, se produce un aumento en el número de dislocaciones las cuales, en virtud de su interacción producen un estado de esfuerzos internos elevados, la deformación plástica en el acero aumenta su resistencia y dureza, disminuyendo su habilidad para soportar más deformaciones. Para materiales que requieren una nueva reducción o para aquellos donde se busca que se cumpla con características especiales exigidas para su función, es necesario realizar un recocido de recristalización. Este se realiza calentando a temperaturas superiores a 550°C ocurriendo la recristalización de la ferrita, es decir, se forman nuevos granos libres de deformación. [1] Como se sabe, la estructura que se origina depende del tamaño de grano original. La cantidad de trabajo en frío es decisiva sobre la temperatura de recristalización, mientras mayor trabajo en frío, menor es la temperatura necesaria. En la empresa INDUSTRIAS METÁLICAS CORSAN S.A. se cuenta con varias líneas de producción entre las cuales se encuentran alambres trefilados de acero bajo carbono, alambres recocidos y alambres especiales, los cuales son trefilados, recocidos y nuevamente trefilados para obtener un producto que garantice que se cumplan las exigencias del cliente. Sus aplicaciones son muy exigentes por lo que su tratamiento térmico es primordial en su aplicación final. En este tipo de tratamiento se requiere un control estricto de la temperatura de calentamiento y tiempo de sostenimiento y enfriamiento para evitar que el material presente propiedades heterogéneas o mal aspecto y así prevenir repetir el tratamiento térmico o en el peor de los escenarios el daño de la pieza. En la empresa Corsan S.A. se ha venido proyectando un crecimiento del 15 % en la producción, buscando mejorar entregas a tiempo con calidad y menor costo. En el área de recocido los productos no conformes obligan a reprocesar el material. Estas inconformidades se presentan

en alambres de diferentes calibres que sufren aplastamiento, quedando unidos, también, en alambres donde las propiedades mecánicas son heterogéneas, por lo que no son acordes a las exigencias del cliente y en alambres donde la apariencia no es la adecuada, ya que secciones del alambre que no quedan expuestas a la atmósfera de nitrógeno utilizada muestran oxidación y se obtiene una apariencia superficial no uniforme. Los rollos de acero que se recuecen requieren temperaturas por encima de los 550° C, por lo que, el estudio se realizará para determinar el efecto de las variables propias del recocido de recristalización sobre la microestructura y la resistencia a la tracción, porcentaje de elongación y estricción, también, se definirán las no conformidades y sus posibles causas, para finalmente realizar fichas técnicas del tratamiento térmico de recocido de recristalización con el fin establecer parámetros de referencia que garanticen la disminución de las no conformidades y, en consecuencia, por la disminución de reprocesos, también reducir el consumo energético y costos.

3. OBJETIVO GENERAL

Realizar un diagnóstico del efecto de las variables del recocido de recristalización sobre la microestructura y propiedades mecánicas en el acero bajo carbono calidad AISI 1006 de la acería Paz Del Río, trefilado en la empresa industrias metálicas Corsan S.A.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar un diagnóstico del proceso de recocido de recristalización en planta, del acero bajo carbono calidad AISI 1006, trefilado a diferentes porcentajes de deformación.
- Evaluar el efecto de tratamiento térmico de recocido de recristalización sobre microestructura y comportamiento mecánico a nivel de laboratorio, en el acero bajo carbono calidad AISI 1006, trefilado a diferentes porcentajes de deformación.
- Elaborar fichas técnicas para el proceso de recocido de recristalización en el acero de bajo carbono AISI 1006 de la acería Paz Del Río, con diferentes porcentajes de deformación tratados térmicamente a nivel de laboratorio.

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Trefilación

Es un proceso mediante el cual un alambroón es sometido a una deformación en frío con el objetivo de reducir su diámetro. El alambroón es halado a través de una matriz o dado de trefilado, el alargamiento es posible de obtener por la tracción a través del dado de trefilación, simultáneamente se originan esfuerzos de compresión que permiten aprovechar al máximo la plasticidad del material disminuyendo los riesgos de ruptura. [7] En este proceso se conserva la masa por lo que hay un alargamiento del alambre, el cual es absorbido en cada paso con un aumento de su velocidad. Hay diferentes tipos de trefiladoras, entre las más comunes se encuentran las máquinas con acumulación y torsión, el número de pasos es variable de 4 a 9 pasos, la torsión ocurre como consecuencia del proceso por la trayectoria del alambre, la acumulación está relacionada con el incremento de reducción de este [5]. En la figura 1 se muestra una trefiladora de un solo paso, esta máquina consta de una jabonera que contiene el

lubricante que suele ser sódico-cálcico, un tambor que hala el alambre y un dado o matriz que produce la reducción de este.

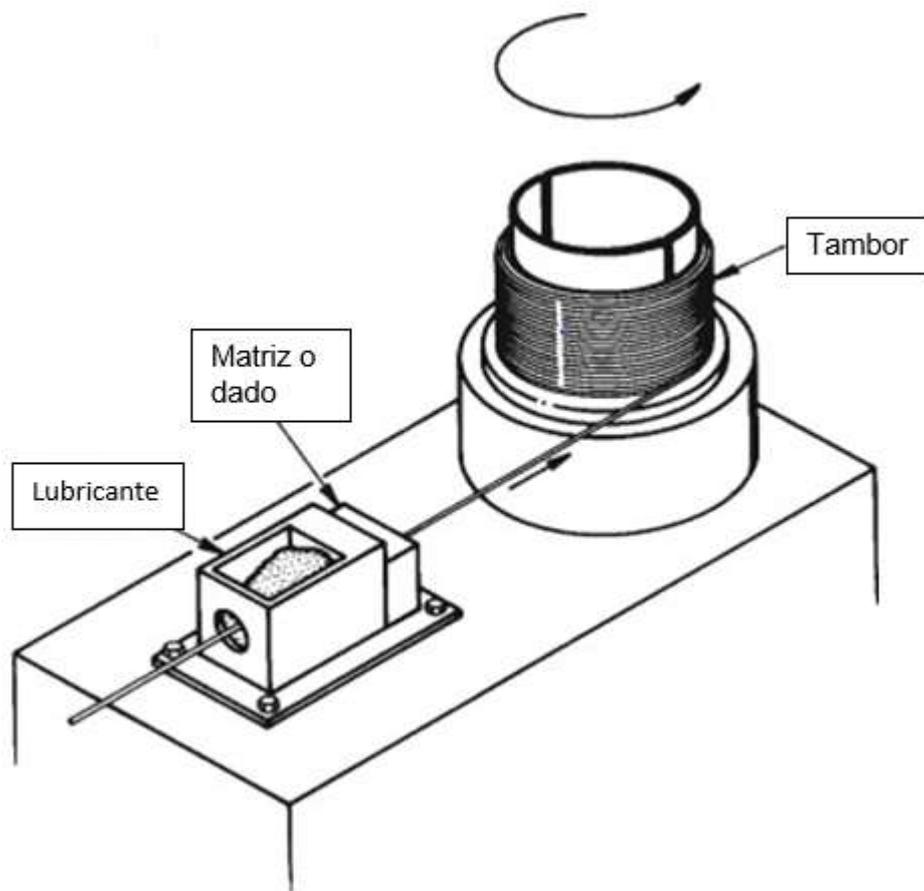


Figura 1. Esquema de maquina trefiladora con acumulación y torsión [13]

Durante el proceso de trefilación ocurre fricción, la cual se reduce utilizando un lubricante con el fin de separar las superficies dado-alambre, además no permite que la temperatura aumente durante el proceso [8]. La fricción entre el dado y el material dan lugar a deformaciones no uniformes, de tal manera que el material está sometido a diferentes valores de deformación plástica en diferentes puntos, produciendo en éste acumulación de esfuerzos residuales que permanecen en los productos terminados. Es importante conocer las tensiones residuales fundamentalmente por su influencia en los fenómenos de rotura frágil, corrosión bajo tensión y fatiga. Las tensiones residuales son siempre un perfil, es decir, si en un punto del material tengo tensiones residuales de compresión, en otro punto del material tendré inevitablemente tensiones residuales de tracción. Las tensiones residuales de tracción en la superficie son perjudiciales, debido a que reducen la resistencia a la fatiga y a la fractura de esta y no puede soportar tensiones adicionales producidas por fuerzas externas. [14]

En la figura 2a se muestra el efecto de la deformación en frío sobre las propiedades mecánicas, obsérvese que a medida que aumenta el porcentaje de trabajo en frío se generan dislocaciones a nivel cristalográfico, por lo que se incrementa la resistencia a la tracción, dureza, fragilidad y límite elástico, lo que implica la disminución de la ductilidad y elasticidad. La figura 2b se muestra un esquema del proceso de trefilación y su influencia

sobre la microestructura. Se observa que los granos presentan alargamiento cuando pasan por el dado en el sentido en que se hala el alambroón. [5]

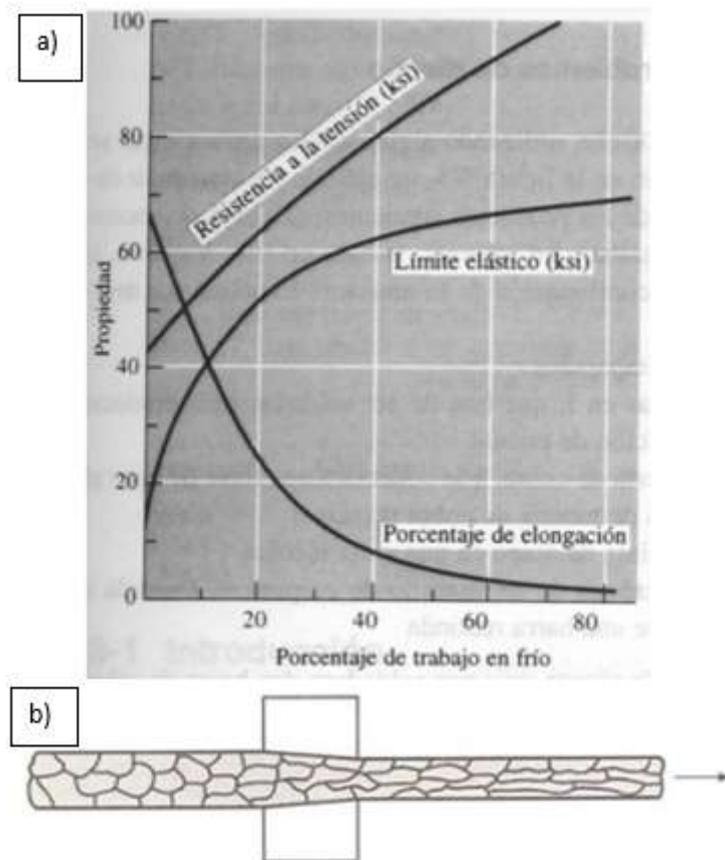


Figura 2. Efecto del porcentaje de trabajo en frío sobre las propiedades y en la estructura cristalina del material [15]

Entre las variables más importantes del proceso de trefilación se encuentran: Ángulo de aproximación o ángulo de entrada, la cantidad de potencia que se necesita para la trefilación, que depende de la cantidad de deformación, la velocidad de trabajo que varía de 1 a 20 m/s y fricción en el dado. Se deben controlar la temperatura del alambre y del dado, ya que altas temperaturas del alambre destruyen la capa de lubricante y varían las propiedades mecánicas del material. El porcentaje de carbono en el alambre también condiciona la selección de las variables anteriormente mencionadas. [5]

Es importante la preparación de la materia prima (alambroón), pues para conseguir las características de resistencia a la tracción y la apariencia que se desea, el alambroón no debe estar oxidado, esto ocurre cuando la superficie del alambroón entra en contacto con el aire, tampoco puede tener impurezas como lo son el polvo, grasa y pintura. Antes de empezar el proceso de trefilación se deben eliminar todas las impurezas de la superficie, por lo que se realiza un decalaminado, para descamar la capa de óxido y de esta manera eliminarla. [5]

El alambroón se utiliza como materia prima en la industria del trefilado para la fabricación de mallas, clavos, alambres de púas, galvanizados y recocidos. Éste se obtiene por un proceso de laminación en caliente y luego se trefila en frío. [4]

El alambroón trefilable se clasifica según el porcentaje de carbono que contiene y el diámetro. En la tabla 1 se muestra la composición química de los aceros más comúnmente utilizados, presenta la designación AISI, dando rangos máximos en porcentaje de los elementos presentes en estos aceros y en la tabla 2 se presentan las dimensiones del alambroón y en rango de tolerancias aceptable para los mismos. Estas tablas son compartidas por acerías paz del río, uno de los más tradicionales proveedores de alambroón trefilable del país. Este alambroón se usa en alambre negro, alambre recocido, puntillas, grapas productos en alambre galvanizado, malla electrosoldada, herraduras, cadenas, alambres calibrados, alambres revestidos y electrodo. La clasificación de los aceros es extensa y pueden darse de varias maneras según su contenido de carbono, elementos aleantes o aplicaciones. En general una de las designaciones más comunes es la estipulada por la American Iron Steel Institute (AISI) y la Society Of Automotive Engineers (SAE) en la que se clasifican los aceros por un código numérico de cuatro dígitos en el que los dos primeros representan los aleantes principales y los últimos dos dígitos especifican el porcentaje de carbono en la aleación [2]. También se pueden clasificar según sus porcentajes aleantes como de baja (2.5%), media (2.5-10%) o alta aleación (Superior al 10%)[3].

Tabla 1. Clasificación AISI de acero bajo carbono trefilable. [16]

GRADO	C	Mn	P máx	S máx	Si máx	B
ELECTRODO	0,04 - 0,10	0,40 - 0,60	0,025	0,025	0,10	
AISI 10B06	0,08 máx	0,25 - 0,40	0,040	0,050	0,10	0,0030 - 0,0080
AISI 1008	0,10 máx	0,30 - 0,50	0,040	0,050	0,12	
AISI 1012	0,10 - 0,15	0,30 - 0,50	0,040	0,050	0,15	
AISI 1015	0,13 - 0,18	0,30 - 0,60	0,040	0,050	0,15	
AISI 10B22	0,18 - 0,23	0,70 - 1,00	0,040	0,050	0,25	0,0030 - 0,0070

Nota: Los aceros AISI 1006 Y AISI 1022 son fabricados con adición de Boro y se comercializan por acerías paz del río como 10B06 y 10B22.

Tabla 2. Dimensión de acero bajo carbono trefilable y rango aceptable de tolerancias. [16]

DIÁMETRO NOMINAL (mm)		ESPECIFICACIÓN ALAMBRÓN TREFILABLE APDR	
		DIÁMETRO (mm)	ÓVALO (mm)
mm	Pulg	Tolerancia	Máx.
5.50		±0,30	0.40
6.35	1/4	±0,30	0.40
8.00		±0,30	0.40
9.00		±0,30	0.40
9.52	3/8	±0,30	0.40
12.70	1/2	±0,30	0.40
13.00		±0,30	0.40

4.2 Recocido de recristalización.

En el proceso de trefilación del acero, se genera un endurecimiento del acero y se reduce la ductilidad. En gran medida, las propiedades mecánicas y estructurales de un metal dependen de la densidad de dislocaciones, tamaño de grano y orientación del grano. Debido al trefilado el material deformado da como resultado una estructura de granos alargados. Es necesario un tratamiento de recocido de recristalización ya que permite un retorno a una nueva estructura de grano equiaxial.[9].

Este tratamiento se realiza en estado sólido y consiste en calentar a una temperatura adecuada, superior a la temperatura de recristalización (T_r), dejar permanecer un determinado tiempo y enfriar lentamente en el horno desde la temperatura de trabajo con el fin de que ocurra la recristalización de la ferrita, es decir que se formen nuevos granos libres de deformación. Los procesos de recocido implican la migración de los límites del grano interno dentro del material deformado y la producción de una nueva estructura de grano equiaxial.

En la figura 3 se describe el fenómeno de recristalización de la siguiente manera. Primero se deforma plásticamente un metal, esto hace que sus granos se alarguen como se muestra a la izquierda de la figura 3. Ahora se calienta se el metal y se mantiene a temperatura de recristalización. Si se observara la estructura caliente con un microscopio óptico se encontraría que no sucede nada hasta que en el tiempo t_1 empiezan a nuclearse nuevos granos de la matriz trabajados en frío. Estos granos crecen entonces en forma rápida hasta que todos los granos trabajados en frío llegan al tiempo t_2 . Luego, estos granos nuevos crecen en forma más lenta hasta que, en el tiempo t_3 , se obtiene un tamaño final. [17]

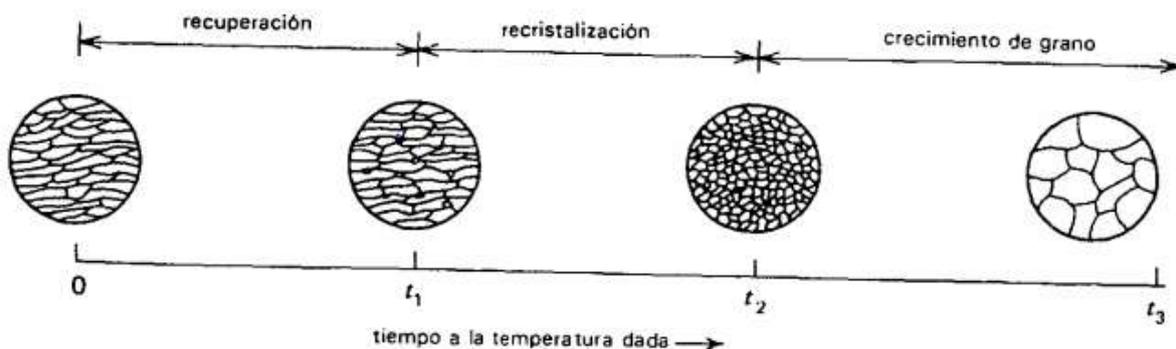


Figura 3. Esquema de la secuencia de recuperación-recristalización-crecimiento de grano durante el recocido. [17]

El proceso puede dividirse en tres fases

- Restauración o recuperación: Todos los fenómenos de recocido que se presentan antes de la aparición de granos nuevos sin deformación.

Se han realizado muchos experimentos para determinar cuáles mecanismos operan durante la etapa de recuperación. Los mecanismos que operan en el intervalo de temperatura baja implican movilización de vacancias y migración de defectos puntuales; los que operan en el intervalo de temperaturas medias implican movilización y aniquilación de dislocaciones y crecimiento de subgranos; aquellos del intervalo alto de temperatura implican aglutinación de subgranos y poligonización. [17].

- Recristalización: Nucleación de nuevos granos sin deformación y consumo gradual de la matriz trabajada en frío debido al crecimiento de estos granos.

Los sitios preferenciales de nucleación de los nuevos granos son las regiones de mayor energía. Durante la deformación plástica un metal consume una cantidad considerable de energía. La mayor parte de esta energía se convierte en calor, pero una pequeña fracción permanece en el metal como energía almacenada. Dicha energía almacenada da lugar a las etapas de recuperación y recristalización.

- Crecimiento de grano: Consumo gradual de la matriz trabajada en frío debido al crecimiento de estos granos. La fuerza impulsora para el crecimiento de granos corresponde a la energía de superficie de bordes de estos. [17]. El refinamiento del grano de la ferrita, obtenido después de la recristalización completa, es un objetivo importante de los aceros de bajo carbono, ya que se asegura un equilibrio entre la alta resistencia y buena tenacidad. [9]

La figura 4 presenta la temperatura de recristalización de 1 hora para el hierro y el aluminio. Esto puede darnos una idea de cómo se comporta el acero bajo carbono. Aquí se muestra el efecto de la cantidad de trabajo en frío sobre la temperatura de recristalización. Para una deformación dada se espera que haya más energía almacenada en un metal de grano fino debido a la deformación más compleja requerida por dichos granos. La temperatura de recristalización disminuye con los granos finos ya que estos la energía almacenada es mayor. [17]. Entonces es de esperarse que para un alambre con un porcentaje de deformación del 33 % sea necesaria una temperatura de recristalización mayor que para un alambre con una deformación del 91 %.

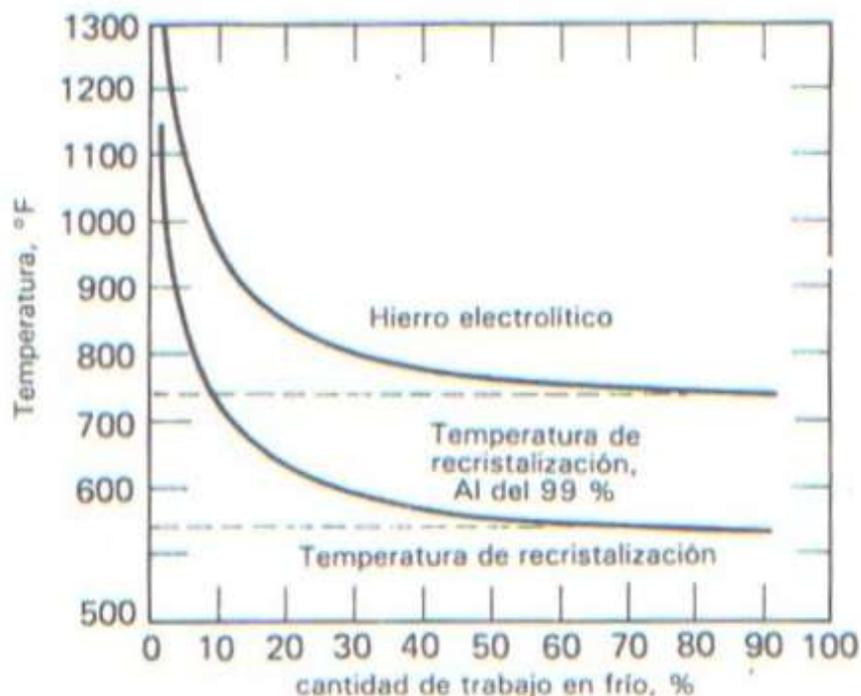


Figura 4. Efecto de la deformación sobre la temperatura de recristalización. [17]

En la figura 5, muestra la cinética de recristalización la cual se expresa en una curva signoidales. A una temperatura dada, la velocidad de recristalización (Volumen recristalizado por unidad de tiempo) parte de cero, luego, después de 3000 segundos se nuclean nuevos granos en algún punto de la matriz deformada y empieza a crecer. Con frecuencia este nuevo grano incrementará su tamaño a una velocidad constante hasta que choca con un grano vecino, en este punto la fracción de recristalización llega a un máximo por lo que dice que se ha recristalizado por completo. Cuando los granos entran en contacto unos con otros, se acaba la fase de recristalización y se entra en la fase de crecimiento de grano.

La velocidad de nucleación de recristalización se incrementa con la deformación. El tamaño de grano más pequeño provoca una velocidad de nucleación más alta, y, también hace que la nucleación se produzca más pronto. Los granos más pequeños producen un modelo de esfuerzos más complejo que ocasiona deformaciones locales más altas, lo cual aumenta la velocidad de nucleación. Como se sabe la estructura que se origina depende del tamaño de grano original.

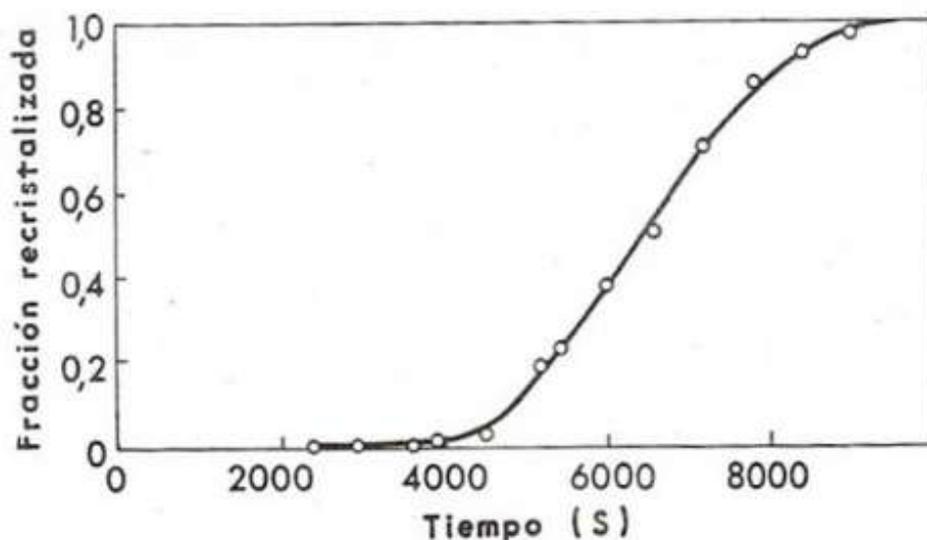


Figura 5. Cinética de recristalización del acero deformado. [17]

La figura 6 muestra como las deformaciones altas disminuyen el tamaño de grano recristalizado. Este efecto se presenta en el latón de la figura 6. El tamaño de grano inicial es decisivo en el tamaño de grano recristalizado. De tal manera que, a mayor porcentaje de deformación inicial, menor tamaño de grano recristalizado.

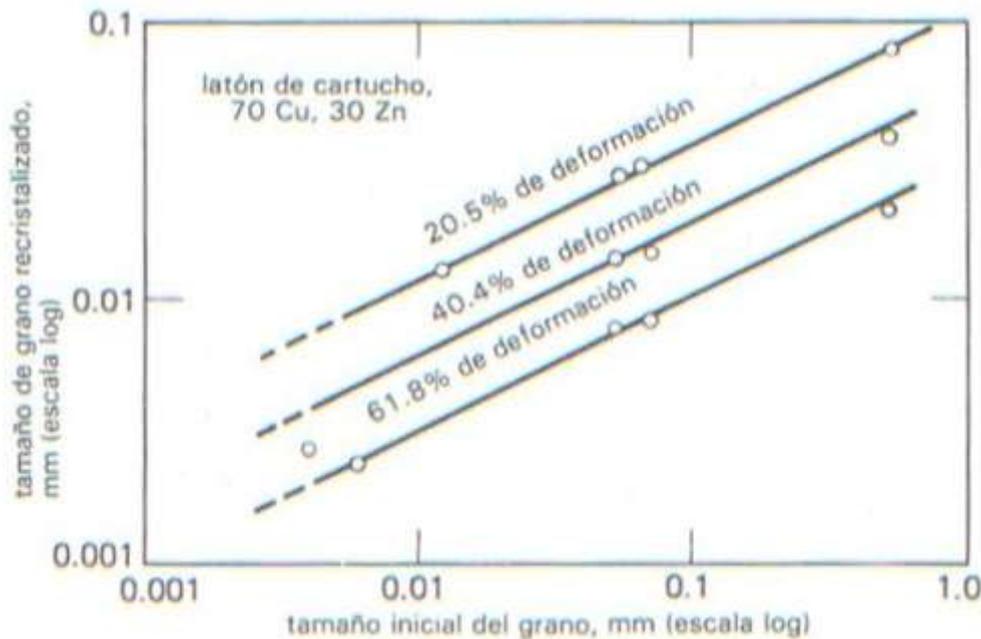


Figura 6. Variación del tamaño de grano recristalizado en función del tamaño de grano inicial y deformación. [17]

5. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA.

5.1 Revisión bibliográfica

El objetivo principal es recopilar información sobre el tratamiento térmico de recocido de recristalización y el proceso de trefilación. Reunir información sobre los defectos durante el tratamiento térmico de recocido de recristalización, también durante el proceso de trefilación y como se asocian estos con sus variables, esto para aceros de bajo carbono. Esta información se recopila de distintas fuentes como revistas, artículos científicos, libros, material archivado y trabajos académicos, de esta manera se tendrá un mayor número de recursos para la solución del problema. Esta revisión se realizará durante todo el desarrollo del proyecto.

5.2 Caracterización de la materia prima

Se realizó un reconocimiento de la materia prima empleada en los diferentes tratamientos térmicos de recocido de recristalización, tanto en laboratorio como en planta la materia prima utilizada fue la misma, un alambón de acero al carbono AISI 1006 de la acería Paz Del Río 5.5 mm, para ello se realizó un análisis de metalográfico y ensayos de tracción, con el objetivo de determinar la resistencia a la tracción, porcentaje de elongación y estricción y comportamiento microestructural del material de partida.

La caracterización se llevó a cabo empleando acero en forma de alambón, suministrado por la empresa CORSAN S.A. El alambón es fabricado en Colombia en Acerías Paz del Río con las siguientes especificaciones que se presentan en la tabla 3 y que son suministradas por el fabricante:

Tabla 3. Tiquete alambroón AISI 1006

ALAMBRÓN	6098005 Paz del Rio
Calidad	AISI 1006
Diámetro	5,5 mm
Peso	1569 kg
Colada	C37598-18
Orden	11964285
Fecha	19/10/2018
Rollo	M1-13-000

La composición química se muestra en la tabla 4, referida por el fabricante, los principales factores que afectan las propiedades de los aceros es el contenido de carbono y aleantes como el manganeso, silicio, fosforo y azufre.

El azufre normalmente es una impureza y se mantiene a un bajo nivel, es neutralizado con el manganeso que también actúa como desoxidante, una relación adecuada manganeso-azufre facilita operaciones de trabajo en caliente y en frío. El silicio utilizado como desoxidante y debe ser controlado su contenido máximo pues actúa como endurecedor en el acero.

En la tabla 4 también se proporciona la composición química de acero al carbono, bajo norma SAE, se comprueba de esta manera que el porcentaje de elementos como lo son el carbono, manganeso, fosforo y azufre se mantienen en proporciones aceptables. [10]

Tabla 4. Composición química alambroón SAE 1006 5.5 mm

Muestra	%C	%Mn	%P	%S	%Si	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%B
C37598 AISI1006	0.04	0.34	0.023	0.014	0.08	0.031	0.02	0.017	0.005	0.0052
SAE 1006	0.08 Máx.	0.30-0.40	0.040	0.050	NA	NA	NA	NA	NA	NA

En la tabla 5, se muestra el reporte de calidad suministrado por la acería Paz del río que contiene información sobre las propiedades mecánicas del material: Los ensayos realizados por el proveedor están bajo la norma técnica colombiana NTC 2 “ENSAYO DE TRACCIÓN PARA MATERIALES METÁLICOS. MÉTODO DE ENSAYO BAJO TEMPERATURA AMBIENTE”

Tabla 5. Reporte de calidad alambroón SAE1006 Paz Del Río

SAE 1006	Esfuerzo máximo (Kgf/mm²)	% Elongación	% Estricción
C37598-18	39.667	26	78

5.2.1 Caracterización microestructural de la materia prima

A continuación, se describen de qué forma y bajo qué normas se realizó la caracterización del material de partida y se muestran los resultados de las estructuras obtenidas y el tamaño A.S.T.M

5.2.2 Nivel de inclusiones en el material de partida

El análisis se realiza con base en el método JK-chart “METODO COMPARATIVO NORMA ASTM E45”. Para esto las muestras se prepararon según la norma ASTM E3[18]. El proceso de preparación de la probeta del material de estudio consistió en: Un desbaste de forma longitudinal aproximadamente 2 milímetros, este desbaste se hace recto para facilitar el lijado y el pulido, luego las probetas son montadas en baquelita, el lijado se realizó usando diferentes papeles de lija, iniciando con una lija de grano número 100 y finalizando con una lija de número 1200, finalmente el pulido se hizo con alúmina de una micra. Para determinar el nivel de inclusiones presentes, las muestras se observan en el microscopio óptico sin ser atacadas y a 100 x de aumento como lo indica la norma. Finalmente se toman diferentes zonas representativas y se realiza la comparación.

En la figura 7 se muestra la micrografía del material de partida sin ser revelada su microestructura. No se observa presencia de sulfuros, aluminatos o silicatos, pero si son identificables óxidos globulares finos ($8\ \mu\text{m}$), con un nivel de inclusiones tipo 1 y 2. Esto es importante ya que al ser óxidos globulares los esfuerzos internos asociados a estos no son localizados permitiendo deformaciones plásticas más altas sin que ocurran fallas en el material.



Figura 7. Micrografía materia prima acero AISI 1006 sin ataque.

Se realizó un análisis microestructural al material de partida, revelando su microestructura. Para esto las muestras se prepararon según la norma ASTM E3, descrita anteriormente. El

ataque químico se realizó empleando Nital al 1%. Las muestras en estado inicial se observaron en el microscopio óptico marca NIKON ECLIPSE MA100 en el laboratorio de fundición de la Universidad de Antioquia para todas las muestras y determinar las fases y realizar la medición del tamaño de grano.

En la figura 8, se muestra la micrografía de la materia prima, un acero AISI 1006 de la acería Paz Del Río. En esta micrografía se observa una matriz predominante tipo ferrítica y pequeñas islas de perlita. En general se nota un tamaño de grano homogéneo, esta estructura se origina en el proceso de fabricación del alambón.

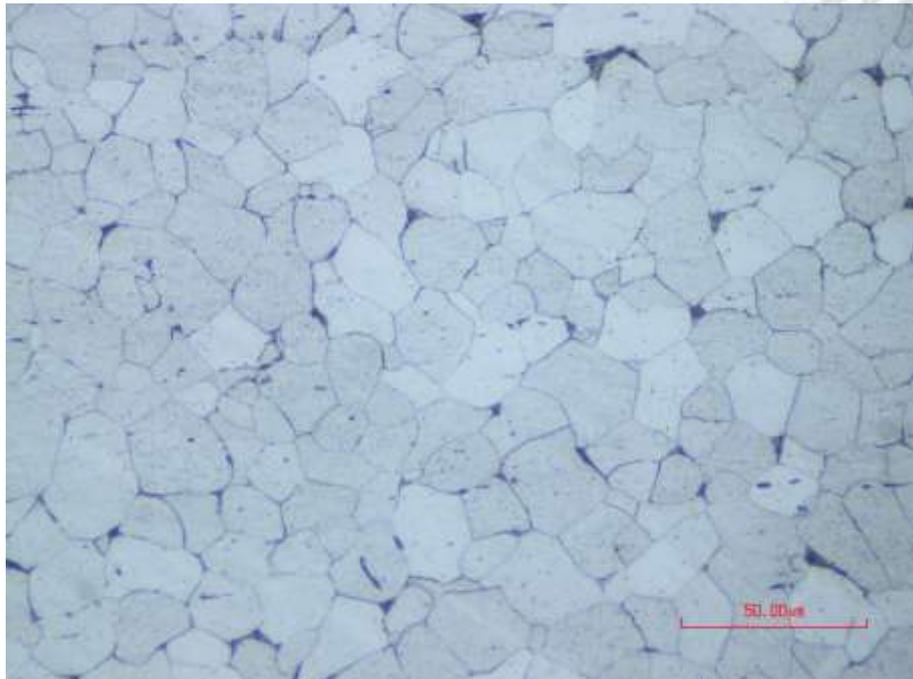


Figura 8. Micrografía materia prima acero AISI 1006. Muestra atacada con Nital 1%

5.2.3 Medida del tamaño de grano de la materia prima

La medida del tamaño de grano ASTM, se realizó basado en la norma ASTM E112 “MÉTODO ESTÁNDAR PARA LA DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE GRANO” que determinó el tamaño de grano promedio usando el procedimiento de intercepción lineal, que involucra un conteo de granos interceptados por una línea de ensayo o el número de intercepciones con los bordes del grano. Con ayuda del microscopio óptico marca NIKON ECLIPSE MA100 se realizaron 6 intercepciones en diferentes zonas de la microestructura. Es importante mencionar que según la norma estas mediciones se realizaron en la sección longitudinal del alambón. Finalmente, con el tamaño de grano promedio obtenido y haciendo uso de la tabla 6 que es proporcionada por la norma, se halla el número de grano ASTM.

Se obtuvo un tamaño promedio de 13.80 μm por lo que haciendo uso de la tabla 6, se tiene un grano A.S.T.M DE 9

Tabla 6. Conversión de longitud promedio a número A.S.T.M [18]

Número N A.S.T.M.	Granos/mm ²	Longitud promedio en mm
-3½	0,685	1,051
-3	0,969	0,884
-2½	1,370	0,743
-2	1,938	0,625
-1½	2,740	0,526
-1	3,875	0,442
-½	5,480	0,372
0	7,750	0,313
½	10,96	0,262
1	15,50	0,221
1½	21,92	0,186
2	31,00	0,156
2½	43,84	0,131
3	62,00	0,110
3½	87,68	0,0929
4	124,0	0,0781
4½	175,4	0,0657
5	248,0	0,0552
5½	350,7	0,0465
6	496,0	0,0391
6½	701,4	0,0328
7	992,0	0,0276
7½	1 403	0,0232
8	1 984	0,0195
8½	2 806	0,0164
9	3 968	0,0138
9½	5 612	0,0116
10	7 936	0,00977
10½	11 220	0,00821
11	15 870	0,00691
11½	22 450	0,00581
12	31 740	0,00488

5.2.4 Ensayo de tracción para materia prima

Se realizaron ensayos de tracción por triplicado de las muestras de alambón calidad AISI 1006. Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo al procedimiento que tienen normalizado en la empresa que consiste en una máquina de tracción (Ver figura 9) con una celda de carga con capacidad de 10 kilo-libras, dos mordazas que sujetan las probetas y un controlador lógico programable (PLC) que traduce la resistencia a la tracción del material en unidades de kgf/mm², según el diámetro del mismo, la velocidad del ensayo se controla desde la apertura de una válvula, la cual mueve la cabeza móvil para iniciar el ensayo, la apertura de esta válvula no es siempre la misma por lo que el ensayo no cumple las especificaciones normativas para realizar la prueba, pero para las exigencias de Industrias Metálicas CORSAN la máquina cumple su objetivo.

El porcentaje de elongación que es el alargamiento expresado como un porcentaje, se calcula tomando una longitud calibrada (L_0), esta es tomada antes de la aplicación de la carga, también se toma una longitud calibrada final (L_f), esta es tomada después de la rotura de la probeta de ensayo. Finalmente utilizando la ecuación 1 fue posible obtener el porcentaje de elongación.

$$\% \text{ elongacion} = \frac{l_f - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (1)$$

Ecuación 1. Porcentaje de elongación [6]

La estricción o el porcentaje de reducción de área es el cambio de área de la sección transversal que ha ocurrido durante el ensayo, expresado como el área de la sección transversal inicial.

$$\% \text{ reduccion de Area} = \frac{A_f - A_0}{A_0} \cdot 100\% \quad (2)$$

Ecuación 2. Porcentaje de estricción [6]



Figura 9. Máquina de tracción.

Para el alambrión se obtiene un valor muy cercano al que se encuentra en el certificado de calidad (Ver tabla 6). En la tabla 7 están tabulados los resultados que demuestran que tanto para el porcentaje de elongaci3n como para la resistencia máxima a la tracci3n se obtiene un valor aproximado, por otro lado, el porcentaje de reducci3n de área se encuentra 6 % por debajo del valor dado por el certificado de calidad.

En la figura 10 se identifica el comportamiento mecánico del material al ser sometido a un esfuerzo axial, se observa un material con zona plástica predominante, obteniendo como resultado un esfuerzo de fluencia de 28.58 Kgf/mm² y una resistencia máxima de 38.65 kgf/mm².



Figura 10. Comportamiento mecánico alambri3n aceria Paz Del Río calidad AISI 1006

Tabla 7 Resultados del ensayo de tracci3n para alambri3n.

ACERO	Resistencia a la tracci3n (Kgf/mm ²)
Alambri3n acero bajo carbono calidad AISI 1006	38.65
	%Elongaci3n 27.69
	%Estricci3n 63.05

5.3 Seguimiento al alambre trefilado con diferentes porcentajes de deformaci3n (32, 66 y 91 %)

El alambri3n es transportado desde la bodega de almacenamiento hacia la zona de trefilaci3n para ser procesado en el trefilador número 8 (Ver figura 12), en la cual se pueden obtener diferentes porcentajes de deformaci3n de manera continua, el montaje del alambri3n en la trefiladora se muestra en la figura 11.



Figura 11. Alambrón AISI 1006

Para la obtención del alambre brillante se programa el siguiente montaje de hileras (Ver tabla 8), se realiza un total de 10 pasos, donde se parte de un alambrón de diámetro de 5.50 milímetros y se obtiene un alambre brillante de diámetro aproximado de 1.24 milímetros.

En la tabla 9 se muestran las diferentes condiciones de nivel de deformación:

Tabla 8. Porcentajes de deformación

Numero de pasos	Porcentaje de deformación (%)	Calibre real
1	32 %	4.55
2	30 %	3.80
3	29 %	3.21
4	28 %	2.73
5	27 %	2.34
6	25 %	2.02
7	25 %	1.75
8	24 %	1.53
9	20 %	1.37
10	18 %	1.24

Finalmente se extraen muestras de aproximadamente 3 metros de longitud de alambre brillante en los siguientes porcentajes de deformación 32 %, 66% y 91 %, las muestras son tomadas de la región del medio del rollo que ha sido deformado, esto se hace con el objetivo

de introducir estas muestras en el horno tipo campana utilizado en industrias metalicas CORSAN S.A y en una mufla de laboratorio de la Universidad de Antioquia y de esta manera evaluar su comportamiento mecánico y realizar un analisis cristalográfico cuando es sometido a un recocido de recristalización. Es importante mencionar que la elección de estos tres porcentajes de deformación se da porque representan una carga de material en el horno de recocido de recristalización en un día normal de producción.



Figura 12. Trefiladora número 8.

5.3.1 Caracterización microestructural del material trefilado en las tres distintas condiciones de deformación

Otra de las finalidades del análisis microestructural es el reconocimiento del cambio en la microestructura del acero de estudio con respecto al porcentaje de reducción o deformación que se obtenía del proceso de trefilación, En la figura 13 se muestran las micrografías en la sección longitudinal a porcentajes de deformación de 32, 66 y 91 por ciento y, se presenta este análisis de la evolución de la microestructura del acero AISI 1006. Las muestras se prepararon según la norma ASTM E3[18], siguiendo la misma metodología del material de partida.

Las figuras 13 a, b y c revelan una microestructura con granos ferríticos e islas perlíticas finas, esta microestructura es características de un acero SAE 1006. Los granos se ven alargados como consecuencia del proceso de trefilación, en la figura 13 c se evidencia una mayor deformación acorde al trabajo en frio al que fue sometido. Es importante mencionar que mediante microscopia óptica es posible darse cuenta de la orientación del grano ferrítico que al ser una fase dúctil se deforma en dirección del trefilado.

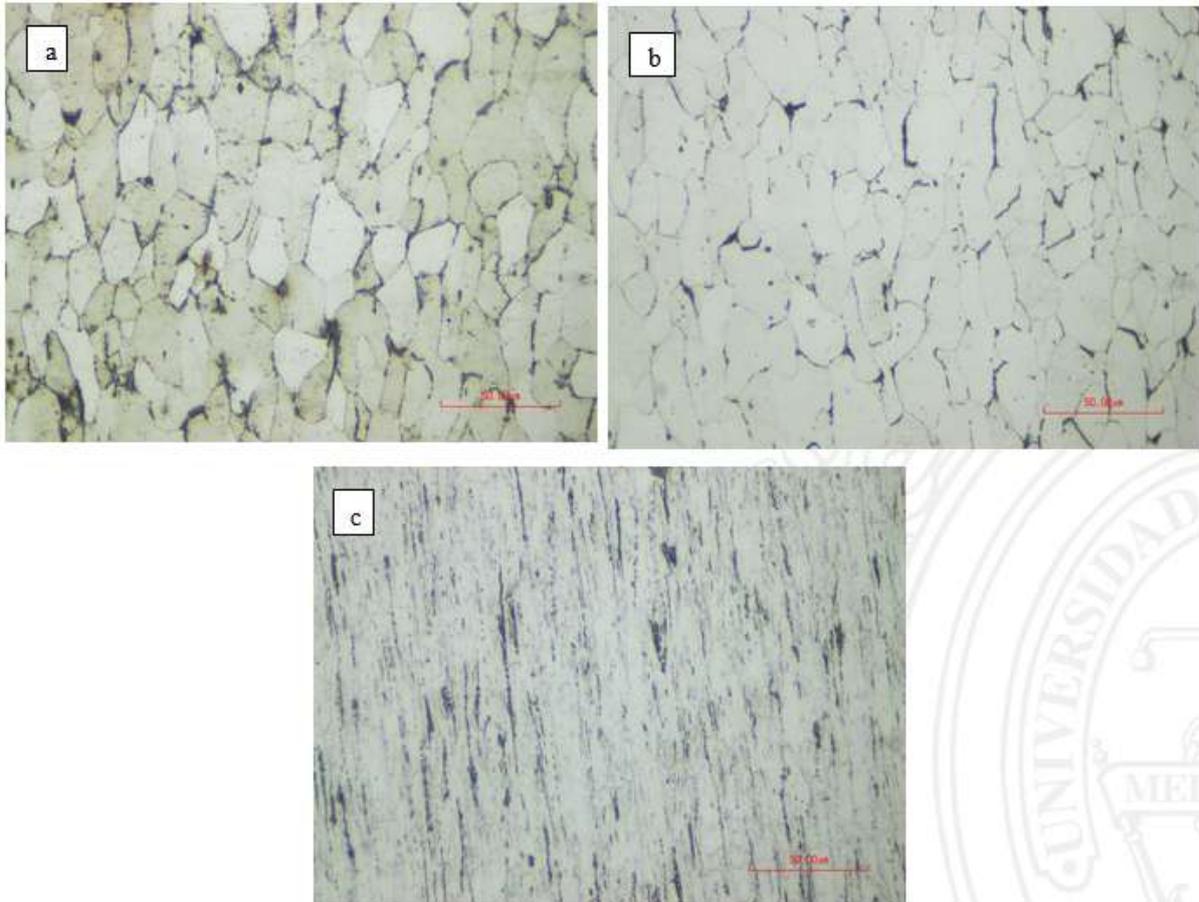


Figura 13. Micrografía acero AISI 1006 trefilado con una deformación del a) 32 %, b) 66 % y c) 91 % respectivamente. Muestra atacada con Nital 1%

5.3.2 Ensayo de tracción para el material trefilado a las tres distintas condiciones de deformación.

Se realizaron ensayos de tracción por triplicado a cada condición de deformación de las muestras de alambre brillante calidad AISI 1006 trefilado. Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo con el procedimiento que tienen normalizado en la empresa y que se describió anteriormente.

En la figura 14, se muestra el comportamiento mecánico de los alambres trefilados a diferentes porcentajes de deformación en frío, se identifica que a medida que aumenta el porcentaje de deformación del material, éste tiene un comportamiento elástico predominante obteniendo esfuerzos máximos mayores, pero deformaciones unitarias más baja:

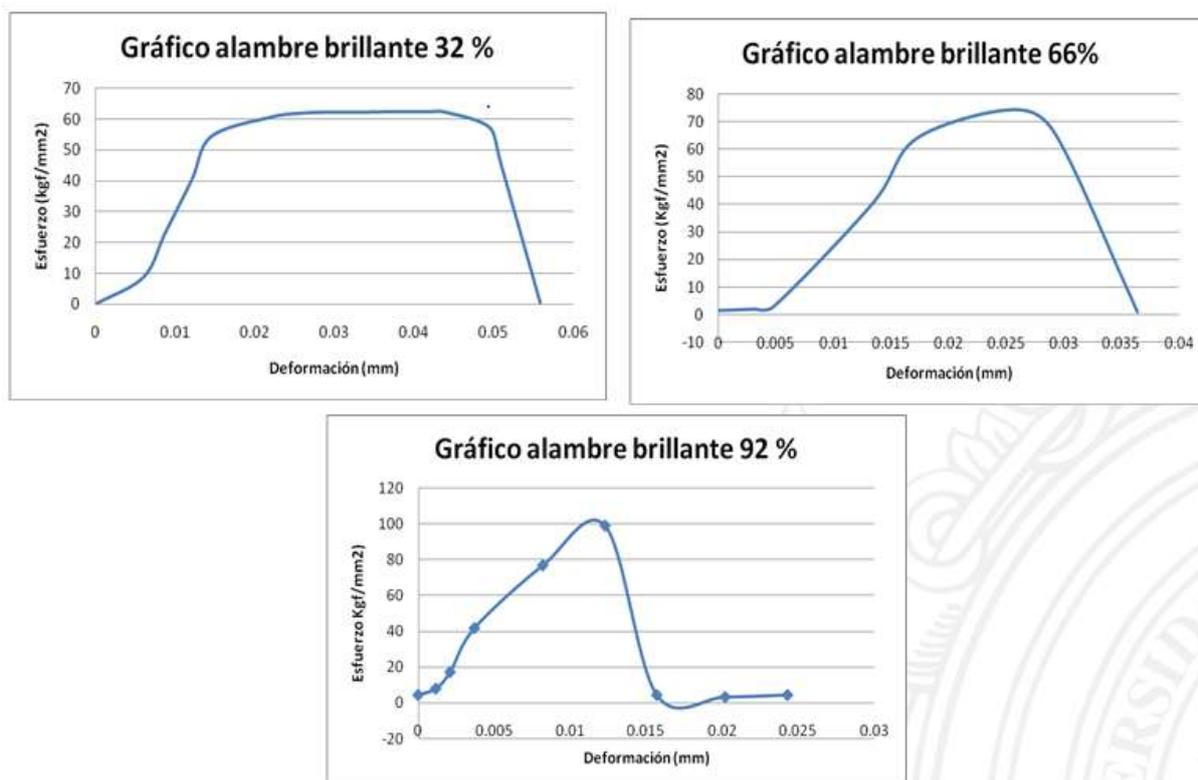


Figura 14. Comportamiento del Alambre brillante a distintas deformaciones

Como era de esperarse, en los alambres trefilados a medida que aumenta la deformación es mayor su resistencia a la tracción, como se sabe a nivel microscópico los metales consisten en regiones llamadas cristales que contienen muchas imperfecciones en la estructura, llamadas dislocaciones. En la deformación plástica se forman nuevas imperfecciones que eliminan las viejas imperfecciones. Este fenómeno es conocido como endurecimiento por deformación y es típico del trabajo en frío, esto fenómeno puede verificarse en los resultados obtenidos del ensayo de tracción en la tabla 9, donde a medida que aumenta el porcentaje de deformación, se acrecienta la resistencia máxima a la tracción, reduciendo notoriamente la capacidad de alargamiento y reducción de área.

Tabla 9. Resultados del ensayo de tracción para alambre trefilado a tres distintas condiciones de deformación.

ACERO	Resistencia a la tracción (Kgf/mm ²)	%Elongación	%Estricción
Alambre brillante 32 %	62.38	3.33	29.14
Alambre brillante 66%	73.91	1.28	20.09
Alambre brillante 92%	99.79	0.77	10.57

5.4 Seguimiento al proceso de recocido de recristalización en planta

Se realizó un seguimiento en planta del tratamiento de recocido de recristalización con el objetivo de identificar variables críticas del proceso y aquellas prácticas en la carga y

descarga del horno que puedan influir negativamente en las propiedades del material una vez terminado el proceso.

El seguimiento se realizó en el horno 1 y en la base numero 3 ya que todo el material que va dirigido para cliente externo se procesa en este horno. El horno fue cargado con acero bajo carbono calidad AISI 1006 y se obedecieron los parámetros actuales del proceso. Como es habitual en la base del horno fueron ubicados los rollos que serán utilizados para consumo interno, el resto de los rollos son para cliente externo y se posicionan en el centro y parte superior del horno.

Se ingresaron 12 probetas de alambre brillante con diferentes porcentajes de deformación 32 %, 66% y 91% a diferentes alturas en el horno como se observa en la figura 15, las probetas fueron sujetadas en la parte externa de los rollos, todo esto se realizó con el objetivo de determinar la influencia de tiene la posición del material en el horno, en el comportamiento mecánico y microestructural del alambre recocido. Las probetas de aproximadamente 80 cm se ubicaron en la base del horno, y en la parte superior del horno. La temperatura de recocido fue de 670 grados centígrados con un tiempo de sostenimiento de 3 horas y 30 minutos y una etapa de enfriamiento de 16 horas dentro del horno.

El seguimiento se hizo identificando los porcentajes de deformación del alambre, peso de rollo, número de rollos, masa total cargada en el horno, y parámetros del proceso de recocido como temperatura y tiempo de calentamiento, sostenimiento y enfriamiento de los rollos de alambre.

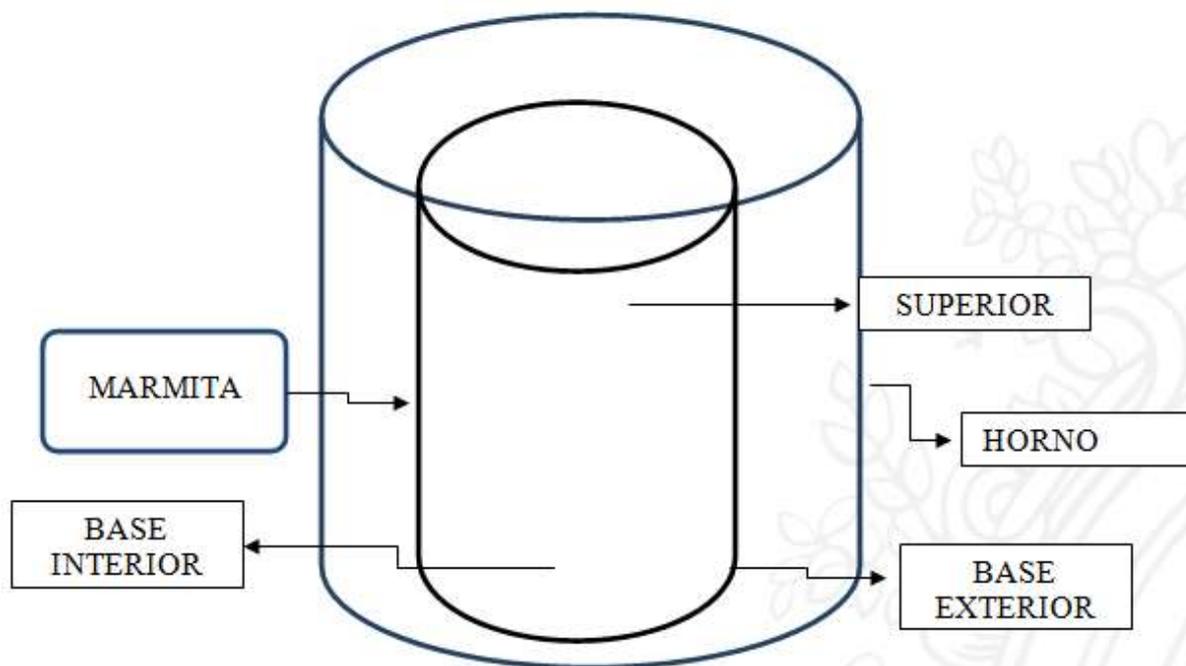


Figura 15. Esquema de la ubicación de probetas dentro del horno de tratamiento térmico. Horno 1 y base 3.

Tabla 10. Carga total de horno 1

Rollo	Peso (g)	Diámetro (mm)
6	101	1.68
5	101	1.68
4	101	1.68
3	199	2.70
2	171	2.70
1	214	2.70
Base	218	2.70

En la tabla 11, se muestran las condiciones en las que se realizaron el tratamiento de recristalización en la planta: Es importante mencionar que, aunque en las fichas técnicas internas de la empresa la temperatura de recocido es de 650 °C, cuando fue realizado el tratamiento esta temperatura se modificó y aumentó 20 grados, el tiempo de sostenimiento también se redujo media hora de las cuatro horas que menciona la ficha técnica.

Tabla 11. Condiciones del tratamiento térmico para alambre brillante con porcentajes de deformación de 32, 66 y 91 %

Base 3	Horno 1
Temperatura Recocido de recristalización	670 °C
Tiempo de sostenimiento	3 horas y 30 minutos
Medio y tiempo de enfriamiento	16 horas (Aire)
Tiempo de calentamiento	5 horas y 30 minutos

En la tabla 12, se muestra el número total de ensayos metalográficos y ensayos mecánicos que se realizarán en esta etapa:

Tabla 12. Número total de ensayos realizados en el seguimiento en planta del tratamiento térmico.

Ensayos de planta			
Deformación (%)	Ubicación en horno	Metalografía	Ensayo mecánico
33	2	2	6
66	2	2	6
91	2	2	6
Total	2	6	18

5.4.1 Caracterización microestructural de alambre recocido en planta.

La figura 16 se observa para las imágenes a, b y c, en las tres distintas condiciones de deformación inicial, ubicadas en la parte superior del horno y recocidas a 670 °C con un

tiempo de sostenimiento de 210 minutos, una microestructura con granos recristalizados ferríticos e islas perlíticas finas, esta microestructura es características de un acero SAE 1006.

La caracterización microestructural para las probetas ubicadas en la parte superior del horno se muestra en la figura 16, se observa un grano recristalizado excesivamente grande para las tres condiciones iniciales de deformación 33%, 66% y 91%, se obtiene un tamaño de grano ferrítico A.S.T.M de 6 ½, 7, 6 ½ respectivamente. Como se muestra en la tabla 14, el tamaño de grano obtenido en la parte superior del horno es muy similar entre sí, para las tres deformaciones. Este tamaño de grano es en promedio 25 % mayor al del material de partida.

En la figura 16 se observa para cada una de las imágenes a, b y c una estructura granular sin trazas de deformación, también es posible observar en todas las imágenes cementita globulizada o esferoidizada fina alineada en los límites y dentro del grano ferrítico [11]. Aunque se percibe más cantidad de ésta cementita alineada en la figura 16 que en la figura 18, ya que como se ha mencionado es posible que la temperatura en la parte superior del horno sea muy alta.

Tabla 13. Tamaño de grano. Ensayo en planta 670°C (210 min sostenimiento)

Ubicación horno: Superior	Tamaño promedio (µm)	Tamaño ASTM
Alambre recocido 32%	32.64	6 1/2
Alambre recocido 66%	28.33	7
Alambre recocido 91%	30.72	6 1/2

Comparando el valor del tamaño de grano con el material de partida es evidente que la posición en el horno influye drásticamente. El crecimiento de grano ocurre por temperaturas muy altas en relación a la recristalización, el horno que utiliza la empresa consta de tres quemadores que se posicionan a diferentes alturas, esto se ilustra en la figura 16, esta ubicación de los quemadores no es la más óptima pues el flujo de calentamiento tiende a acumularse en la parte superior del horno, por otra parte el horno no utiliza ventiladores que controlen un flujo homogéneo de calentamiento, por estas dos razones es posible que se obtengan estos tamaños de grano.

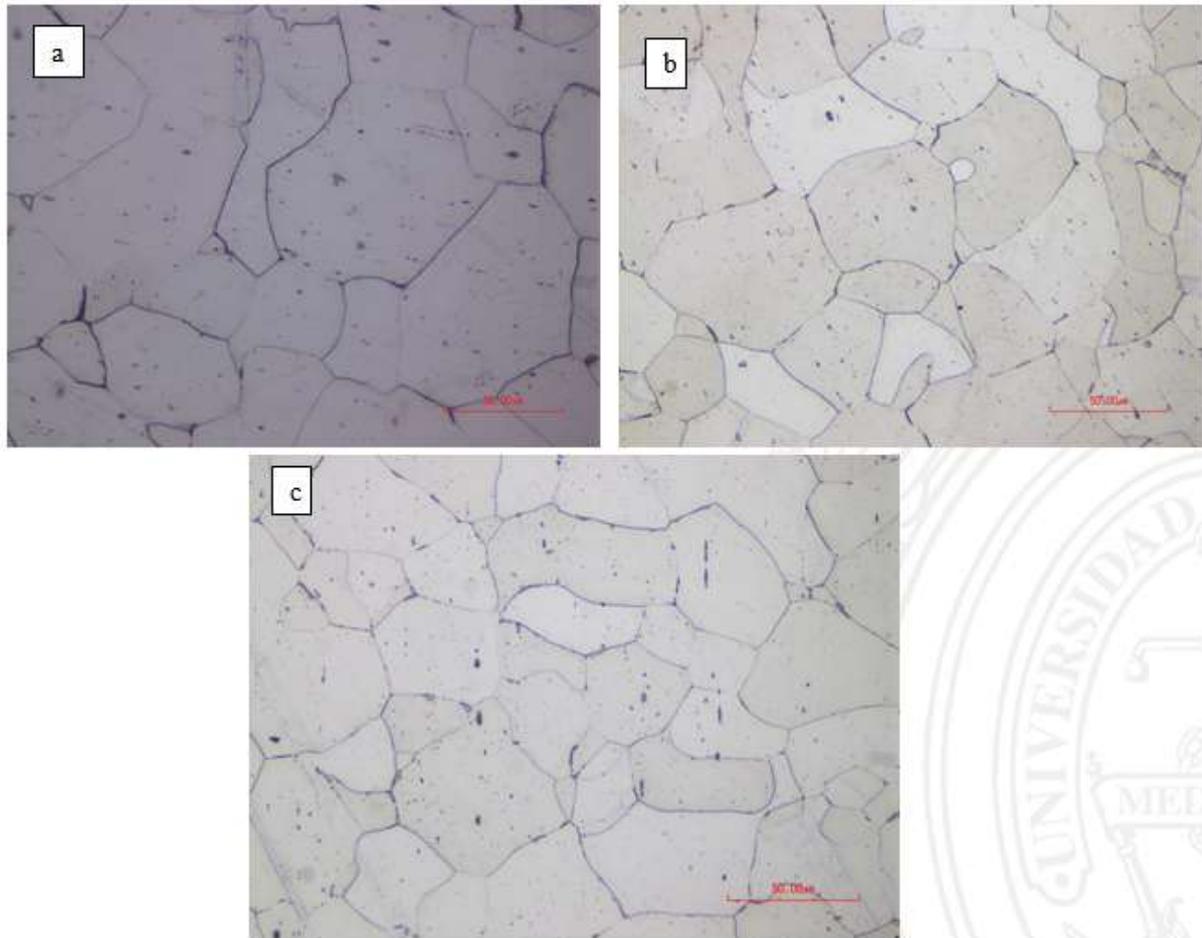


Figura 16. Micrografía acero AISI 1006 recocido en planta a 670 °C, con un tiempo de sostenimiento de 210 minutos, las muestras se ubicaron en la parte superior del horno, las imágenes corresponden a una deformación inicial del a) 32%, b) 66% y c) 91%. Muestra atacada con Nital 1%

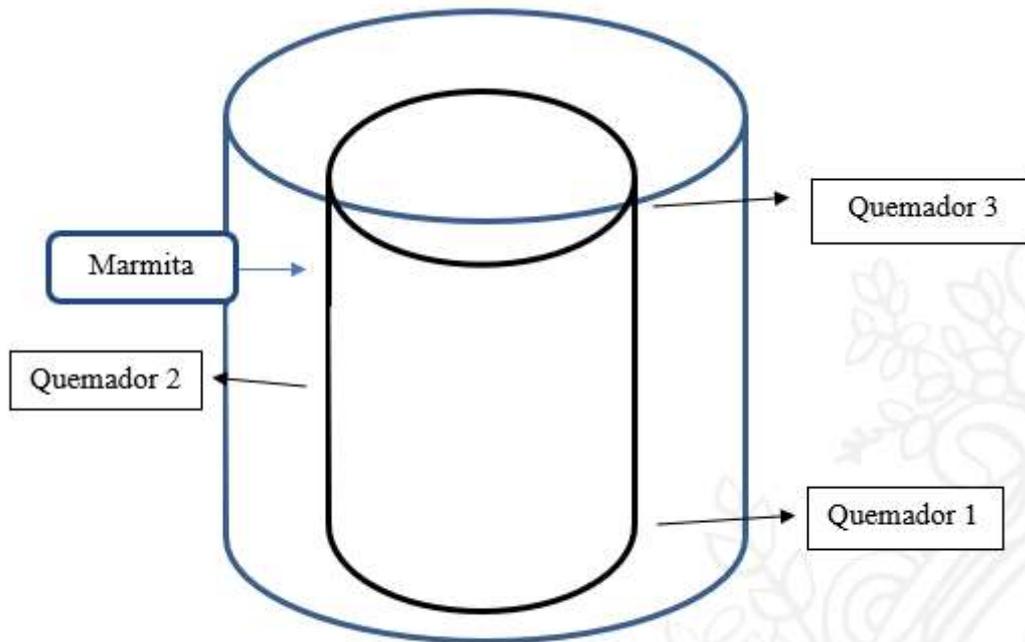


Figura 17. Disposición de quemadores en el horno tipo campana para recocido de recristalización

La figura 18 se observa para las imágenes a, b y c, en las tres distintas condiciones de deformación inicial, ubicadas en la parte inferior del horno y recocidas a 670 °C con un tiempo de sostenimiento de 210 minutos, una microestructura con granos recristalizados ferríticos e islas perlíticas finas, se observan granos sin trazos de deformación, también es posible observar en todas las imágenes cementita globulizada o esferoidizada fina alineada en los límites y dentro del grano ferrítico aunque en menor proporción si se compara con la figura 16 [11]. Es importante mencionar que el horno cuenta con una sola termocupla en la base de este, en el resto del horno no hay control de la temperatura. Como se ha mencionado es posible que la temperatura influya en la aparición de ésta cementita globulizada. Las temperaturas altas que se suponen son mayores en la parte superior del horno pueden ocasionar un mayor número de cementita globulizada.

Si hablamos del tamaño de grano A.S.T.M obtenido bajo esta condición, como se observa en la tabla 14 este varía según el porcentaje inicial de deformación, esto es de esperarse ya que como se sabe para un porcentaje de trabajo en frío mayor, el tamaño de grano recristalizado será más fino y este comportamiento se destaca en esta zona del horno. Para las tres condiciones iniciales de deformación 33%, 66% y 91%, se obtiene un tamaño de grano ferrítico A.S.T.M de 7, 8 ½ y 9 respectivamente.

En conclusión la posición del material en el horno influye considerablemente en el comportamiento microestructural, para los alambres ubicados en la parte superior del horno se obtiene un tamaño de grano A.S.T.M 25 % mayor al ser comparado con el material de partida, cosa contraria sucede para los alambres ubicados en la parte inferior puesto que para una deformación del 91 % el tamaño de grano A.S.T.M recristalizado es el mismo que el de la materia prima, para una deformación del 66 % solo es 5 % mayor comparado con el material de partida y para un 33 % es un 22.2 % mayor. Lo que quiere decir que, en la zona inferior del

horno, donde está ubicada la termocupla si haya un flujo homogéneo de temperatura y que el valor de 670° C sea el real, confirma que en la zona superior hay un aumento de temperatura.

Finalmente hay que tener en cuenta que, si el control de la temperatura en la zona inferior del horno es el adecuado, la carga del material no lo es, ya que para porcentajes de deformación inicial bajos es necesario elegir temperaturas de recristalización más altas o tiempos de sostenimiento más prolongados, esto con el objetivo de obtener un tamaño de grano A.S.T.M igual al de la materia prima.

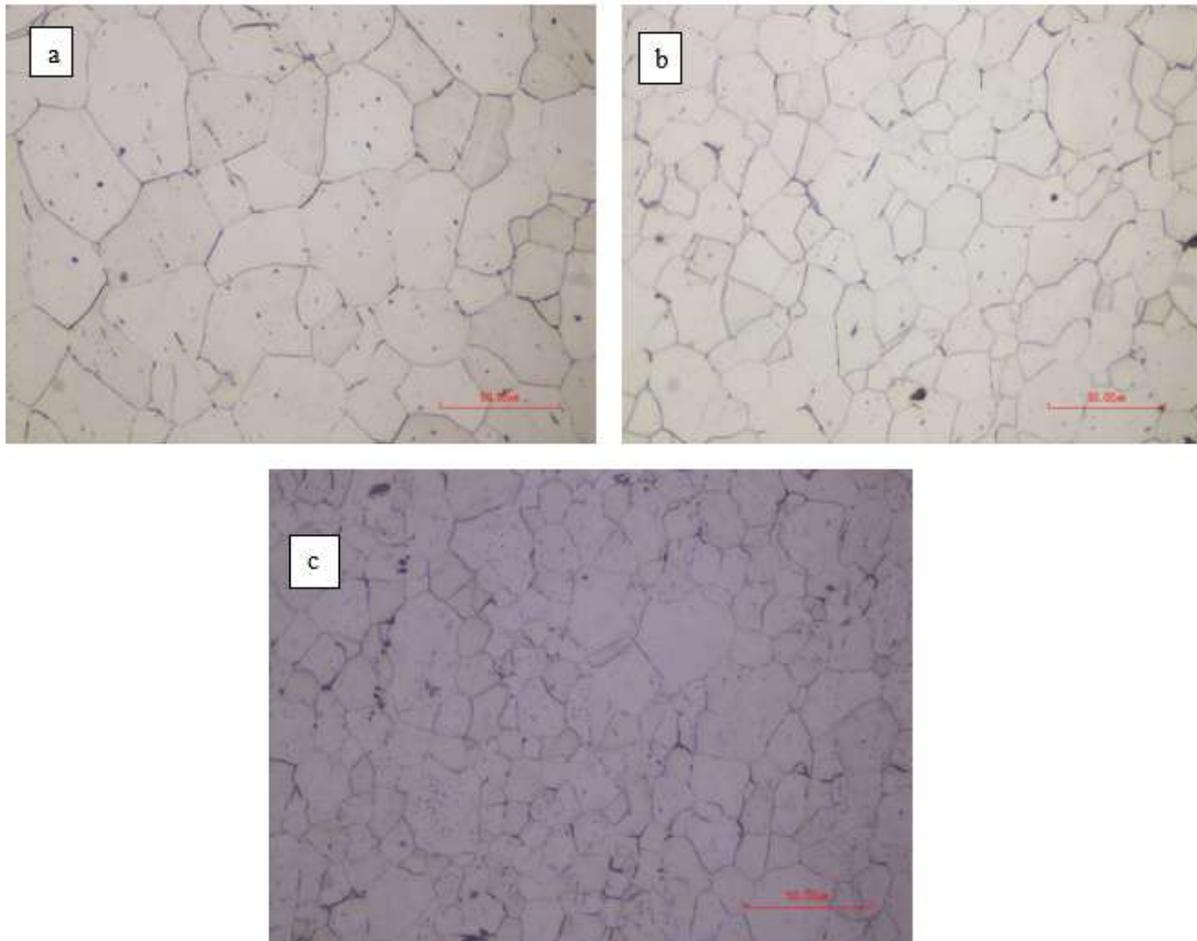


Figura 18. Micrografía acero AISI 1006 recocido en planta a 670 °C, con un tiempo de sostenimiento de 210 minutos, las muestras se ubicaron en la parte inferior del horno, las imágenes corresponden a una deformación inicial del a) 32%, b) 66% y c) 91%. Muestra atacada con Nital 1%

Al realizar el análisis de las muestras en planta con los diferentes porcentajes de deformación se deja en evidencia la importancia de definir tratamientos térmicos óptimos según porcentaje de trabajo en frío que son sometidos los materiales para lograr sobresalientes propiedades mecánicas y una mejor caracterización microestructural. Al realizar los tratamientos térmicos de acuerdo con el porcentaje de reducción en frío, se pueden elegir temperaturas y tiempos de sostenimiento adecuados para que el material recupere y mejore sus propiedades iniciales, evitando valores de resistencia a la tracción y ductilidad que no estén de acuerdo con lo especificado por los clientes.

Tabla 14. Tamaño de grano. Ensayo en planta 670°C (210 min sostenimiento)

Ubicación horno: inferior	Tamaño promedio (µm)	Tamaño ASTM
Alambre recocido 32%	28.57	7
Alambre recocido 66%	16.15	8 1/2
Alambre recocido 91%	13.42	9

5.4.2 Ensayo de tracción para el material recocido en planta a las tres distintas condiciones de deformación.

Se realizaron ensayos de tracción por triplicado a cada condición de deformación de las muestras de alambre recocido calidad AISI 1006, bajo las condiciones actuales del tratamiento en planta. Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo con el procedimiento que tienen normalizado en la empresa y que se describió anteriormente.

En la figura 19, se muestra el comportamiento mecánico de los alambres recocidos en planta donde se observa que el material recupera propiedades como ductilidad y capacidad de ser estirado. Se obtienen propiedades muy similares a las de la materia prima y que están dentro de las especificaciones de las fichas técnicas internas de la empresa. Para simplificar el análisis de los alambres recocidos en planta solo se mostrarán las gráficas esfuerzo-deformación de estos alambres ubicados en la parte inferior ya que en esta zona el comportamiento fue el más ideal. Además, como se puede observar en la tabla 16 los resultados de los recocidos en la parte superior son muy similares cuando hablamos de resistencia máxima a la tracción, porcentaje de elongación y porcentaje de estricción.

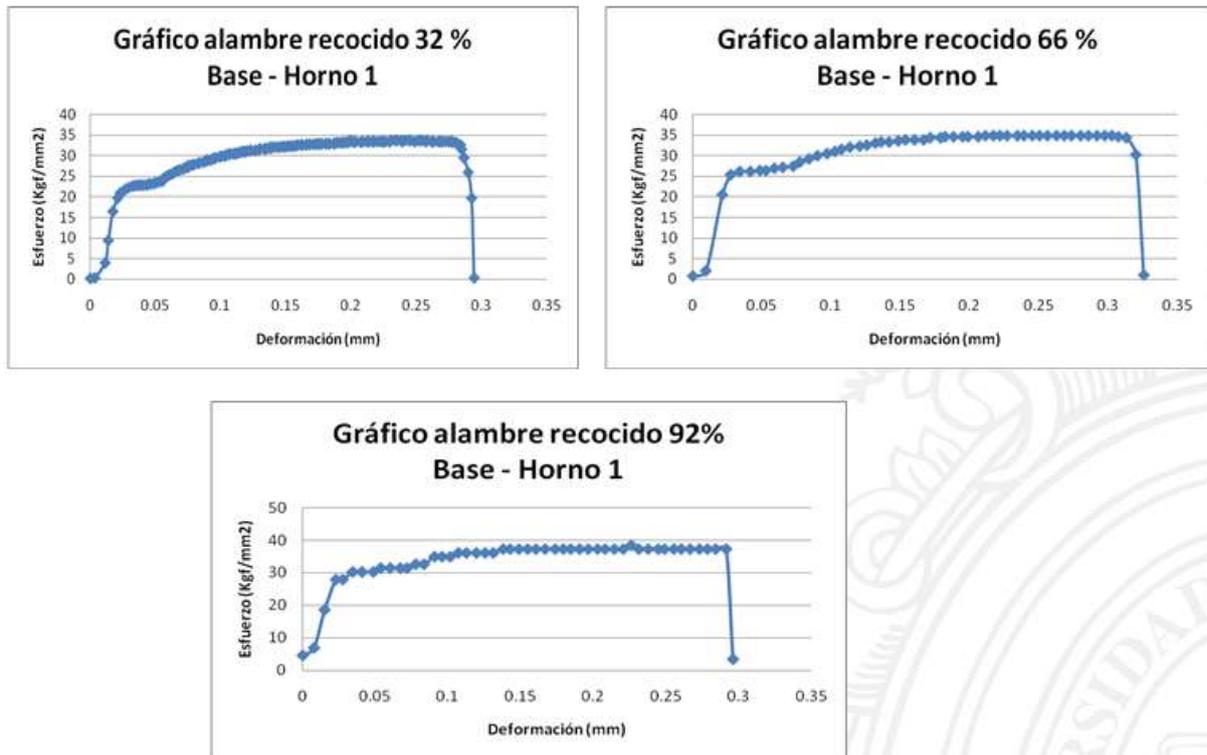


Figura 19. Comportamiento del Alambre recocido en la parte inferior del horno.

En la tabla 15, se observa que en general, se logran resultados satisfactorios y acorde a lo esperado en materiales que recuperaron sus propiedades por medio del recocido. Los ensayos en planta dieron como resultado una resistencia a la tracción, para las distintas condiciones de tratamiento de recocido y trabajo en frío inicial acorde a lo especificado en las fichas internas de la empresa que maneja un rango de resistencia a la tracción máxima de 32 a 45 kgf/mm². Los resultados del porcentaje de elongación y estricción no pueden ser comparados con la ficha técnica, ya que actualmente estos datos no son tenidos en cuenta, pero es importante mencionar que estos resultados son proporcionales y están de acuerdo con un material que recuperó propiedades de ductilidad.

Tabla 15. Resultados del ensayo de tracción para alambre recocido a tres distintas condiciones de deformación inicial.

ACERO	Resistencia a la tracción (Kgf/mm ²)	%Elongación	%Estricción
Alambre recocido 32% (Superior)	32.74	31.28	59.51
Alambre recocido 66% (Superior)	33.36	29.41	53.87
Alambre recocido 92% (Superior)	37.07	27.95	48.06
Alambre recocido 32% (Inferior)	33.74	29.49	60.56
Alambre recocido 66% (Inferior)	34.67	30.77	58.32
Alambre recocido 92% (Inferior)	38.63	29.95	40.75

5.5 Tratamiento de recocido de recristalización en laboratorio

Los ensayos se realizaron simulando una carga normal de producción que realiza la empresa en su jornada laboral, empleando parámetros de tratamiento térmico que normalmente se usan en planta. Estas cargas dependen de la cantidad de alambre que se requiera, por lo que al horno ingresan alambre de diferente diámetro. Estos ensayos se realizaron con el objetivo de comparar el proceso de recocido de recristalización en la empresa y así sugerir acciones que impacten positivamente en los materiales, es importante mencionar que, la elección de la temperatura de recocido se hizo inicialmente según la ficha técnica de la empresa, pero que a medida que avanzó la práctica este valor fue cambiado en planta, por lo que la temperatura de recocido de recristalización, los tiempos de calentamiento, sostenimiento y enfriamiento son diferentes.

Se contó con una mufla de resistencia eléctrica con termocuplas como sistema de control de temperatura en tiempo real. El calentamiento es homogéneo en toda cavidad del horno. Esta mufla cuenta con un sistema de control de aumento de temperatura que puede ser programado acorde a las exigencias del tratamiento a realizarse, de este modo es posible aumentar gradualmente la temperatura en un tiempo determinado como también la de sostener una temperatura dada el tiempo que se requiera.

Se ingresaron probetas de alambre brillante a los tres diferentes porcentajes de deformación 32 %, 66% y 91 %, un total de 5 muestras por porcentaje de deformación. Las probetas se ubicaron en el centro de la mufla con el objetivo de que el calentamiento sea el más homogéneo posible, el tratamiento se realizó a una velocidad de calentamiento de 14 °C/min, hasta una temperatura de recocido de 650°C, y tiempos de sostenimiento bajo dos condiciones de 30 y 60 minutos, y luego se dejan enfriar en el horno hasta temperatura ambiente.

La elección del tiempo de sostenimiento de 30 minutos se hizo consultando la bibliografía [6] y el de 60 minutos se eligió con el fin de evaluar la influencia de un tiempo de sostenimiento más prolongado en el comportamiento metalográfico.

En la tabla 16, se muestra las condiciones a las que se realizaron los tratamientos térmicos de recocido de recristalización

Tabla 16. Condiciones del tratamiento térmico para alambre brillante con porcentajes de deformación de 32, 66 y 91 %

Mufla	Condición 1	Condición 2
Temperatura Recocido de recristalización	650 °C	650 °C
Tiempo de sostenimiento	30 minutos	60 minutos
Medio y tiempo de enfriamiento	10 horas (Aire)	10 horas (Aire)
Tiempo de calentamiento	45 minutos	45 minutos

En la tabla 17, se muestra el número total de ensayos metalográficos y ensayos mecánicos que se realizarán en esta etapa:

Tabla 17. Número total de ensayos realizados en el seguimiento a nivel de laboratorio del tratamiento térmico.

Ensayos de laboratorio			
	Tratamiento térmico	Metalografía	Ensayo mecánico
Alambrón	0	1	3
Deformación 1	2	2	6
Deformación 2	2	2	6
Deformación 3	2	2	6
Total	2	7	21

5.5.1 Caracterización microestructural de alambre recocido en laboratorio

En las figuras 20 y 21, muestra las micrografías de las muestras con tres distintas condiciones de deformación inicial, recocidas a 650 °C con un tiempo de sostenimiento de 30 y 60 minutos respectivamente, se observa una microestructura con granos recristalizados ferríticos e islas perlíticas finas.

En la figura 20a y figura 21a, se observa que cierta fracción de grano deformado se mantiene, como se ha dicho con anterioridad, una deformación inicial baja, requiere de temperaturas de recristalización más altas y tiempos de recocido mayores para que ocurra recristalización completa, entonces, esto indica que la temperatura de recristalización para una deformación inicial del 33 % debe ser más alta, o que el tiempo de sostenimiento de tal temperatura debe ser más prolongado. También es importante destacar que hay presencia de cementita esférica o globular en estas muestras. Al menos dos tipos de cementita se pueden identificar, primero aquella que se encuentran en los límites de grano, siendo esta más ovalada y alargados y también aquella cementita globulares presente incluso dentro de la matriz ferrítica, esta cementita globular también se observa en las imágenes de las muestras trabajadas en planta, como ya se ha mencionado la cementita es una fase tan dura que cuando ocurre la recristalización del grano ferrítico la cementita no se disuelve en la nueva estructura si no que se agrupa y se orienta en direcciones preferenciales. [12]

El factor tiempo puede incidir en la coalescencia de la cementita globulizada, esto puede corroborarse realizando ensayos con tiempos de sostenimiento más prolongados, pero esto se sale del alcance del proyecto actual. Al realizar la comparación con los ensayos en planta se encuentra que una temperatura solo 20 °C por encima, pero a tiempos de sostenimiento entre 4 a 5 horas, estos carburos, aunque se presentan, no lo hacen en tal proporción.

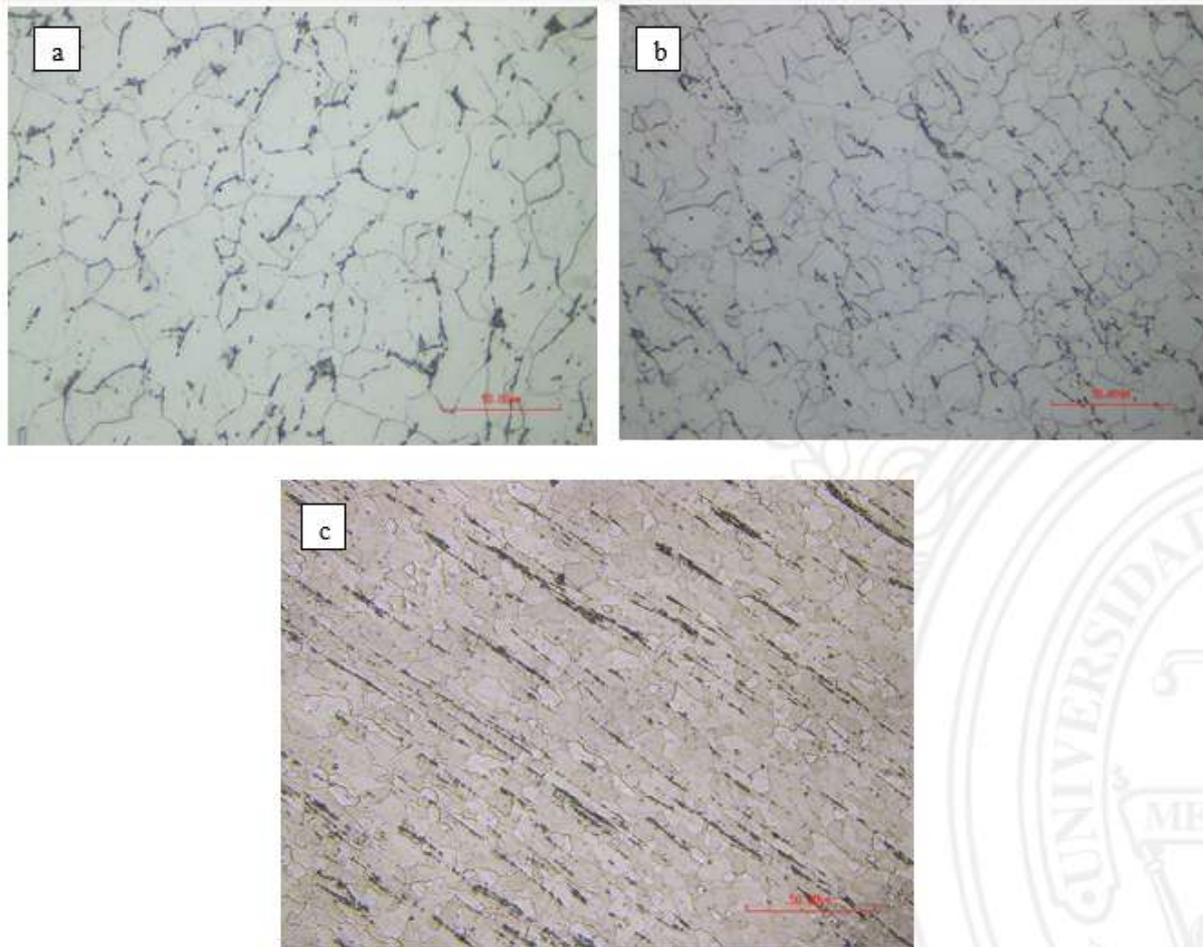


Figura 20. Micrografía acero AISI 1006 recocido de recristalización (Condición 1) para muestras con una deformación del a) 32, b) 66 y c) 91 %. Muestra atacada con Nital 1%

En la tabla 18 y 19 se reportan los tamaños A.S.T.M para las tres distintas deformaciones iniciales y a las dos condiciones de tiempo de sostenimiento en que fueron realizadas, como se observa el tamaño de grano A.S.T.M es el mismo para las dos condiciones, lo que indica que para este caso en particular un tiempo de sostenimiento de 60 minutos no impacta en la fracción de grano recristalizado. Se sugiere entonces realizar tratamientos con tiempos de sostenimiento más prolongados para que se obtenga una fracción recristalizada mayor.

Tabla 18. Tamaño de grano. Ensayo en laboratorio, temperatura de recocido de 650°C y tiempo de sostenimiento de 30 minutos.

Condición 1	Tamaño promedio (μm)	Tamaño ASTM
Alambre recocido 32%	18.24	8
Alambre recocido 66%	11.48	9 1/2
Alambre recocido 91%	6.21	11

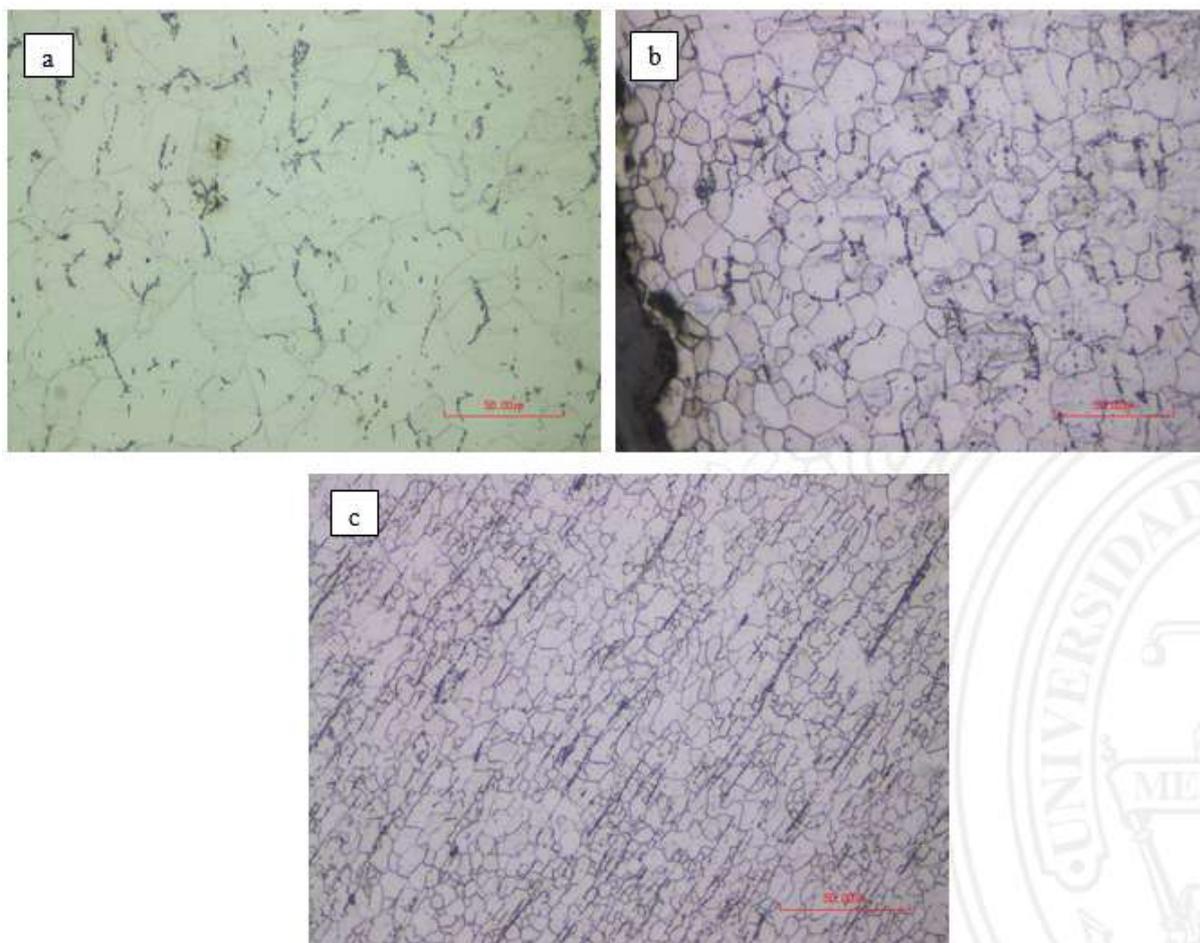


Figura 21. Micrografía acero AISI 1006 recocido de recristalización (Condición 2) para muestras con una deformación del a) 32, b) 66 y c) 91 %. Muestra atacada con Nital 1%

Ahora bien, si se compara el tamaño de grano A.S.T.M de los tratamientos térmicos de recocido realizados a escala de laboratorio con el material de partida se obtiene que los más semejantes son para aquellos alambres que sufrieron bajos porcentajes de deformación como lo son el 32 y 66 %. Para el caso concreto del alambre con una deformación inicial del 91 %, se obtiene un tamaño de grano demasiado fino, esto es de esperarse ya que como se ha mencionado antes el tamaño de grano inicial es decisivo en el tamaño de grano recristalizado. Entonces, a mayor porcentaje de deformación inicial, menor tamaño de grano recristalizado

Tabla 19. Tamaño de grano. Ensayo en laboratorio, temperatura de recocido de 650°C y tiempo de sostenimiento de 60 minutos.

Condición 2	Tamaño promedio	Tamaño ASTM
Alambre recocido 32%	19.34	8
Alambre recocido 66%	11.48	9 1/2
Alambre recocido 91%	7.72	11

5.5.2 Ensayo de tracción para el material recocido a escala de laboratorio para las tres distintas condiciones de deformación.

Se realizaron ensayos de tracción por triplicado a cada condición de deformación de las muestras de alambre recocido a escala de laboratorio, a 650 °C, con tiempos de sostenimiento de 30 y 60 minutos. Los ensayos de tracción se realizaron de acuerdo con el procedimiento que tienen normalizado en la empresa y que se describió anteriormente.

En la figura 22, se muestra el comportamiento mecánico de los alambres que fueron con un tratamiento de recocido en laboratorio, se observa un material que recupera sus propiedades de ductilidad, como se mencionó anteriormente para simplificar el análisis solo se mostrarán el comportamiento bajo la condición 1, ya que los valores de resistencia a la tracción y porcentajes de elongación y tracción son similares.

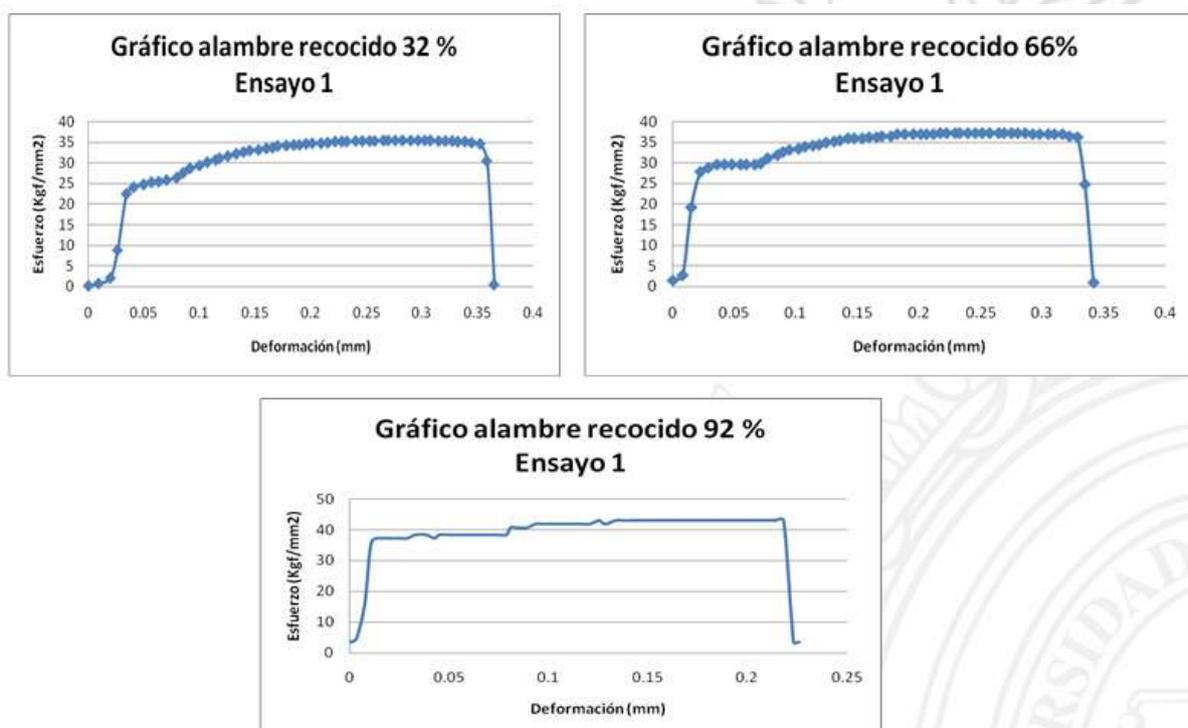


Figura 22. Comportamiento del Alambre recocido en laboratorio.

En la tabla 20, se observa que en general, se logran resultados satisfactorios y acorde a lo esperado en materiales que recuperaron sus propiedades por medio del recocido. Los tratamientos a escala de laboratorio dieron como resultado una resistencia a la tracción, para las distintas condiciones de tratamiento de recocido y trabajo en frío inicial acorde a lo especificado en las fichas internas de la empresa que maneja un rango de resistencia a la tracción máxima de 32 a 45 kgf/mm². Los resultados del porcentaje de elongación y estricción no pueden ser comparados con la ficha técnica, ya que actualmente estos datos no son tenidos en cuenta, pero es importante mencionar que estos resultados son proporcionales y están de acuerdo con un material que recupero propiedades de ductilidad.

Para los alambres con mayor deformación inicial como para el caso de 91 % se obtiene una resistencia a la tracción con un promedio de 6 kgf/mm² por encima del valor obtenido del material de partida, pero se sigue teniendo un buen comportamiento plástico lo que se corrobora con el porcentaje de elongación obtenido. El grano recristalizado depende del tamaño de grano inicial y como se obtuvo un tamaño de grano menor el valor de la resistencia máxima obtenido será entonces mayor.

Ahora bien, para los ensayos realizados en planta se obtiene un comportamiento plástico en todos los alambres muy parecido al material de partida y una resistencia de tracción en general entre 3 y 4 Kgf/mm² por debajo de la resistencia a la tracción de la materia prima, esto hace que el material sea más dúctil permitiendo un porcentaje de elongación y por consiguiente una reducción de área sobresaliente.

Tabla 20. Ensayos mecánicos para el material recocido a escala de laboratorio.

ACERO	Resistencia a la tracción (Kgf/mm ²)	%Elongación	%Estricción
Alambre recocido 32% (Condición 1)	35.49	32.31	63.89
Alambre recocido 66% (Condición 1)	37.20	34.10	58.14
Alambre recocido 92% (Condición 1)	44.68	25.13	39.31
Alambre recocido 32% (Condición 2)	35.19	32.57	62.18
Alambre recocido 66% (Condición 2)	36.86	33.59	59.83
Alambre recocido 92% (Condición 2)	45.07	26.67	39.63

Elaboración de ficha técnicas del tratamiento térmico: Se realizaron fichas técnicas con base en el análisis de los tratamientos térmicos aplicados en el laboratorio y el diagnóstico realizado en planta, para así establecer criterios que establezcan condiciones en las cuales se especifiquen los parámetros necesarios para realizar el tratamiento adecuadamente. El contenido de las fichas es el siguiente: material (Alambrón, alambre brillante, alambre recocido), porcentaje de deformación, condiciones de tratamiento térmico, imágenes metalográficas, tamaño de grano A.S.T.M, resistencia a la tracción, elongación, estricción y su respectivo análisis. Esta ficha técnica se reporta como un anexo al informe. Anexo 1. **ficha técnicas del tratamiento térmico de recocido de recristalización.**

6 CONCLUSIONES

- Se hizo un diagnóstico del proceso actual de tratamiento de recocido de recristalización, realizado en la empresa INDUSTRIAS METALICAS CORSAN entre los meses de junio de 2018 y enero de 2019 donde se logró establecer bajo qué condiciones se realizan los tratamientos y la influencia de variables como materia prima, porcentajes de deformación de alambre y posición del material en el horno, obteniendo como resultado una visión más profunda del tratamiento y de cómo se comporta el horno según la disposición de los rollos de alambre, lo que sugiere mejoras en la homogenización del flujo de calor en el horno y un control más específico de las temperaturas en las diferentes zonas del horno. Actualmente analizando los resultados obtenidos es posible concluir que el material que está ubicado en la parte inferior del horno obtiene una fracción de recristalización óptima.

El material que se encuentra en la zona superior del horno resulta con un tamaño de grano A.S.T.M demasiado grueso al esperado por lo que se sugiere un mejor control de flujo de temperatura, utilizando termocuplas en esta zona.

- En general los materiales ensayados en el horno 1, base 3 de la empresa INDUSTRIAS METALICAS CORSAN recuperaron sus propiedades iniciales, facilitando su posterior uso. Existen diferencias en el tamaño de grano, pero no representan una variación significativa en resistencia a la tracción cumpliendo las exigencias de los clientes por lo que el tratamiento es exitoso desde este punto de vista.
- Se realizaron tratamientos térmicos en laboratorio, con condiciones de temperatura controlada, se obtienen parámetros que sirven como mapa o guía para tener una idea de las propiedades mecánicas y estructura metalográfica que deben resultar de los tratamientos térmicos realizados en planta. Se demuestra la importancia de elegir temperaturas y tiempo de sostenimiento de recristalización, según el porcentaje de deformación inicial, para obtener materiales con propiedades óptimas y que cumplan las exigencias.
- Se realizan fichas técnicas anexadas al actual informe de práctica que contiene información sobre lo realizado en la misma, diagnóstico en planta, tratamiento de recocido a escala de laboratorio bajo ciertas condiciones, caracterización metalográfica y propiedades metálicas.
- Se recomienda continuar con el proceso de documentación de los tratamientos térmicos realizados a los alambres con el propósito que esta información siga alimentando la base de datos de la empresa y así establecer unas condiciones de trabajo que permitan el correcto desarrollo del tratamiento térmico evitando al máximo el reproceso y daño de las piezas.

7 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- [1] Valencia Giraldo Asdrúbal, Tecnología del tratamiento térmico de los metales, Universidad de Antioquia, Medellín 2009.
- [2] Bilmes D. Pablo, “Estructura y propiedades de las aleaciones, designación de aceros”, Facultad de ingeniería-UNLP, La Plata, 1997,
- [3] J. Flórez, “Secuencia de procesamiento de aceros inoxidables martensíticos” Universidad Autónoma de Nuevo León, 1996
- [4] Villavicencio Cabrera César Augusto, “Diseño y optimización del sistema de producción: proceso de fabricación de la varilla de acero de ANDEC S.A” Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2014.
- [5] Ayala Luis Mateus, “Manual de operaciones de trefilado de alambre de acero de aluminio” Escuela politécnica nacional, Quito, 2006.
- [6] “Guía de laboratorio mecánica de materiales”. Online. Available: http://udistrital.edu.co:8080/c/document_library/get_file?uuid=1404d4ad-0b86-4473-8ade-8292e80b0eac&groupId=19625

- [7] Artigas Alfred, Cornejo Katherine, Trefilación en aceros: algunos problemas, Universidad de Santiago de Chile, Chile 2009.
- [8] Betzalel Avitsur, “Limit Analysis of flow through conical converging dies”, University of Waterloo. 1975.
- [9] Z. Larouk, H Bouhalais, “Recrystallization behavior of a low carbon steel wire”, 2009.
- [10] Empresa AHMSA, Manual de diseño para la construcción con acero “Normas y características a las que están sujetas los aceros por Altos Hornos de México”. 2017.
- [11] Arlan O. Benschoter “ASM Handbook volumen 9, Carbon and alloy steels” 2004.
- [12] Hubertos Colpert “Metalografía dos productos siderurgicos comuns”, Brasil. 2008.
- [13] “Trefiladora con lubricación por inmersión,” 2012. Online. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Trefiladora#/media/File:Trefiladora_2.jpg
- [14] Gorka García Rodero, Alivio de tensiones residuales: Tratamiento térmico vs. Vibración, 2014.
- [15] “Mecanismos de endurecimiento de metales,” 2015. Online. Available: <http://blog.utp.edu.co/metalografia/8-otros-mecanismos-de-endurecimiento-de-metales/>
- [16] “Catálogos acerías paz del río,” 2010. Online. Available: http://www.dic.com.co/catalogos/pazdelrio/pazdelrio_ok.pdf
- [17] John D. Verhoeven “Fundamentos de metalurgia física”.México. 1987.
- [18] ASTM, “E3-11 Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens 1,” ASTM Copyright., vol. i, no. Reapproved, pp. 1–12, 2011.

