

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE QUERETARO

FACULTAD DE QUIMICA

**DETERMINACION DE PROPIEDADES EN
LAMINAS DE ACERO CON BAJO CONTENIDO
EN CARBONO SOMETIDAS AL PROCESO DE
RECOCIDO CONTINUO**

MARICELA TALAVERA ORTEGA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARA
OBTENER EL GRADO DE:**

QUIMICO METALURGICO

SEPTIEMBRE DE 1993

FACULTAD DE
QUIMICA



BIBLOTECA

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico con todo mi afecto y agradecimiento:

A mis Padres:

ARTEMIO TALAVERA GONZALEZ
GUADALUPE ORTEGA DE TALAVERA

A mis Hermanos:

JAVIER, AZUCENA, ARTEMIO, IGNACIO, DALIA, BERENICE

A mis Amigos:

FRANCISCO, ALEJANDRA, GABRIELA

Quienes siempre me brindaron su apoyo y comprensión
para alcanzar este grado.

A G R A D E C I M I E N T O

Deseo agradecer a mi asesor Ing. Luis Orlando Arcos y Rábago por el apoyo y guía durante la elaboración de este trabajo. A las autoridades y maestros de la FACULTAD DE QUIMICA de la UAQ por las facilidades prestadas durante la realización de mis estudios y trabajo de Tesis. A CIDESI en Queretaro por la ayuda otorgada para el uso del equipo de microscopía y fotografía necesario para llevar a cabo dicho proyecto, agradezco también al Laboratorio de Pruebas y Ensayos de la C.F.E. Unidad Irapuato por proporcionarme material y equipo para la preparación de muestras indispensables en tal investigación.

Por último agradezco a CINVESTAV Unidad Saltillo por todas las facilidades otorgadas durante los estudios de maestría para realizar todos los tramites necesarios en la presentación de este trabajo.

RESUMEN

Uno de los principales problemas que existen en la industria del acero, en las prácticas de recocido continuo y específicamente en la manufactura de los productos laminados y reducidos en frío, es la falta de técnicas de proceso que permitan obtener un producto con propiedades mecánicas idénticas a las de un material que ha sido tratado térmicamente por el proceso de recocido por lotes.

Específicamente el proceso de recocido continuo debe de ser aquel que nos proporcione un material con excelentes propiedades mecánicas para subsecuentes operaciones de formado. El material de esta forma debe de tener una excelente formabilidad, tal como la que es requerida en la industria automotriz.

Más sin embargo, el proceso de recocido continuo involucra rangos de calentamiento extremadamente altos, causando que el acero recristalice a un tamaño de grano muy fino, que sea muy rígido y que tenga una dureza mayor que el material que es recocido por lotes.

Es característico en este proceso el rango de enfriamiento rápido, lo cual ocasiona que suficiente carbón permanezca en solución sólida y que el producto tenga un alto grado de susceptibilidad al envejecimiento, resultando de esta forma que el material no tenga buenas propiedades mecánicas y que el proceso de recocido continuo sea limitado a la producción de material específico.

Existen varios obstáculos para la aplicación exitosa del proceso de recocido continuo para la producción de láminas de acero con bajo contenido en carbono y con calidad de estampado profundo. Estos obstáculos son:

- a). El problema de controlar la composición química y el grado de reducción en frío del material.
- b). El problema de obtener un tamaño de grano suficientemente grande, y
- c). El problema de la precipitación de bastante carbón desde la solución sólida en ferrita para eliminar o reducir por lo menos los efectos del envejecimiento.

Por lo antes mencionado cabe señalar que estos fueron algunos de los factores que motivaron la realización del presente trabajo; y en los siguientes capítulos se describe toda la secuencia a seguir para llegar a obtener conclusiones satisfactorias.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTO
RESUMEN
CONTENIDO
LISTA DE FIGURAS
LISTA DE TABLAS

CAPITULO I

1.0 Introducción.

CAPITULO II

2.0 Revisión Bibliográfica.
2.1 Tratamientos Térmicos de Aceros Laminados.
2.1.1 Proceso de Recocido por Lotes.
2.1.1.1 A) Recocido de rollo cerrado.
 - Efectos que produce el Recocido sobre la
 Microestructura.
 - Dificultades del Proceso.
2.1.1.2 B) Recocido de Rollo Abierto.
2.1.2 Proceso de Recocido Continuo.
2.1.2.1 A) Recocido Continuo.
 - Desarrollo Histórico.
 - Procedimiento.
 - Descripción de la Línea.

- 2.2 Propiedades del Acero Recocido.
- 2.3 Aplicaciones del Proceso de Recocido.
- 2.4 Producción de Láminas para Estampado Profundo por Recocido Continuo.
 - 2.4.1 Deformación Plástica.
 - 2.4.2 Propiedades y Criterios de Selección para Formabilidad en Láminas de Acero con Bajo Carbono.
 - 2.4.3 Factores que afectan la Formabilidad.
- 2.5 Aspectos Metalúrgicos del Recocido Continuo.
 - 2.5.1 Recristalización y Crecimiento de Grano.
 - Primer Método.
 - Segundo Método.
 - 2.5.2 Formación y Transformación de Austenita.
 - 2.5.3 Envejecimiento.
 - 2.5.3.1 Endurecimiento por Envejecimiento.
 - 2.5.3.2 Deformación por Envejecimiento.
 - 2.5.3.3 Como se Alteran las Propiedades Mecánicas con el Envejecimiento.
- 2.6 Procesos de Recocido Continuo en el Mundo.
 - 2.6.1 Proceso BISRA.
 - 2.6.2 Proceso CAPL.
 - 2.6.3 Proceso NKK.
- 2.7 Resumen y Conclusiones.

CAPITULO III

- 3.0 Introducción.
- 3.1 Características y/o Propiedades del Material.
- 3.2 Preparación de Muestras.
- 3.2.1 Recristalización I.
- 3.3. Procedimiento Experimental.
- 3.3.1 Recristalización I.
- 3.3.2 Deformación Intermedia.
- 3.3.2.1 Recristalización II.
- 3.4 Ensayos Realizados.
- 3.4.1 Ensayos de Dureza.
- 3.4.2 Ensayos de Tensión.
- 3.4.3 Metalografías.
- 3.4.4 Metalografía Cuantitativa.
- 3.5 Deformación Intermedia por Laminado.

CAPITULO IV

- 4.0 Resultados Experimentales.
- 4.1 Introducción.
- 4.2 Recristalización I.
- 4.3 Deformación Intermedia.
- Recristalización II.
- 4.3.1 Resistencia a la Fluencia.
- 4.3.2 Deformación Crítica.
- 4.3.3 Resistencia a la Tensión.
- 4.3.4 Elongación Uniforme.
- 4.3.5 Relación Límite de Fluencia-Resistencia a la Tensión.

- 4.4 Variación del Tamaño de Grano.
- 4.5 Metalografías.
- 4.5.1 Microestructuras.

CAPITULO V

- 5.0 Discusión.
 - 5.1 Discusión de Resultados.
 - 5.1.1 Recristalización I.
 - 5.1.2 Deformación Intermedia.
 - 5.1.2.1 Recristalización II.
 - 5.1.2.1 Variación del Tamaño de Grano.
 - 5.2 Evaluación de Resultados.
- NOTA.

CAPITULO VI

- 6.0 Conclusiones.

CAPITULO VII

- 7.0 Sugerencias para Trabajos Posteriores.

APENDICE A.

APENDICE B.

VOCABULARIO.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

LISTA DE FIGURAS

| FIGURA | | PAGINA |
|--------|--|--------|
| 2.1 | Ciclo Térmico de Recocido por Lotes. | 6 |
| 2.2 | Variación de Temperaturas de los Rollos y - del Horno. | 9 |
| 2.3 | Ciclo de Recocido para Láminas Reducidas - en Frío por la Técnica de Rollo Abierto. | 11 |
| 2.4 | Ciclo de Recocido Continuo esquematizado - por Mohri. | 15 |
| 2.5 | Diagrama Esquemático de una Línea de - Recocido Continuo, designada para operar - a una velocidad de 457 m/min. | 19 |
| 2.6 | Ciclo Térmico de Recocido Continuo. | 21 |
| 2.7 | Ciclo de Recocido Continuo para Placas - Estañadas. | 22 |
| 2.8 | Relación existente entre el porcentaje - de Trabajado en Frío, la Resistencia a la - Tensión y la Resistencia a la Fluencia. | 28 |
| 2.9 | Efectos del Calentamiento sobre el Tamaño - de Grano Recocido en un Acero Desoxidado. | 37 |
| 2.10 | Efectos del Tamaño de Grano sobre: - a).La Elongación del Punto de Fluencia. | 39 |
| | b).El Porcentaje de Laminación Superficial. | 39 |
| 2.11 | Efecto de la cantidad de Reducción Previa - sobre el Tamaño de Grano Recristalizado. | 41 |
| 2.12 | Solubilidad del Carbono y Nitrógeno en - Hierro Alfa. | 44 |
| 2.13 | Solubilidad de Carbono en Ferrita a la - Temperatura de Recristalización. | 45 |

| | | | |
|------|---|---|-----|
| 2.14 | Propiedades obtenidas envejeciendo el Acero por un tiempo de 2-5 minutos, a la Temperatura de 389°C. | - | 48 |
| 2.15 | Acero con 0.03% C envejecido a 60°C. | - | 52 |
| 2.16 | Proceso BISRA. Arreglo esquemático de la Primera Planta Piloto Compacta de Recocido. | - | 54 |
| 2.17 | Proceso BISRA. Arreglo esquemático de la Segunda Planta Piloto Compacta de Recocido. | - | 55 |
| 2.18 | Arreglo esquemático de la Línea de Proceso-CAPL. | - | 58 |
| 2.19 | Ciclo Térmico de la Línea CAPL. | - | 60 |
| 2.20 | Ciclo Térmico de la Línea de Recocido Continuo NKK. | - | 64 |
| 3.1 | Espécimen Rectangular Estándar para ensayos de Tensión. | - | 78 |
| 3.2 | Patrón de Prueba para medición de Tamaño de Grano. | - | 86 |
| 4.1 | Efecto de la Temperatura de Recocido sobre la Dureza Superficial de Láminas de Acero con Bajo Carbono Deformadas Plásticamente en Frío entre 60-70%. | - | 91 |
| 4.2 | Efecto en la Temperatura y el Tiempo de Recocido sobre la Dureza Superficial del Material Deformado Plásticamente en Frío. Dureza del Material en Condiciones Iniciales: 78 R 30-T. | - | 92 |
| 4.3 | Efecto del Tratamiento Isotérmico sobre la Dureza en el Material de Inicio. | - | 94 |
| 4.4 | Efecto del Porcentaje de Deformación, así como el Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano Recristalizado Final. | - | 104 |
| 4.5 | Efecto del Porcentaje de Deformación, así como el Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano Recristalizado Final. | - | 105 |
| 4.6 | Efecto del Porcentaje de Deformación, así como el Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano Recristalizado Final. | - | 106 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.7 | Efecto del Porcentaje de Deformación, así - como el Tamaño de Grano Inicial sobre el - Tamaño de Grano Recristalizado Final. | 107 |
| 4.8 | Efecto del Porcentaje de Deformación, así - como el Tamaño de Grano Inicial sobre el - Tamaño de Grano Recristalizado Final. | 108 |
| 4.9 | Tamaño de Grano I. Tratamiento de Recristalización I. Amplificación 100X. | 109 |
| 4.10 | Tamaño de Grano II. Tratamiento de Recristalización I. Amplificación 100X. | 110 |
| 4.11 | Efecto de la Cantidad de Deformación Inter- media, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 111 |
| 4.12 | Efecto de la Cantidad de Deformación Inter- media, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 112 |
| 4.13 | Efecto de la Cantidad de Deformación Inter- media, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 113 |
| 4.14 | Efecto de la Cantidad de Deformación Inter- media, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 114 |
| 4.15 | Efecto de la Cantidad de Deformación Inter- media, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 115 |
| 4.16 | Efecto de la Cantidad de Deformación Inter- media, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 116 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.17 | Efecto de la Cantidad de Deformación Intermedia, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 117 |
| 4.18 | Efecto de la Cantidad de Deformación Intermedia, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 118 |
| 4.19 | Efecto de la Cantidad de Deformación Intermedia, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 119 |
| 4.20 | Efecto de la Cantidad de Deformación Intermedia, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 120 |
| 4.21 | Efecto de la Cantidad de Deformación Intermedia, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 121 |
| 4.22 | Efecto de la Cantidad de Deformación Intermedia, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 122 |
| 4.23 | Efecto de la Cantidad de Deformación Intermedia, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 124 |
| 4.24 | Efecto de la Cantidad de Deformación Intermedia, Temperatura de Recocido y del Tamaño de Grano Inicial sobre el Tamaño de Grano - Recristalizado Final. | 125 |
| 4.25 | Efecto de la Temperatura de Recocido sobre el Tamaño de Grano en un Material que ha sido tratado térmicamente con el Proceso - de Recocido por Lotes. | 126 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.26 | Efecto de la Temperatura de Recocido sobre el Tamaño de Grano en un Material que ha sido tratado térmicamente con el Proceso de Recocido por Lotes. | 127 |
| 4.27 | Efecto de la Temperatura de Recocido sobre el Tamaño de Grano en un Material que ha sido tratado térmicamente con el Proceso de Recocido por Lotes. | 128 |
| 5.1 | Diagrama Esquemático del Ciclo Propuesto. Recristalización-Deformación-Recristalización. | 141 |

LISTA DE TABLAS.

| TABLA | | PAGINA |
|-------|---|--------|
| I | Propiedades Mecánicas de Acero Recocido - con contenido bajo en Carbono. | 24 |
| II | Propiedades Mecánicas Típicas en Láminas de Acero con Bajo Carbono y Trabajadas en Frío para el Conformado. | 32 |
| III | Especificaciones Principales de Recocido - Continuo y Línea de Proceso CAPL. | 57 |
| IV | Especificaciones de la Línea de Proceso NKK. | 63 |
| V | Comparación de las Propiedades Mecánicas - de los Procesos de Recocido por Lotes, - Recocido Continuo, Proceso CAPL y Proceso - NKK. | 66 |
| VI | Características de los Procesos de Recocido por Lotes y Recocido Continuo. | 71 |
| VII | Composición Química del Material destinado para la Investigación. | 76 |
| VIII | Propiedades Mecánicas de Láminas de Acero - con Bajo Carbono y Deformadas en Frío entre 60-70%. (Material de Inicio). | 129 |
| IX | Propiedades Mecánicas de Láminas de Acero - con Bajo Carbono sometidas al Proceso de - Recocido Continuo. | 130 |
| X | Propiedades Mecánicas de Material sometido a Recocido Continuo por los Procesos CAPL - y NKK. | 131 |
| XI | Propiedades Mecánicas de Material Recocido por Lotes en la Planta Altos Hornos de - México, S.A. de C.V. (Recocido Comercial). | 132 |

| | | |
|-----|--|-----|
| XII | Comparación de las Propiedades Mecánicas - de Material Recocido por diferentes Métodos. | 143 |
|-----|--|-----|

CAPITULO I

1.0 INTRODUCCION

En la actualidad, para la industria del acero, la importancia de las prácticas de recocido, en la manufactura de los productos laminados y reducidos en frío, no ha sido enfatizada. Aunque cuando se usa en láminas con estado de reducción en frío, se pueden aplicar algunos tratamientos térmicos, claro por supuesto como una operación separada, con el fin de restaurar la ductilidad perdida con el trabajado en frío y antes de un procesamiento final.

Los tratamientos térmicos principales que se pueden aplicar a productos laminados y trabajados en frío (láminas, tiras, placas estañadas, etc.) se han dividido dentro de dos operaciones, tales como:

1. Operaciones por Lotes, que incluyen al recocido de rollo cerrado, recocido de rollo abierto, y
2. Operaciones Continuas, que incluyen al recocido continuo, recocido para alivio de tensiones y normalizado.

Por lo que se refiere al recocido por lotes, diremos que en este proceso, el acero es calentado lentamente hasta que alcanza una temperatura inferior a la línea crítica A_1 de transformación (720°C), es mantenido a esa temperatura durante varias horas y después se enfría lentamente, a una temperatura apropiada. El ciclo de temperatura completo,

lleva varios días, pero da como resultado un producto final más suave, que facilita el trabajado en frío, un producto en donde obtenemos la microestructura y las propiedades mecánicas deseadas.

Lo que se pretende con el recocido es que la estructura distorsionada por el trabajado en frío, retorne a un estado que se halle libre de tensiones por medio de la aplicación del calor.

El recocido por lotes es el principal tratamiento térmico aplicado al acero trabajado en frío, desde que la más grande porción de acero con bajo contenido en carbono es designada para varias operaciones de fabricación. Como por ejemplo en la manufactura de carrocerías para automóviles, aplicaciones en el hogar, etc.

Por otro lado, en tratamientos térmicos continuos, el acero es calentado rápidamente a la temperatura de recocido, mantenido por un tiempo corto, típicamente son minutos, y después enfriado rápidamente. Como una consecuencia, el acero final tiene grano muy fino y por lo tanto es más duro que el producido en el recocido por lotes; esta microestructura de grano fino es aceptada y aún más deseable en algunas aplicaciones, por ejemplo, las compañías manufactureras desean placas estañadas más duras.

El recocido continuo puede ser atractivamente económico, si es combinado con una o más operaciones adicionales, por ejemplo, el galvanizado continuo, en donde la combinación del recocido y el baño caliente con zinc, produce ahorros considerables, como la eliminación del laminado superficial, el corte, etc., que comúnmente son operaciones separadas.

La aplicación del recocido en láminas de acero, es en su mayoría para la producción de partes conformadas, esencialmente en la industria automotriz.

Los principales obstáculos para la aplicación exitosa del recocido continuo con la calidad de acero para estampado, son del tipo metalúrgico y es el resultado directo de la velocidad en los procesos de recocido continuo.

El alto calentamiento y el tiempo corto a que es sometido el material a la temperatura de recocido, ocasionan que el acero recristalice casi instantáneamente, que el grano no crezca, y que ocurra la precipitación de carbono en equilibrio mantenido en solución sólida en la ferrita.

Por todas estas razones, el acero recocido continuamente tiene un límite de fluencia tan alto y una ductilidad tan baja que es inadecuado para operaciones de conformado y puede ser susceptible al endurecimiento y deformación por envejecimiento, lo cual es perjudicial para el éxito de la formabilidad.

No obstante, y a pesar de todas las desventajas que presenta el proceso de recocido continuo, este puede ser económicamente atractivo, ya que se reduce considerablemente el tiempo de calentamiento, ocasionando por tanto un ahorro significativo de energía.

Por esta razón y otras existentes, este proceso merece ser estudiado con detalle, por lo que en las siguientes secciones se examinarán las causas y efectos de las operaciones de recocido continuo.

CAPITULO II.

- 2.0 REVISION BIBLIOGRAFICA
- 2.1 Tratamientos Térmicos de Aceros Laminados

Las láminas y placas usadas en estado de reducción en frío, tienen desventajas, ya que durante este proceso, desarrollan grandes esfuerzos internos, por lo que es conveniente aplicarles un tratamiento térmico pero como una operación separada, con el fin de restaurar la ductilidad perdida con la reducción en frío.

A continuación se describen los dos procesos de recocido que se le puede dar al acero con bajo contenido en carbono y que ha sido previamente deformado en frío. Los procesos son:

- A) Proceso de Recocido por Lotes.
- B) Proceso de Recocido Continuo.

- 2.1.1 Proceso de Recocido por Lotes
- 2.1.1.1 A) Recocido de Rollo Cerrado

En el recocido de rollo cerrado, una gran masa estacionaria de acero es llevada a un largo ciclo de tratamiento térmico. Para iniciar una operación de recocido, con equipo y horno adecuados, se cortan las láminas y se cargan sobre una base en pilas de aproximadamente 1m (3 ft) a 1.50m (5 ft) de altura y se enrollan sobre la base en montones de 2.50m (8ft) a 3.50m (12ft) de altura.

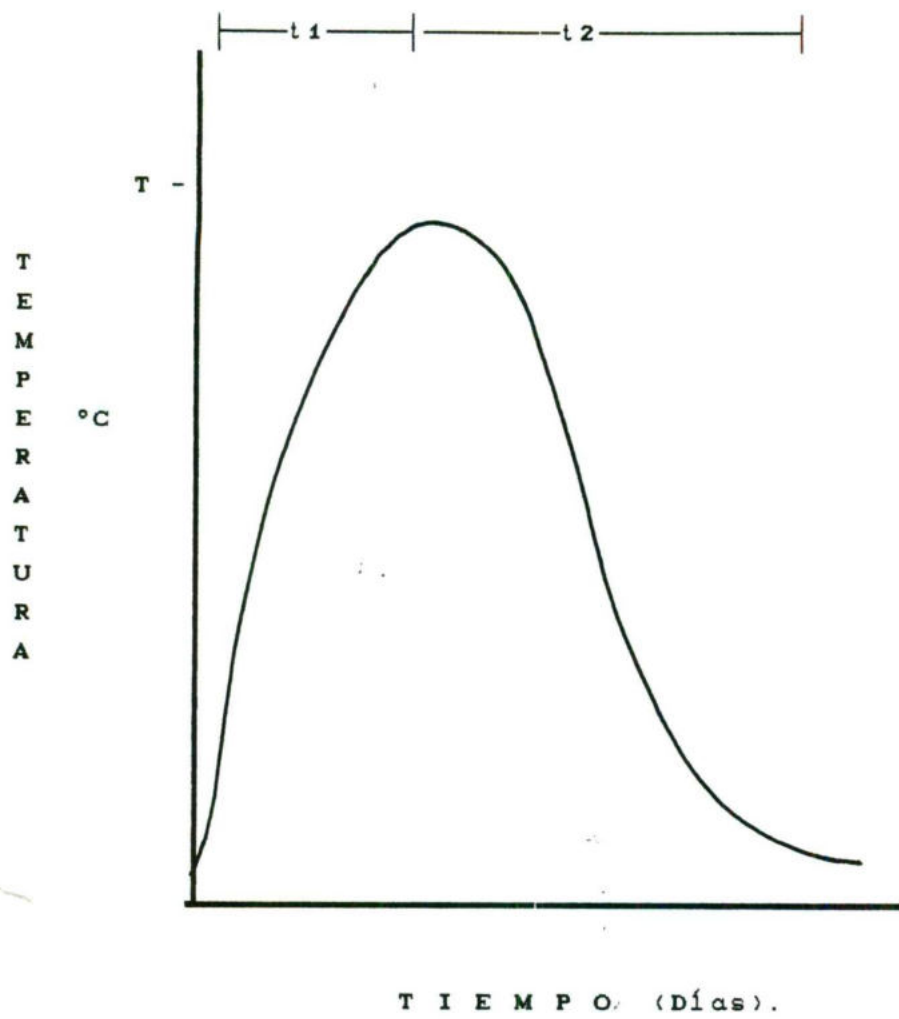
Posteriormente se insertan termopares en posiciones estándar en la carga. Una cubierta interior rectangular se baja sobre la carga o sobre cada montón de rollos y entonces el horno es bajado sobre la base, conectandose la línea de combustible y los termopares. Empieza el flujo de gas desoxidante para purgar el aire debajo de la cubierta interior y los quemadores son encendidos. < 1-5 >

Durante el período de calentamiento, el flujo de gas para que se realice la combustión es mantenido a un ritmo constante hasta que alcanza la temperatura específica y que es determinada por los termopares.

Los termopares son colocados en diferentes posiciones de la carga, uno es colocado en el horno, en donde se calienta más rápido la carga, para evitar que la temperatura sea máxima y exista un sobrecalentamiento, otro es colocado en, o cerca del corte sobresaliente del rollo superior y otro cerca del corte inferior del rollo principal, de esta forma se da una clara indicación de la temperatura

Finalmente el período de permanencia empieza cuando los termopares han indicado la temperatura especificada, al final de este período se corta el combustible, el horno se levanta para empezar un ciclo sobre otra base y la carga es enfriada (todavía en una atmósfera protectora debajo de la cubierta interior) hasta aproximadamente 170°C (300°F). A esta temperatura la carga ya puede ser expuesta al aire sin peligro de que se oxide. El período de enfriamiento lleva por lo menos, tanto tiempo como el tiempo total empleado en el calentamiento y la permanencia.

La figura 2.1 muestra el ciclo típico de calentamiento y enfriamiento.



Donde:

- T = Temperatura de Calentamiento (680°C).
- t_1 = Tiempo de Calentamiento (2 días).
- t_2 = Tiempo de Enfriamiento (4 días).

FIGURA 2.1 Ciclo Térmico de Recocido por Lotes. <1>

El recocido por lotes involucra calentamientos y enfriamientos de grandes masas de acero y los tiempos son tan largos como son necesarios. Los tiempos promedio del proceso varían de 6 a 10 días. El recocido por lotes es el principal tratamiento térmico aplicado al acero deformado en frío.

Efectos que Produce el Recocido sobre la Microestructura

Con la deformación en frío se presentan granos alargados, grandes distorsiones en la red cristalina y se inducen pesados esfuerzos internos, resultando un producto muy duro y con poca ductilidad.

Sin embargo el acero con tan alto grado de deformación plástica es capaz de regresar a la microestructura de equilibrio por recristalización durante el tratamiento térmico. Tal recristalización es permitida, manteniendo el acero a la temperatura adecuada de recristalización y por tiempo suficiente, resultando una microestructura de granos de ferrita equiaxial definidos con redes no distorsionadas, por lo que el acero será suave y dúctil.

Si se aplica suficiente tiempo a la temperatura de recocido, en un acero que tiene un porcentaje de reducción en frío alto, la recristalización se dará a una temperatura menor y la recristalización se completará más rápidamente, dando una estructura de grano más fino que el que se obtendría si el acero tuviera un porcentaje de reducción menor. Esto se debe a que el material laminado tiene una mayor cantidad de deformación antes del recocido y por tanto más centros de nucleación y más altos esfuerzos localizados para inducir el reacomodo cristalino. < 1 >

Dificultades del Proceso

Un problema encontrado en el recocido de rollo cerrado, se debe a que como las láminas de acero son enrolladas y los rollos cerrados herméticamente, la temperatura del exterior del rollo no es la misma que la del interior, existiendo de esta forma una diferencia de temperaturas, ocasionando que el tamaño de grano recristalizado sea diferente y por consecuencia también las propiedades mecánicas. < 5 >

Este mismo problema existe al apilar los rollos que se colocan en la base de recocido, ya que el rollo que se encuentra en la parte superior del montón difiere en temperatura al que se encuentra en la parte inferior, provocando nuevamente una variación en las propiedades mecánicas a través de la carga.

La figura 2.2 muestra la diferencia en temperaturas tanto de los rollos de láminas como del horno.

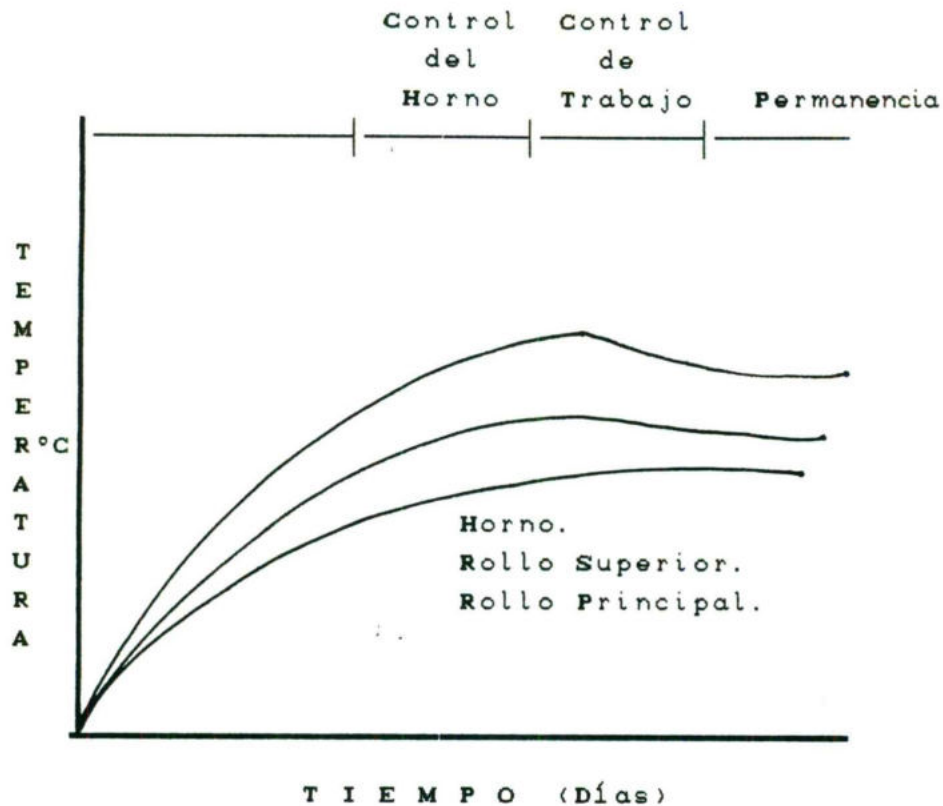


FIGURA 2.2 Variación de Temperaturas tanto de los rollos como del Horno. <5>

2.1.1.2 B) Recocido de Rollo Abierto

En este proceso el rollo hermético es primeramente desenrollado, dejando un espacio adecuado entre cada capa del rollo para permitir la circulación de la atmósfera del horno entre capas individuales, dando así uniformidad de calentamiento. Después del recocido el rollo es reenrollado herméticamente para procesos adicionales o de embarque. < 6 >

El recocido de rollo abierto minimiza las dificultades inherentes al proceso, considerando la uniformidad y el calentamiento rápido.

Esta técnica, al igual que el recocido por lotes, puede emplear atmósferas protectoras para evitar la oxidación superficial, descarburización o carburización de la carga.

Para determinados propósitos el recocido de rollo abierto puede también ser usado deliberadamente para obtener efectos superficiales deseables, de una manera controlable. Obviamente, la relación temperatura-tiempo, así como el control de la atmósfera, son factores determinantes para obtener los resultados deseados en aplicaciones especiales de la técnica de rollo abierto. < σ >

Los tiempos promedio de este proceso varían típicamente de 1 a 2 días, representando un ahorro significativo sobre el recocido de rollo cerrado, aunque este proceso todavía representa un considerable obstáculo para la productividad.

La ventaja principal del proceso de rollo abierto es que los gases calientes pueden circular fácilmente, a través del espacio existente entre las capas del rollo, ocasionando una transferencia del calor mejor y reduciendo los tiempos de recocido. Otra ventaja es la facilidad para utilizar atmósferas de recocido deseables.

Una desventaja del proceso es que se incrementa sensiblemente la dureza, debido a que el rango de enfriamiento es más rápido. También se incrementan los costos de operación cuando un rollo sufre una ruptura o

fractura durante el reenrollado, además de que la capacidad del horno se reduce debido al gran volumen del rollo abierto.
 < 7-9 >

La figura 2.3 muestra el ciclo de temperatura típico en donde se observa la diferencia de temperaturas entre los rollos de la misma carga, en una operación de recocido de rollo abierto, aunque ésta no es tan marcada como la observada en el recocido de rollo cerrado convencional.

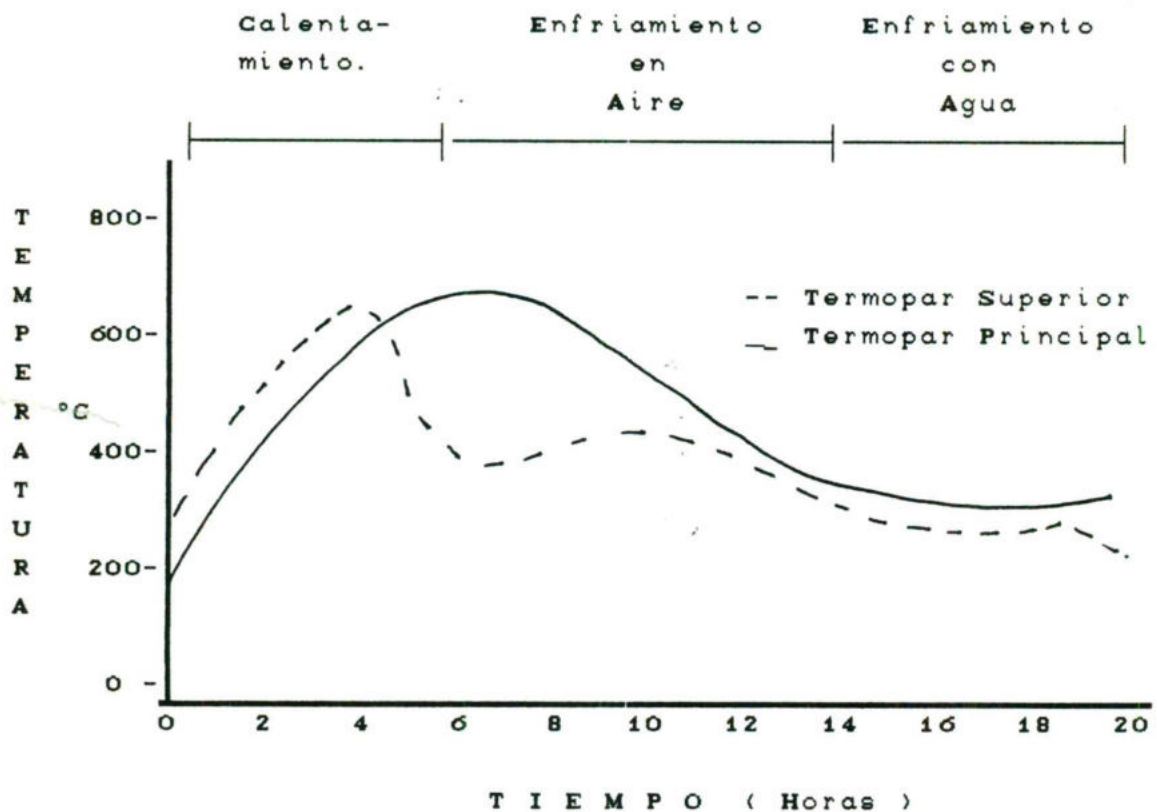


FIGURA 2.3 Ciclo de Recocido para Láminas Reducidas en Frío por la técnica de Rollo Abierto. < 9 >

2.1.2 Proceso de Recocido Continuo.

2.1.2.1 A) Recocido Continuo. Desarrollo Histórico.

Comúnmente el recocido continuo (rápido) es usado para aceros con un contenido bajo en carbono principalmente en la industria de las placas estañadas y en la producción de láminas con baño caliente de zinc (galvanizado).

Los ciclos de tratamiento térmico empleados en esos productos son discutidos principalmente desde el punto de vista de los significados metalúrgicos. La aplicación del recocido continuo es para láminas de acero con contenido bajo en carbono y principalmente para la aplicación de estampado profundo.

El recocido continuo fue primeramente usado en la producción de placas estañadas, hace algunos 55 años. La primera producción en horno de recocido continuo para placas estañadas fue instalada por la Crown Cork Company en Baltimore, U.S.A., en 1936. Esta unidad fue de dos columnas verticales con calentamiento eléctrico, operando aproximadamente a 23 m/min. (75ft/min). A esta velocidad la línea no fue comercial pero más tarde, la misma compañía creó dos líneas más con una velocidad máxima superior a 91 m/min. (300ft/min) y mucho más económica.

El producto de esas líneas fue considerado con una mayor dureza y más rígido que el equivalente material recocido por lotes, pero a pesar de esto el producto no fue aceptado por el mercado. < 10 >

No hubo desarrollos adicionales sino hasta 1940, cuando una línea trabajando a una velocidad de 30m/min (100 ft/min), y con un calentamiento eléctrico, fue instalada en Canadá por Dominion Foundries & Steel Company. El producto de esta línea aunque fue exitoso no tuvo gran impacto en el mercado.

Sin embargo, a principios de 1950, el alto grado de uniformidad en las propiedades mecánicas en el recocido continuo tuvo un efecto benéfico en el mercado, de aquí que el equipo de conformado automático ha sido ajustado para láminas más duras.

Varias ventajas fueron observadas por los fabricantes y productores de acero: Los procesos de estiramiento que le daban a las láminas evitaba que se doblaran y pandearan en el acabado y permitían producir mejor calidad de acero para rollos más largos, teniendo consecuencias benéficas sobre los rendimientos.

Por esta razón los rendimientos se incrementaron de 25% a 50%. Con estas ventajas el desarrollo del proceso de recocido continuo ha recibido gran impulso. < 11 >

Así que, mientras que las unidades originales fueron capaces de tener rendimientos de cerca de 9 ton/h., una línea recientemente instalada por Bethlehem Steel Company, tuvo rendimientos de 60 ton/h. Esta línea, la cual emplea el ciclo de recocido continuo convencional, fue capaz de manejarse a una velocidad de 610 m/min (2000ft/min).

Procedimiento:

Desde el punto de vista metalúrgico se consideró al ciclo de recocido continuo en dos partes:

- a). Calentamiento y Permanencia,
- b). Enfriamiento.

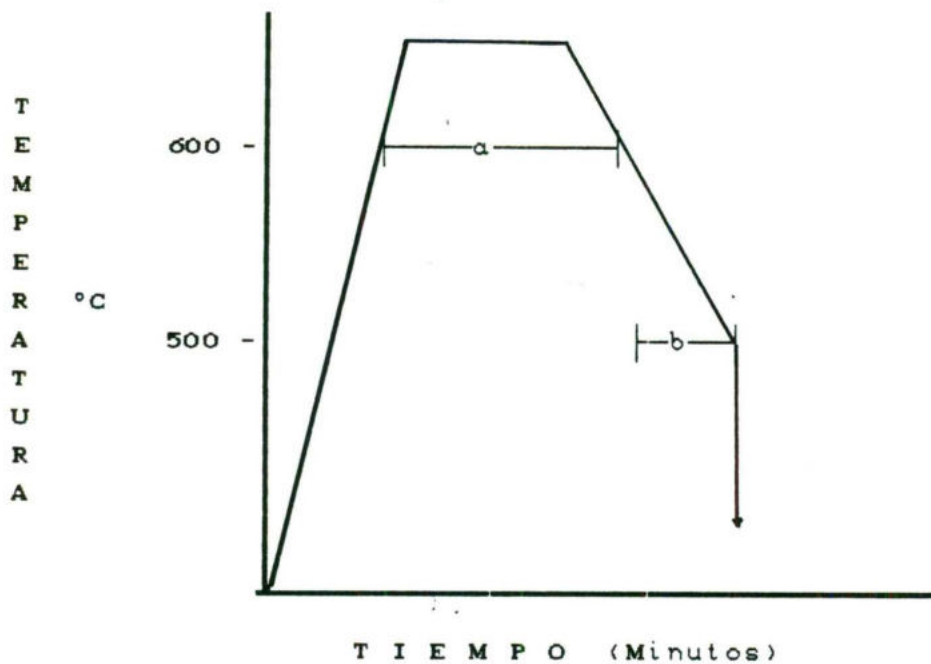
a). Calentamiento y Permanencia:

La principal función del calentamiento en el ciclo de recocido es para elevar al acero a su temperatura de recristalización seguido por un tiempo de permanencia adecuado para completar la recristalización. Esta temperatura depende del rango de calentamiento empleado, composición química e historia del proceso que tuvo el material antes del recocido.

Normalmente para placas estañadas se tienen aceros con 0.05% - 0.1% C y entre 80% - 90% deformados plásticamente en frío.

Los trabajos de Mohri < 12 > indican temperaturas de recristalización de 595°C, con rangos de calentamiento de 20 a 100°C/s. Otros trabajos afirman que la temperatura de recristalización oscila entre 550°C y 575°C. < 13 >

Después de que la temperatura de recristalización ha sido alcanzada, Mohri afirma que es necesario tener un tiempo efectivo de permanencia de cerca de 25 segundos, para obtener una estructura recristalizada completamente. "El tiempo efectivo de permanencia esta definido como el tiempo total arriba de la temperatura de recristalización". Esto se muestra en la figura 2.4.



Donde:

- a : Tiempo Efectivo de Permanencia.
- b : Tiempo de Enfriamiento.

FIGURA 2.4 Ciclo de Recocido Continuo esquematizado por Mohri.

Los rangos de calentamiento normalmente utilizados en los hornos de recocido continuo para placas estañadas son de 40°C/s. Trabajos de Mohri indican que con un período de calentamiento y enfriamiento de cerca de 40 segundos, se puede obtener una estructura completamente recristalizada.

Pero sin embargo, estudios de laboratorio de Garber confirmaron que con rangos de calentamiento de 12°C/s y temperaturas de recocido de 700°C , la recristalización ocurría casi instantáneamente y por lo tanto, un período de permanencia provocaría influencias negativas en el tamaño de grano y la dureza. < 13 >

b). Enfriamiento:

Enfriamientos lentos son empleados desde la temperatura de recocido para asegurar que los efectos del endurecimiento por envejecimiento en el producto recocido, sean mantenidos a un bajo nivel de aceptabilidad.

El carbono es en la práctica, el elemento principalmente responsable para que un acero endurezca por envejecimiento, y si el rango de enfriamiento es alto, disminuye la solubilidad de carbono en la ferrita conforme disminuye la temperatura, resultando una sobresaturación y precipitando a bajas temperaturas, produciendo un aumento significativo en la dureza.

El objetivo general del enfriamiento lento debe de ser para precipitar el volumen de carbono, mantenido en solución a temperaturas altas.

DESCRIPCION DE LA LINEA DE RECOCIDO CONTINUO

Para propósitos de descripción, esta línea es dividida en tres secciones que son:

- a). Entrada.
- b). Horno.
- c). Salida.

- a). Entrada:

En la dirección del viaje de la lámina, la sección de entrada consiste de un riel principal doble; una unidad para someter a esfuerzo de corte y encuadrar las terminales de los rollos por soldadura; una unidad de soldado; un tanque de limpieza alcálina electrolítico, para remover alguna contaminación del material; una unidad de limpieza por cepillado; un tanque de enjuague junto con una unidad de secado; y una entrada a la torre para almacenamiento de láminas, de donde son tomadas para mantener una velocidad constante de la línea cuando se esta haciendo la soldadura.

Esta línea fue designada para operar a una velocidad de 457 m/min. (1500 ft/min). El propósito de esta sección es con el fin de proveer una alimentación constante para la sección del horno.

- b). Horno:

A la entrada de la sección del horno la lámina es calentada en una zona con gas quemado, hasta aproximadamente

732°C (1350°F) en menos de 30 segundos, después es pasada a una zona de permanencia con calentamiento eléctrico durante 20 segundos, seguido de una zona de enfriamiento lento (también se conoce como enfriamiento retardado), en donde la lámina disminuye su temperatura a aproximadamente 537°C (1000°F) en menos de 15 segundos. Finalmente el material es enfriado con agua hasta alcanzar una temperatura de 115°C (240°F), durante 60 segundos, y posteriormente se enfria con aire a temperatura ambiente en 8 segundos.

Desde que la lámina entra a la zona de calentamiento hasta que abandona la zona de enfriamiento rápido, es protegida de la oxidación por una atmósfera gaseosa conteniendo 95% de nitrógeno y 5% de hidrógeno, y el lapso de tiempo que lleva toda la operación es de menos de 2 minutos (112 seg.). Esta unidad también opera a 457 m/min (1500 ft/min).

c) Salida:

Cuando la lámina abandona la sección del horno, es pasada a la sección de salida donde es enrollada. Esta sección consiste en una torre de almacenamiento, una unidad de frenado, otra de corte y dos más de enrollado. El propósito de esta sección es doble:

- Primero es capaz de detener la lámina para análisis metalúrgico y
- Segundo para cambiar de un enrollado a otro, con el fin de medir el corte de la lámina.

La figura 2.5 muestra la descripción esquemática de una línea de recocido continuo. < 14 >

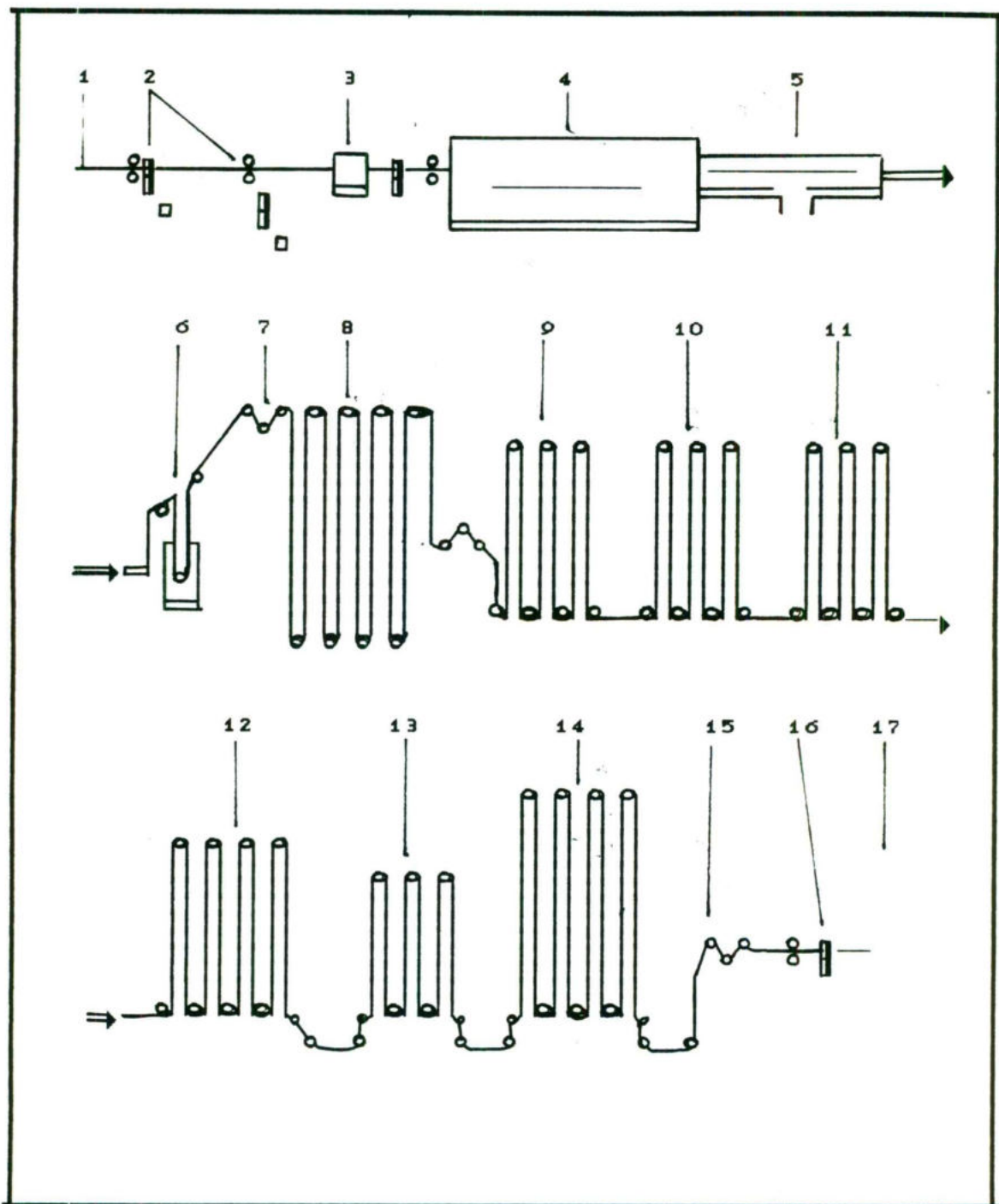


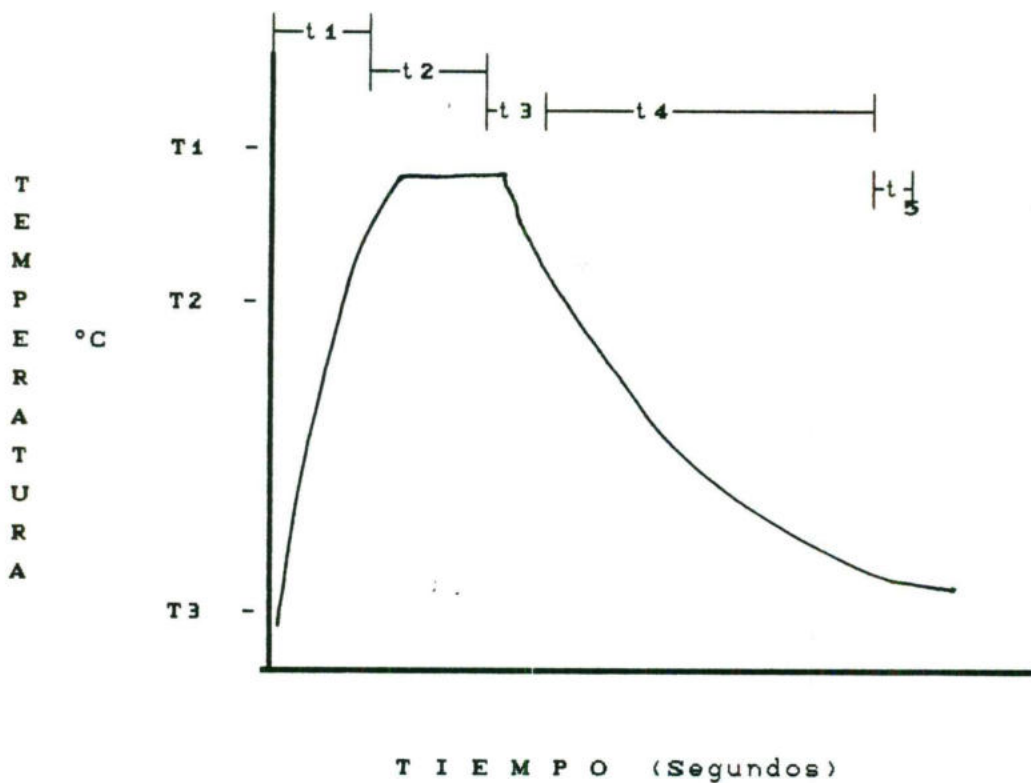
FIGURA 2.5 Diagrama esquemático de una línea de Recocido Continuo, designada para operar a una velocidad de 457 m/min.

De la figura anterior:

1. Riel Principal Doble.
2. Unidad de Corte.
3. Máquina Soldadora.
4. Tanque de Limpieza Alcálina electrolítico.
5. Tanque de Limpieza por Cepillado.
6. Tanque de Enjuague.
7. Unidad de Secado.
8. Torre para Almacenamiento de Material.
9. Cámara de Calentamiento con gas quemado.
10. Cámara de Permanencia con calentamiento eléctrico.
11. Cámara de Enfriamiento retardado.
12. Cámara de Enfriamiento con Agua.
13. Cámara de Enfriamiento con Aire.
14. Torre para Almacenamiento de Material.
15. Unidad de Frenado.
16. Unidad de Corte.
17. Unidades de Enrollado.

El esquema de la línea de recocido ilustrando el camino de la lámina a través de la línea designada para operar a 457 m/min no se encuentra a escala.

En la figura 2.6 se muestra el ciclo de calentamiento y enfriamiento de un proceso de recocido continuo.



Donde:

- | | | |
|----------------|---|-----------|
| T ₁ | = Temperatura de calentamiento. | (732°C) |
| T ₂ | = Temperatura al final de la zona de enfriamiento lento. | (537°C) |
| T ₃ | = Temperatura al final de la zona de enfriamiento rápido. | (115°C) |
| t ₁ | = Tiempo de Calentamiento. | (20seg) |
| t ₂ | = Tiempo de Permanencia. | (20seg) |
| t ₃ | = Tiempo de Enfriamiento Lento. | (12seg) |
| t ₄ | = Tiempo de Enfriamiento Rápido. | (60seg) |
| t ₅ | = Tiempo de Enfriamiento Final. | (8 seg) |

FIGURA 2.6 Ciclo Térmico de Recocido Continuo. <15>

Este ciclo de calentamiento básico ha sufrido numerosas modificaciones, las cuales son ilustradas en la figura 2.7.

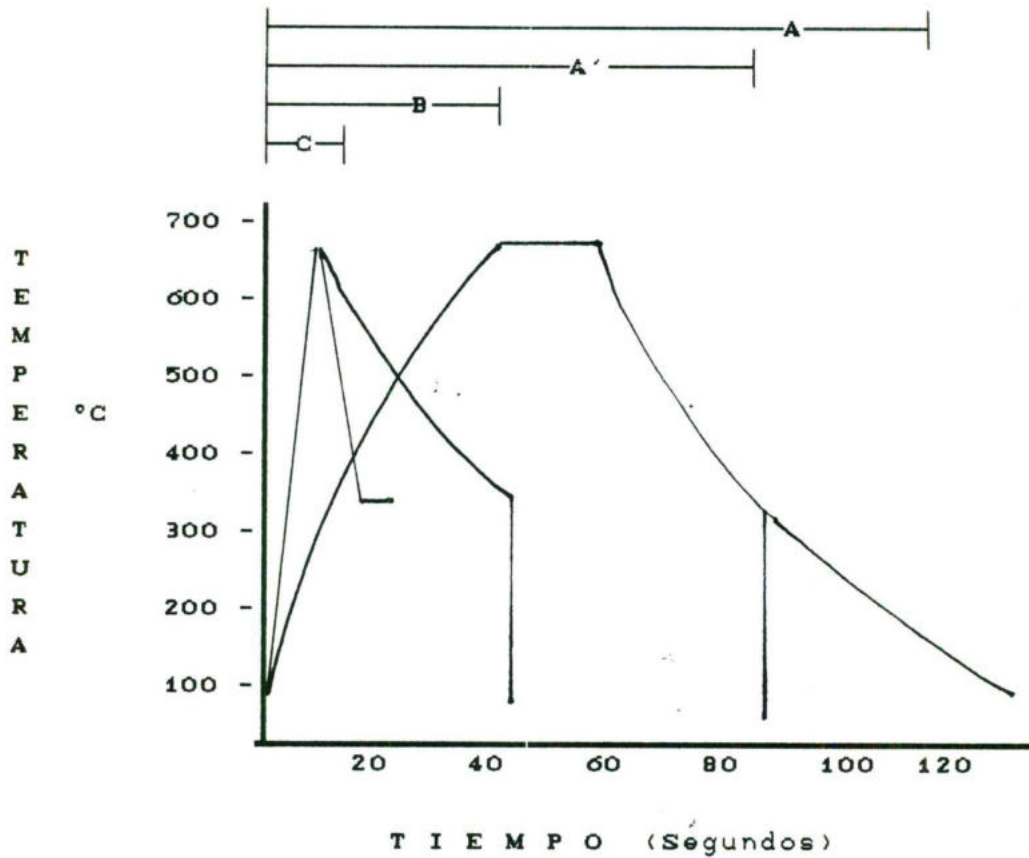


FIGURA 2.7 Ciclo de Recocido Continuo para Placas Estañadas.
<13>

Las modificaciones que ha sufrido este ciclo han sido para incrementar los rangos de producción de una instalación de recocido continuo, sin incrementar el tamaño del horno.

La curva A, nos muestra un ciclo de recocido continuo típico.

En la curva A' el material es templado después de que alcanza los 300°C de temperatura y se usa agua como medio de enfriamiento. Este ciclo fue empleado en algunas instalaciones para reducir el tiempo de enfriamiento. Mientras se alcanzaba tal fin, el sistema tuvo pérdidas considerables, principalmente debido a dificultades en operación y la mayoría de las unidades construidas desde 1958, tuvieron un sistema de enfriamiento pobre.

En la curva B, se tiene un ahorro de tiempo debido al calentamiento y enfriamiento, ya que la temperatura de recocido es alcanzada en 3 segundos, el tiempo de permanencia es omitido y el tiempo de enfriamiento se reduce debido a que se enfría con agua cuando el acero llega a los 300°C. La aplicación más notable para este método de recocido fue en 4 unidades instaladas en 1957 por Bethlehem Steel Company.

En la curva C, se lleva a cabo un ciclo rápido, en el cual se combina un calentamiento de resistencia eléctrica con precalentamientos de las láminas y subsecuentes enfriamientos rápidos. En este ciclo el material es templado desde la temperatura de recocido hasta los 300°C, en seguida es enrollado y se mantiene por lo menos 1 hora a esa temperatura.

Sin embargo, estas modificaciones y muchas otras fueron con el objeto de incrementar los rangos de producción, pero hubo un efecto dañino sobre la calidad de las láminas y no fueron muy exitosas.

2.2

Propiedades del Acero Recocido.

Las propiedades del acero recocido con el método de recocido por lotes (donde los tiempos de proceso son largos), varían a las propiedades del acero producido por métodos de recocido continuo.

Los aceros con procesos de recocido continuo tienen valores del límite de fluencia y resistencia a la tensión más altos y consecuentemente exhiben una ductilidad más baja, en comparación con el acero con proceso de recocido por lotes. Por lo tanto, los aceros con procesos de recocido continuo son inadecuados cuando se requiere un alto grado de formabilidad. Ver tabla I.

TABLA I

PROPIEDADES MECANICAS EN ACEROS BAJO CARBONO RECOCIDOS

| PROPIEDADES MECANICAS | RECOCIDO POR LOTES | RECOCIDO CONTINUO |
|---|-----------------------|----------------------|
| LIMITE DE FLUENCIA (kg/m^2) | 196×10^5 | 407×10^5 |
| RESISTENCIA A LA TENSION (kg/m^2) | 330×10^5 | 428×10^5 |
| ELONGACION (% EN 2 IN) | 44 | 20 |

Consideraremos ahora brevemente donde puede ser aplicado el proceso de recocido continuo. En general puede ser aplicado en donde:

- a) Se producen ahorros considerables (galvanizado).
- b) Las propiedades especiales son obtenidas y, o,
- c) Se obtiene la mejor calidad.

a) El recocido continuo será usado si es más económica la instalación y operación. Por tanto, un proceso que es continuo no necesariamente es barato. El costo por unidad para el recocido en lotes es sorprendentemente bajo. Este hecho supera la gran desventaja del tiempo tan largo de calentamiento y enfriamiento, sin embargo, estudios (17) han mostrado que una línea de recocido continuo podría tener un proceso para láminas con calidad estampado a una velocidad de 40 tons/Hr., en orden para ajustar los costos de operación con una línea de recocido por lotes. Pero el recocido continuo llegó a ser atractivamente económico cuando fue combinado con uno o más procesos adicionales.

Así que cuando combinan al recocido con el baño caliente de zinc (galvanizado), dentro de la misma operación, se producen ahorros considerables porque la combinación elimina el laminado superficial, el corte, el pandeo, etc., manteniendo estos pasos como una operación separada.

b) El recocido continuo también es aplicable donde se desean propiedades especiales. Por ejemplo, si aplicamos este proceso a láminas que han sido trabajadas en frío

2.2

Propiedades del Acero Recocido.

Las propiedades del acero recocido con el método de recocido por lotes (donde los tiempos de proceso son largos), varían a las propiedades del acero producido por métodos de recocido continuo.

Los aceros con procesos de recocido continuo tienen valores del límite de fluencia y resistencia a la tensión más altos y consecuentemente exhiben una ductilidad más baja, en comparación con el acero con proceso de recocido por lotes. Por lo tanto, los aceros con procesos de recocido continuo son inadecuados cuando se requiere un alto grado de formabilidad. Ver tabla I.

TABLA I

PROPIEDADES MECANICAS EN ACEROS BAJO CARBONO RECOCIDOS

| PROPIEDADES MECANICAS | RECOCIDO POR LOTES | RECOCIDO CONTINUO |
|---|-----------------------|----------------------|
| LIMITE DE FLUENCIA (kg/m^2) | 196×10^5 | 407×10^5 |
| RESISTENCIA A LA TENSION (kg/m^2) | 330×10^5 | 428×10^5 |
| ELONGACION $(\% \text{ EN } 2 \text{ IN})$ | 44 | 20 |

2.3

Aplicaciones del Proceso de Recocido.

Consideraremos ahora brevemente donde puede ser aplicado el proceso de recocido continuo. En general puede ser aplicado en donde:

- a) Se producen ahorros considerables (galvanizado).
- b) Las propiedades especiales son obtenidas y, o,
- c) Se obtiene la mejor calidad.

a) El recocido continuo será usado si es más económica la instalación y operación. Por tanto, un proceso que es continuo no necesariamente es barato. El costo por unidad para el recocido en lotes es sorprendentemente bajo. Este hecho supera la gran desventaja del tiempo tan largo de calentamiento y enfriamiento, sin embargo, estudios (17) han mostrado que una línea de recocido continuo podría tener un proceso para láminas con calidad estampado a una velocidad de 40 tons/Hr., en orden para ajustar los costos de operación con una línea de recocido por lotes. Pero el recocido continuo llegó a ser atractivamente económico cuando fue combinado con uno o más procesos adicionales.

Así que cuando combinan al recocido con el baño caliente de zinc (galvanizado), dentro de la misma operación, se producen ahorros considerables porque la combinación elimina el laminado superficial, el corte, el pandeo, etc., manteniendo estos pasos como una operación separada.

b) El recocido continuo también es aplicable donde se desean propiedades especiales. Por ejemplo, si aplicamos este proceso a láminas que han sido trabajadas en frío

obtendremos un producto más duro y rígido, propiedad que es deseable en algunas compañías.

- c) Finalmente el recocido continuo es aplicado donde se obtiene una mejor calidad, por lo que se hacen algunas afirmaciones: más uniformidad en propiedades de principio a fin para un rollo y de rollo a rollo, se eliminan los bordes de recocido, rollos no dañados. eliminación de puntas y agentes contaminantes, etc.

2.4 Producción de Láminas para Estampado Profundo por Recocido Continuo.

En los puntos anteriores se habló de los tratamientos térmicos que son aplicables a los productos que requieren solamente un grado limitado de formabilidad (acero con bajo contenido en carbono), pero ¿Cuál es el objetivo del tratamiento térmico de recocido continuo específicamente para materiales que requieren un alto grado de formabilidad, materiales para aplicaciones de estampado profundo?. Para responder esta pregunta, debemos abordar los siguientes temas.

2.4.1 Deformación Plástica:

Durante las operaciones de estampado, las láminas de acero sufren severas deformaciones plásticas (cuando un material se tensa más allá de su límite elástico), ya que

como se sabe todas las operaciones de conformado como son: troquelado, prensado, trefilado, laminado, forjado, estirado, extruido, se relacionan con la deformación plástica de los metales. Se ha mencionado esto porque el material antes de seguir el proceso de recocido, ha sido deformado plásticamente mediante trabajado en frío, por tanto un material se considera trabajado en frío si sus granos se encuentran en una condición distorsionada después de finalizada la deformación plástica.

En consecuencia todas las propiedades de un metal que dependen de la estructura reticular se ven afectas por la deformación plástica.

El endurecimiento por trabajado, aumenta la dureza, resistencia a la tensión, resistencia a la fluencia, mientras que la ductilidad representada por el porcentaje de elongación, disminuye. Aunque la resistencia y la dureza aumentan, la rapidez de cambio para cada una no es la misma.

La dureza suele aumentar más rápidamente en el primer 10% de reducción, en tanto que la resistencia a la tensión aumenta más o menos linealmente. La resistencia a la fluencia aumenta más rápidamente que la resistencia a la tensión, así que a mayor intensidad de deformación plástica, el intervalo entre la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tensión disminuye. Ver figura 2.8

Por otro lado, la ductilidad sigue una trayectoria opuesta a la de la dureza. La ductilidad sufre una gran disminución en el primer 10% de reducción y después sigue disminuyendo pero con una rapidez menor. < 18 >

Un camino para que el material regrese a un estado libre de deformación, es mediante tratamiento térmico adecuado después de la deformación en frío (deformación plástica) y antes de poner al material en servicio.

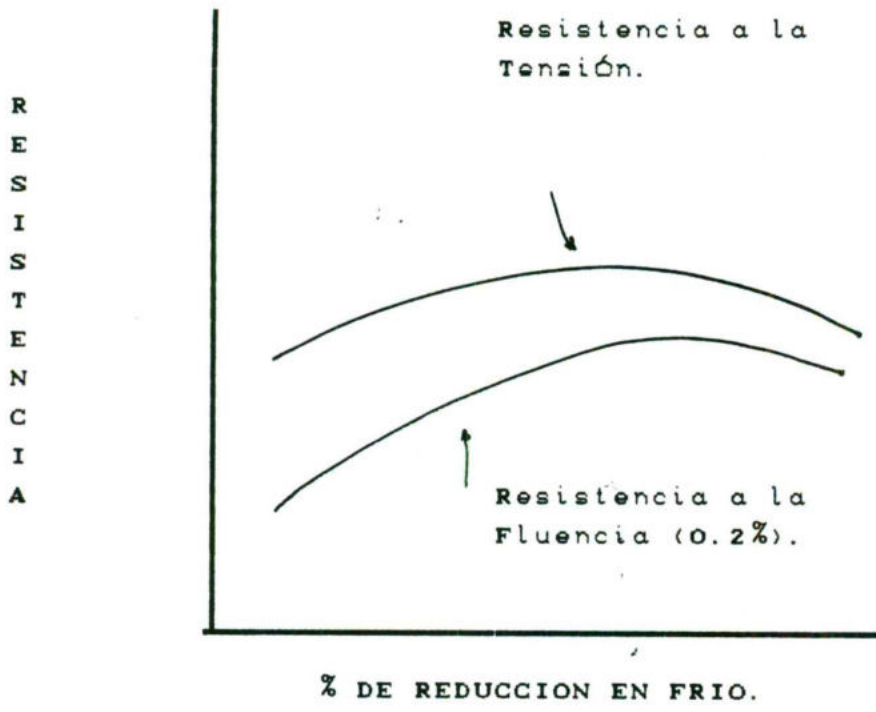


FIGURA 2.8 Relación existente entre el porcentaje de trabajo en frío, y la resistencia a la tensión y a la Fluencia. <18>

2.4.2 Propiedades y Criterios de Selección para la Formabilidad en Láminas de Acero con Bajo Carbono

Se ha encontrado un gran número de procedimientos de prueba útiles en la selección del acero para estampado profundo; la prueba de tensión es una de las más exitosas cuando se quiere relacionar a las propiedades mecánicas con la formabilidad.

Para una formabilidad óptima $\langle 19-20 \rangle$ consideraremos que:

- La resistencia a la tensión debe de ser alta, y
 - El límite de fluencia bajo.
-
- Un criterio en la selección de formabilidad es la relación límite de fluencia-resistencia a la tensión, ya que mientras más baja es la relación más alta es la formabilidad.
 - El porcentaje total de elongación (medida de la habilidad del material para sufrir deformación plástica) es otro criterio importante de formabilidad.
 - La elongación uniforme que corresponde a la cantidad de deformación plástica posible antes de que la deformación localizada ocurra y más allá de lo cual, las operaciones de conformado son indeseables, es otro criterio de formabilidad.

- Un criterio menos común puede ser usado para calcular la formabilidad de las láminas de acero. Este criterio se refiere al radio de deformación plástica "r". Está basado en trabajos expuestos así como en valores obtenidos de varias pruebas de estampado-copa, tales como los de Olsen y Erichsen.

Las pruebas de copa no siempre son una medida exacta de formabilidad, sin embargo son comúnmente usadas porque requieren un mínimo de especímenes para el ensayo.

Las láminas trabajadas en frío para aplicaciones de estampado son un producto usado donde es fácil la soldabilidad y un grado de resistencia a la corrosión es deseable. Son manufacturadas en tres calidades principales:

- (a) Calidad Comercial: Este material es conformado por partes, puede ser soldado y enrollado, es producido de acero calmado con un contenido máximo en carbono de 0.15% .
- (b) Calidad Estampado: Material producido de acero calmado del grado SAE 1006 o ASTM A-619, con un contenido máximo en carbono de 0.06%. Empleado para la fabricación de partes identificadas, donde el conformado severo puede ser involucrado. El envejecimiento es requerido.

(c) Calidad Estampado, Desoxidado Especial: Material producido de acero desoxidado selectamente (normalmente desoxidado con aluminio), con un contenido máximo en carbono de 0.10%, procesado para tener buena uniformidad de propiedades de estampado. Empleado en la fabricación de partes identificadas teniendo extremadamente severas deformaciones y para ser esencialmente libre del envejecimiento.

Las propiedades mecánicas típicas son mostradas en la tabla II. < 22 >

TABLA II

PROPIEDADES MECANICAS TÍPICAS EN LAMINAS DE ACERO
CON BAJO CARBONO Y TRABAJADAS EN FRÍO PARA EL CONFORMADO.

| PROPIEDAD MECANICA: | CC | CE | CEDE |
|---|---------------------|---------------------|---------------------|
| LÍMITE DE FLUENCIA (kg/m ²) | 196x10 ⁵ | 175x10 ⁵ | 161x10 ⁵ |
| RESISTENCIA A LA TENSION (kg/m ²) | 281x10 ⁵ | 281x10 ⁵ | 281x10 ⁵ |
| ELONGACION (% EN 2 IN) | 36 | 38 | 40 |
| DUREZA ROCKWELL B | 40 | 38 | 36 |

CC : Calidad Comercial.
CE : Calidad Estampado.
CEDE: Calidad Estampado Desoxidado Especial.

2.4.3 Factores que Afectan la Formabilidad

Una cantidad significativa de láminas de acero con bajo contenido en carbono son producidas por recocido continuo, la mayoría de los productos son láminas galvanizadas, aluminizadas y placas estañadas.

Desafortunadamente el tiempo tan corto en que se efectúa el proceso de recocido continuo no da lugar a que se obtenga un tamaño de grano vasto, y la falta de textura del material y otras características disminuyen la formabilidad.

Las láminas de acero producidas comercialmente por recocido continuo tienen propiedades muy próximas al material recocido por lotes, pero en realidad no son tan excelentes. Uno de los factores que afecta la formabilidad del material, es la composición química, y por lo tanto debe de ser ajustada.

Se encontró que un acero conteniendo menos de 0.01% C, sin carburos en la estructura a la temperatura de recocido desarrolla un tamaño de grano en el rango deseado (ASTM No. 6 a 8) cuando es recocido continuamente. Pero desafortunadamente tales aceros tienen más carbono en solución después del recocido, probablemente porque pocas partículas de carburo existen para actuar como núcleos para la precipitación durante el enfriamiento. < 24-25 >

Otro factor que afecta la formabilidad es el grado de deformación previa, este es un factor muy importante, ya que si se aumenta la cantidad de deformación previa, se favorece la nucleación y disminuye el tamaño final del grano. < 26 >

A mayores grados de deformación estará presente un mayor número de puntos altamente reforzados o de alta energía, dando lugar a una recristalización desde un mayor número de núcleos y por último a un mayor número de granos, obteniéndose un tamaño de grano menor.

Más sin embargo, se encontró que si se disminuía la cantidad de reducción en frío de 10% a 15% antes del recocido, se podría obtener un tamaño de grano vasto. Esto no se llevó a la práctica ya que se demostró que disminuía considerablemente la producción. < 26 >

Otro factor que afecta la formabilidad es el efecto del rango de enfriamiento sobre el carbono y nitrógeno en solución sólida. Estos elementos precipitan como carburos, carbonitruros o nitruros, mientras el acero se enfria desde la temperatura de recocido.

Cuando el acero es recocido por lotes, éste se enfria tan lentamente que ocurre la precipitación sobre carburos no disueltos y como resultado solamente de 1 a 3 ppm de carbono y cerca de 20 ppm de nitrógeno permanece en solución sólida después de que las láminas alcanzan la temperatura ambiente. < 27 >

Continuamente los rangos de enfriamientos del recocido continuo no proporcionan tiempo suficiente para que ocurra la precipitación y bastante carbono y nitrógeno permanece en solución.

El carbono es el elemento principalmente responsable para el endurecimiento por envejecimiento mientras que por otro lado el nitrógeno es más importante en la deformación por envejecimiento. < 28 >

Para estos aceros, primeramente la composición química es optimizada, el objetivo general es hacia los niveles más bajos de carbono, nitrógeno, azufre, fósforo y elementos residuales (cobre, cromo, níquel, etc.), controlar los niveles de manganeso ($\sim 0.3\%$) y para el acero desoxidado, aluminio ($\sim 0.05\%$). < 29 >

Segundo, la condición de trabajado en caliente debe de ser controlada para obtener una estructura con grano ferrítico recristalizado equiaxial, además de carburos esferoidales y finamente dispersos, y en el acero desoxidado el nitruro de aluminio también tiene que estar disuelto y mantenido en solución. < 29 >

Finalmente, el nivel de trabajado en frío debe de escogerse o fijarse, para que nos de el mejor balance entre la ductilidad y la formabilidad.

Por lo tanto la composición química, la tensión y otras propiedades del acero son determinantes para su microestructura (tamaño de grano, morfología de los carburos y el contenido de inclusiones). La cantidad de inclusiones puede ser controlada por el fundidor en la práctica, pero los otros factores son determinados durante la recristalización final en el recocido. < 31 >

Existen 4 fenómenos metalúrgicos involucrados en el proceso de recocido continuo, tres de los cuales son de importancia primaria para la producción de láminas con calidad de estampado profundo. < 17 >

Estos fenómenos son:

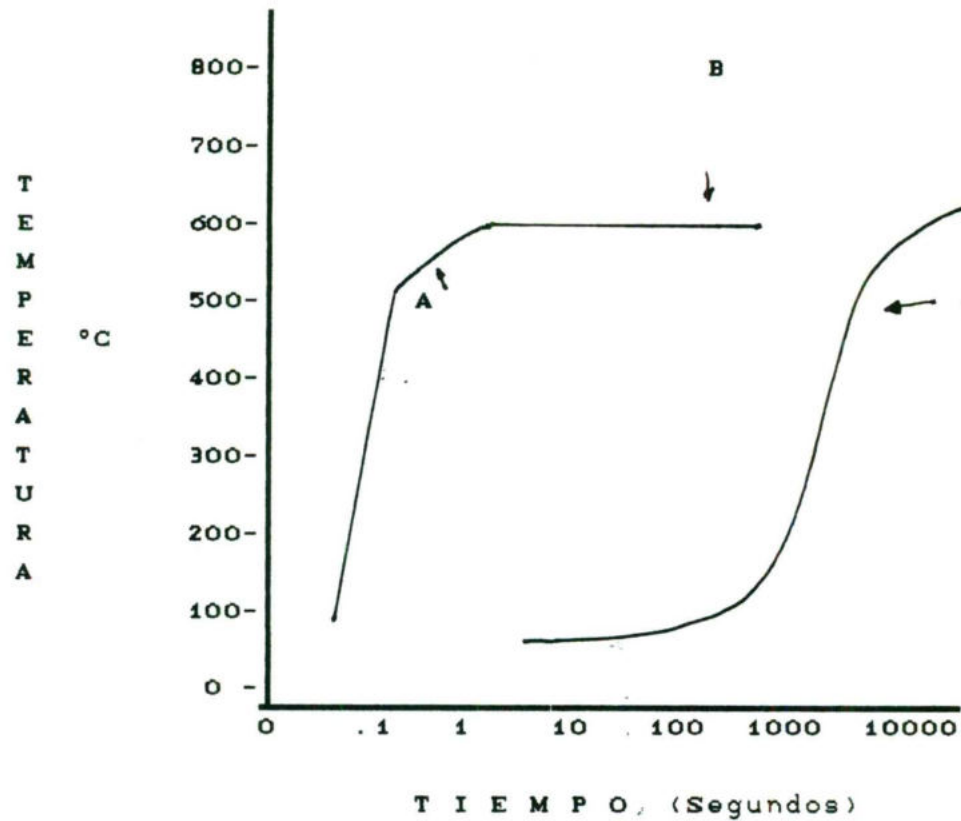
- Recristalización y Crecimiento de Grano.
- Formación y Transformación de Austenita.
- Endurecimiento por Envejecimiento.
- Deformación por Envejecimiento.

De hecho todos estos fenómenos sirven para dar incrementos de dureza y rigidez, lo cual es deseable en la placas estañadas. Sin embargo no actúan para dar suavidad y ductilidad necesarias a las láminas con proceso de estampado profundo.

2.5.1 Recristalización y Crecimiento de Grano

Las láminas en el proceso de recocido continuo, son calentadas rápidamente y mantenidas por tiempo corto a la temperatura de recristalización. Estudios < 31-32 > de recocido continuo de acero con bajo carbono han mostrado que con rangos de calentamiento superiores a 125° C/s., y para una temperatura de recocido de 700°C, la recristalización ocurre casi instantáneamente. Sin embargo el grano recristalizado es fino y no es apreciablemente vasto, aún después de que el material permanece 20 horas, a la temperatura de recocido. Esto se muestra en la figura 2.9 (curva de la izquierda).

Contrasta con el tamaño de grano grande inicialmente obtenido con rangos de calentamiento lentos, característico del recocido por lotes. También ilustrado en la figura 2.9 (curva de la derecha).



Donde:

- A. Calentamiento rápido sin permanencia
124 granos/cm³
- B. Calentamiento rápido, 20 horas de permanencia
109 granos/cm³
- C. Calentamiento Lento sin permanencia
31 granos/cm³

FIGURA 2.9 Ilustra como los rangos de calentamiento afectan el tamaño de grano recocido para un acero calmado. <17>

Generalmente las láminas de acero con un tamaño de grano muy fino no tienen la buena ductilidad que es característica del material que ha sido recocido por lotes.

Cuando un material tiene un tamaño de grano fino, la resistencia a la tensión es mayor y por tanto la ductilidad menor. Conforme el tamaño de grano llega a ser más fino, la elongación del punto de fluencia aumenta ocasionando una pérdida en ductilidad, tal aumento puede ser eliminado por laminación superficial después del recocido.

Aunque si el tamaño de grano en un material es cada vez más fino, se necesitará un porcentaje de laminación mayor para eliminar dicho aumento, lo cual también ocasiona una pérdida adicional de ductilidad. Ver figura 2.10

Para que el recocido continuo de un material sea exitoso en operaciones de conformado y estampado, se debe de encontrar primero la manera de obtener un tamaño de grano equivalente al que se obtiene por el método de recocido por lotes.

En los siguientes párrafos se discuten dos métodos en los cuales este objetivo puede ser alcanzado.

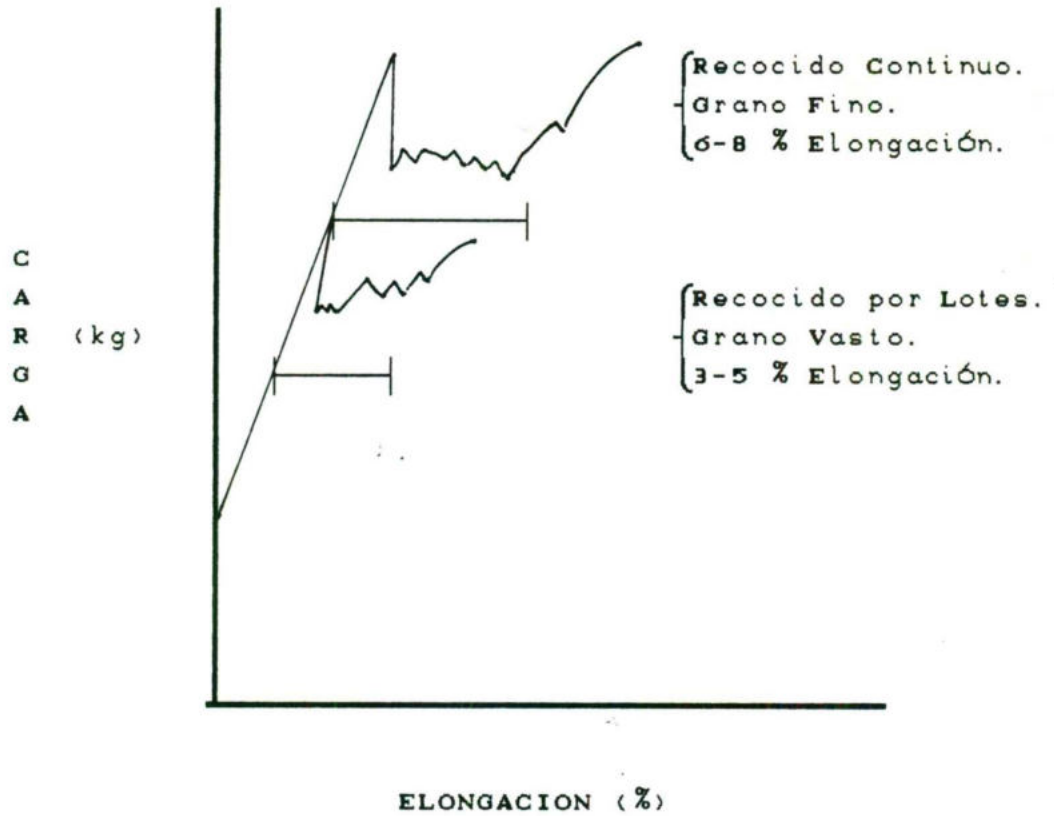


FIGURA 2.10 Efecto del Tamaño de Grano sobre:
 a) La Elongación del punto de Fluencia.

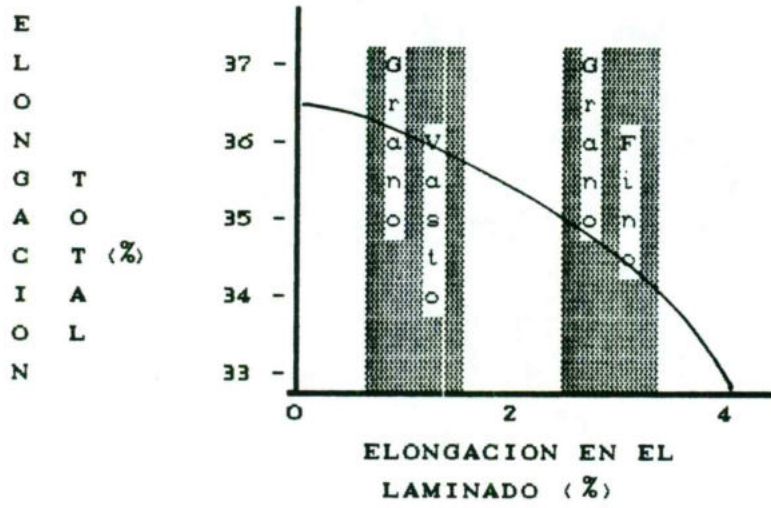


FIGURA 2.10 Efecto del Tamaño de Grano sobre:
 b) La Cantidad de Laminación Superficial.

Primer Método:

Uno de los postulados de la recristalización es que el tamaño de grano vasto obtenido antes del trabajado en frío, será el tamaño de grano vasto después del recocido. De tal forma, si se desea producir un material con tamaño de grano vasto por el método de recocido continuo, al material (acero que se va a usar para operaciones de laminado en frío) se le debe de dar un laminado en caliente y un acabado en frío para que posteriormente sea enrollado en caliente. El acabado en frío será a una temperatura de 816°C y el enrollado a una temperatura de 704°C, cuando el material este aún caliente.

< 17 >

Experimentos han mostrado < 17 > que siguiendo esta práctica de recocido continuo, las láminas pueden ser producidas teniendo un tamaño de grano y una suavidad equivalente al material producido en el recocido por lotes.

Sin embargo, la distribución de carburos es pobre en tal material; los carburos grandes que se forman como un resultado del enrollamiento en caliente se extienden durante el laminado en frío y su distribución no se afecta por el recocido subsecuente. Estos carburos extendidos disminuyen la ductilidad transversal de la lámina y por lo tanto su formabilidad.

Segundo Método:

Otro postulado del proceso de recristalización es que el tamaño de grano recristalizado depende fuertemente de la reducción previa del material. En consecuencia el grano será vasto con una disminución de la reducción previa. Ver figura 2.11.

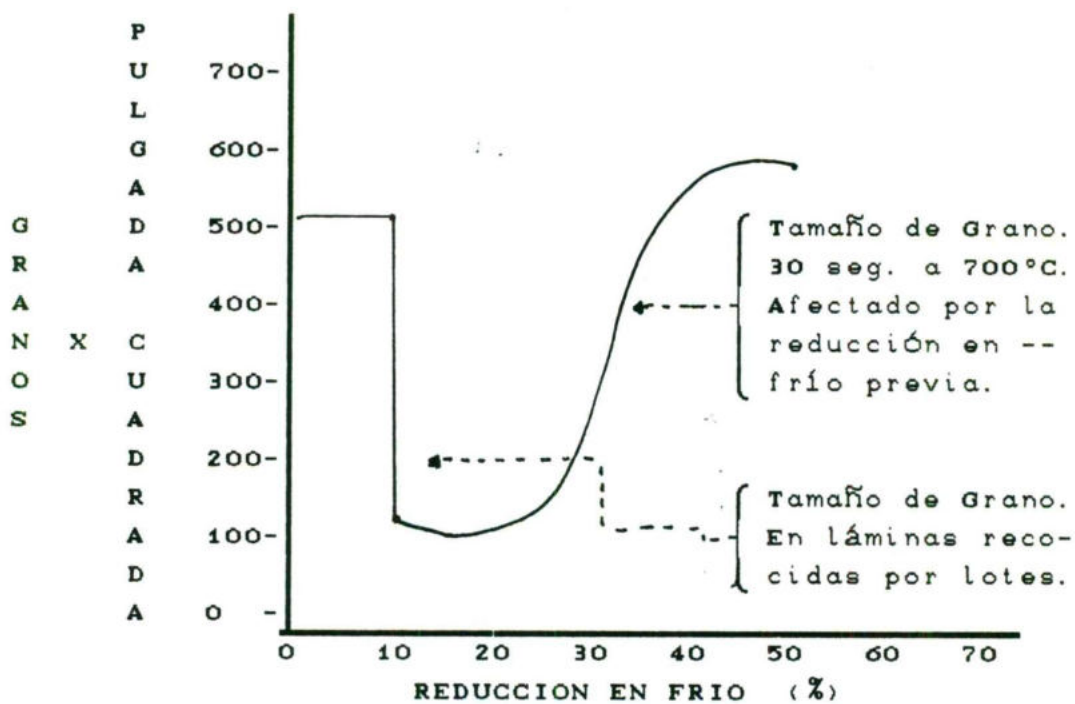


FIGURA 2.11 Efecto de la cantidad de reducción en frío previa sobre el tamaño de grano recristalizado. <17>

Es posible que una apropiada reducción en frío primaria (menos de la cantidad comúnmente usada en la práctica, aproximadamente 60%) dé un tamaño de grano deseado por recocido continuo.

Por otro lado si se controla el tamaño de grano por medio de la reducción previa, no se obtendrá una estructura de carburos indeseable como la que se obtuvo en el primer método.

2.5.2 Formación y Transformación de Austenita

La formación y transformación de la austenita no es problema en las prácticas de recocido continuo, porque esos cambios pueden ser evitados manteniendo la temperatura abajo de la temperatura crítica inferior.

2.5.3 Envejecimiento

Las propiedades del acero están sujetas a los cambios dependientes del tiempo, conocido comúnmente como ENVEJECIMIENTO. Este fenómeno toma lugar cuando los elementos sólidos son retenidos en solución después del temple o del enfriamiento rápido.

En el recocido continuo los rangos de enfriamiento generalmente son rápidos, por lo que el acero tratado térmicamente por este método, está sujeto a dos fenómenos comunes de envejecimiento:

1. Endurecimiento por Envejecimiento: Generalmente observado como un cambio en las propiedades mecánicas después del temple, y
2. Deformación por Envejecimiento: Cambio en las propiedades mecánicas después del trabajado en frío.

2.5.3.1 Endurecimiento por Envejecimiento

El endurecimiento por envejecimiento es generalmente el resultado de la precipitación de carbono y/o nitrógeno, como carburos, nitruros, carbonitruros, desde la solución sólida en ferrita.

La solubilidad de esos dos elementos disminuye rápidamente con la temperatura. Esto se ilustra en la figura 2.12 (Porción del diagrama Fe-C y Fe-N)

En aceros comerciales la precipitación de carbono predomina y es la principal causa del endurecimiento por envejecimiento.

La figura 2.13 muestra la porción del diagrama de equilibrio Hierro-Carburo de Hierro. En ella se puede ver que a la temperatura de recristalización (temperatura de recocido), la ferrita puede disolver una cantidad considerable de carbono. La solubilidad de carbono, la cual ocupa posiciones intersticiales en la red de ferrita, disminuye severamente conforme disminuye la temperatura, para casi desaparecer a temperatura ambiente.

DIAGRAMA HIERRO-CARBONO

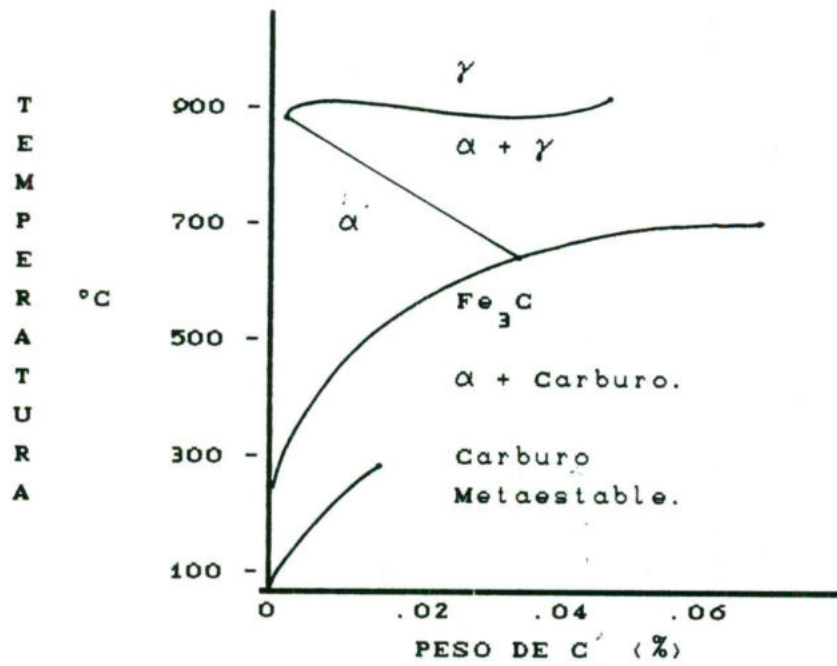


FIGURA 2.12 Solubilidad de C y N en Hierro Alfa. <34>

DIAGRAMA HIERRO-NITROGENO

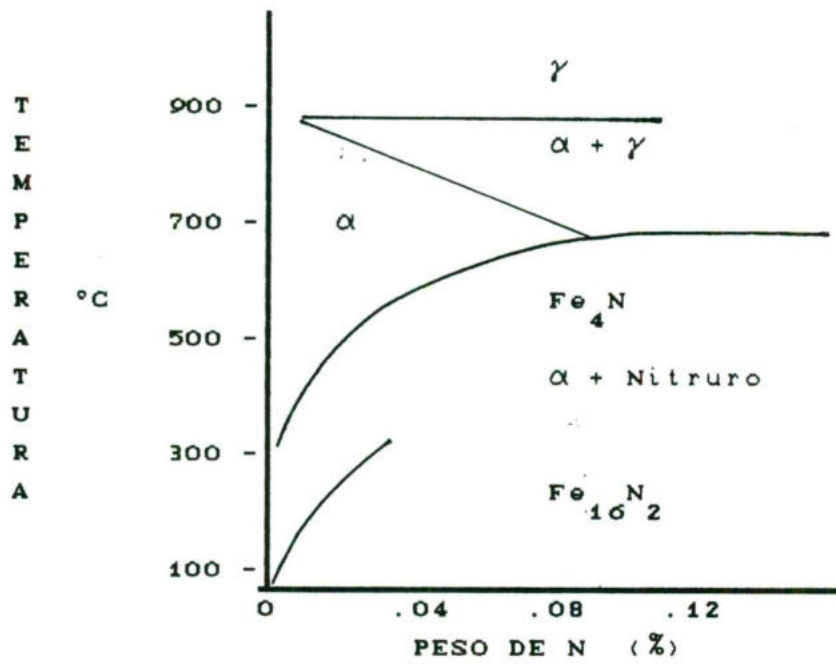


FIGURA 2.12 Solubilidad de C y N en Hierro Alfa. (34)

DIAGRAMA HIERRO-CARBURO DE HIERRO

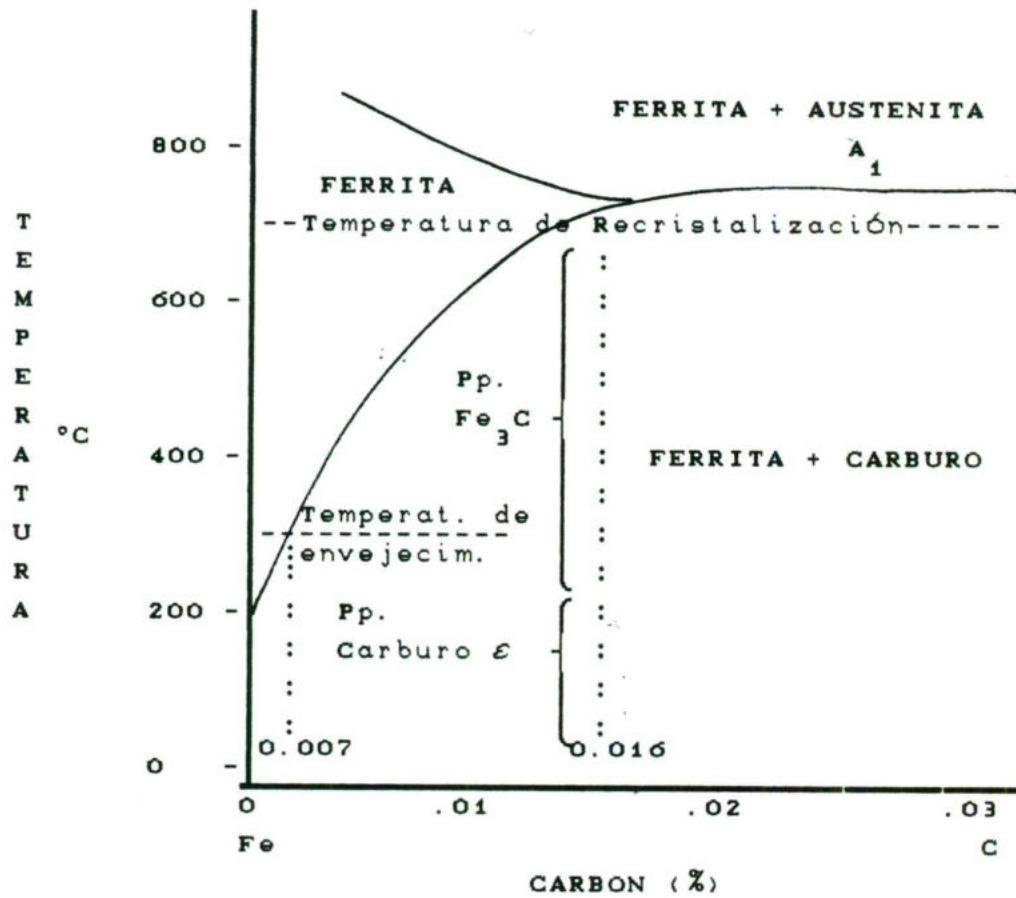


FIGURA 2.13 El carbono se disuelve rápidamente en la ferrita a la temperatura de recristalización y tiende a ser precipitado como Fe_3C o Fe_2C en subsecuentes enfriamientos. <17>

S E
A N
T
U C
R A
A R (%)
C B
I O
O N
N O

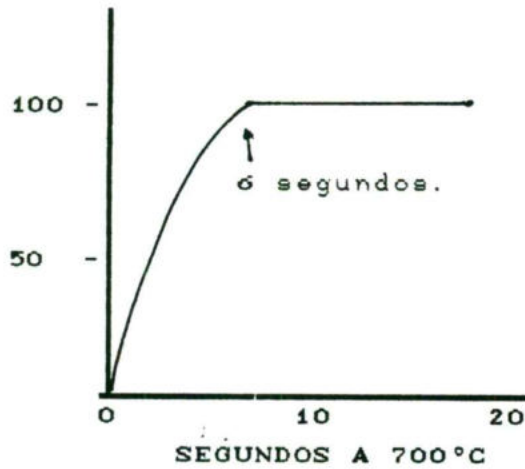


FIGURA 2.13 El carbono se disuelve rápidamente en la ferrita a la temperatura de recristalización y tiende a ser precipitado como Fe_3C o Fe_2C en subsecuentes enfriamientos. (17)

La gráfica pequeña de la figura 2.13 muestra que la ferrita llega a saturarse con carbono muy rápidamente a la temperatura de 695°C (1283°F), así que no hay esperanzas de evitar la saturación en las prácticas de recocido continuo.

Cuando el carbono satura a la ferrita y el acero es enfriado desde la temperatura de recristalización, la ferrita llega a sobresaturarse. El contenido de carbono en equilibrio tiende a ser restaurado por la precipitación de carburos. La cantidad y clase de carburos que precipita depende de la temperatura a la cual el acero es mantenido. Así que el rango al cual se forma el carburo que endurece al acero depende de la temperatura a la cual precipita y del grado de enfriamiento abajo de la temperatura crítica.

Las consecuencias de tal precipitación son manifestadas en un incremento en dureza, límite de fluencia y resistencia a la tensión, y en una disminución de ductilidad.

La figura 2.14 muestra que la precipitación de carburos toma lugar mas rápidamente a temperaturas altas, pero el material no resulta con las mejores propiedades.

Con un tiempo de envejecimiento menor de 10 segundos, y manteniendo el acero a una temperatura de 370°C (700°F), se obtienen las mejores propiedades. Aunque todavía mejores propiedades son obtenidas envejeciendo el material a una temperatura de 315°C (600°F), pero en este caso el tiempo de permanencia requerido es largo para que pueda ser aplicable a las prácticas de recocido continuo.

El problema que existe si se envejece al acero a la temperatura de 370°C (700°F), es que todavía una cantidad apreciable de carbono permanece en la ferrita y esto causa 3 problemas que son:

1. El carbono que permanece en solución después del recocido continuo puede ser suficiente para que el acero siga endureciendo por envejecimiento lentamente a temperatura ambiente. El endurecimiento por envejecimiento a temperatura ambiente deteriora la ductilidad del acero.

Por el contrario, cuando el acero es enfriado muy lentamente (recocido por lotes) a temperaturas inferiores a 200°C (400°F), solamente una cantidad mínima de carbono permanece en solución en la ferrita, por lo que el acero no endurece por envejecimiento a temperatura ambiente.

2. El exceso de carbono que permanece en la ferrita en un acero recocido continuamente, actúa como un endurecedor del mismo. Por lo tanto si se desea obtener la excelente ductilidad característica del recocido por lotes en el proceso de recocido continuo, se debe encontrar primero la forma de reducir el carbono en solución en la ferrita a niveles equivalentes a los obtenidos en el recocido por lotes.
3. La excesiva cantidad de carbono que permanece en solución en la ferrita, deforma por envejecimiento al acero que es recocido continuamente.

R
O
D
C
U
K
R
W
E
E
Z
L
A
L

B

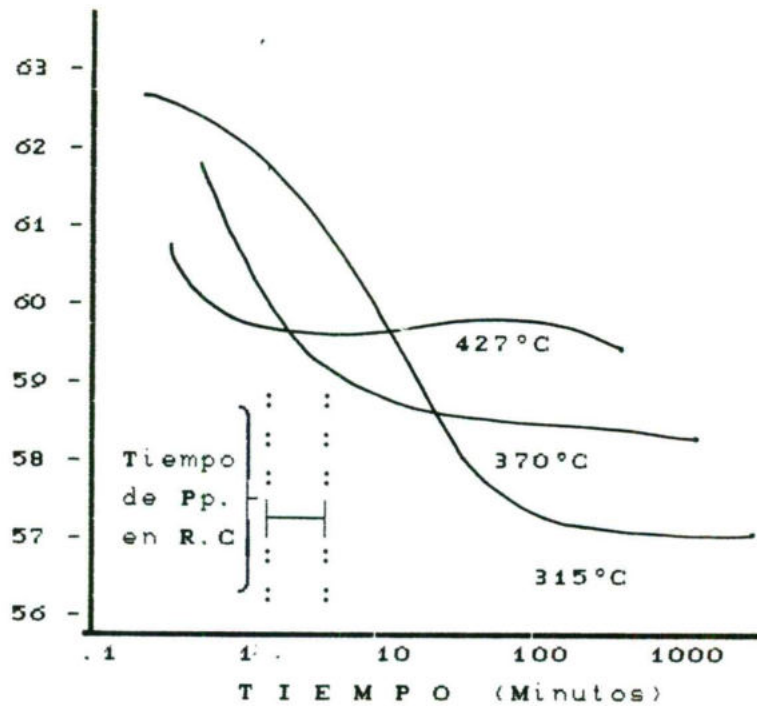


FIGURA 2.14 Las mejores propiedades son obtenidas envejeciendo el acero por un tiempo de 2-5 min. a la temperatura de 370°C. <17>

Por otro lado en el recocido por lotes el enfriamiento es lento desde la temperatura de recocido permitiendo la precipitación de todo el carbono en exceso, asegurando que los efectos de endurecimiento por envejecimiento sean mantenidos a un bajo nivel a temperatura ambiente.

Enfriamientos lentos son más importantes en el rango desde la temperatura de recristalización hasta los 300°C, y el tiempo óptimo en este rango de temperatura crítica es de 25 segundos. Enfriamientos más rápidos pueden ser empleados abajo de 300°C. < 35 >

Ciertos elementos de aleación en el hierro pueden reducir los efectos observados en el endurecimiento por envejecimiento, tanto para carbono como para nitrógeno:

- a). Por combinación con el intersticial para formar un compuesto estable. Ejemplo: nitruro de aluminio.
- b). Reduciendo la solubilidad del intersticial a temperaturas altas. Ejemplo: El efecto del silicio sobre la solubilidad del carbono.
- c). Por la formación de la unión química con el intersticial. Ejemplo: Unión del nitrógeno con el manganeso.

El efecto del endurecimiento por envejecimiento es fácilmente observado en términos del cambio en las propiedades mecánicas de la aleación.

Otro método sugerido < 17 > para aliviar el problema del endurecimiento por envejecimiento involucra el enfriamiento del acero desde la temperatura de recocido hasta los 300°C, enrollando la lámina y manteniéndola en esa forma por lo menos 1 hora, a esa temperatura. El período de permanencia a esa temperatura permite que el carbono precipite como grandes carburos estables. El enrollamiento tiene que hacerse en una atmósfera inerte, y debe mantenerse hasta que el rollo alcance 200°C o menos antes de que pueda ser expuesto al aire.

2.5.3.2 Deformación por Envejecimiento

La deformación por envejecimiento es un cambio dependiente del tiempo en las propiedades mecánicas de un acero previamente trabajado en frío y es atribuido a la difusión de átomos de carbono o nitrógeno por dislocaciones. La cantidad de intersticial requerida para producir cambios observables en la deformación por envejecimiento es mucho menor que la requerida para endurecer al acero por envejecimiento. El nitrógeno más que el carbono es el responsable para que un material se deforme por envejecimiento en aceros comerciales con bajo contenido en carbono. < 34 >

El envejecimiento por nitrógeno puede ser reducido drásticamente adicionando elementos tales como el titanio, aluminio, vanadio, boro, los cuales ligan con el nitrógeno. El carbono puede causar deformación por envejecimiento, cuando el enfriamiento desde la temperatura de recocido deja carbono en solución como un resultado de:

- a). Enfriamientos rápidos.
- b). Nucleación retardada de carburos, asociada con un contenido bajo en carbono, o, cuando,
- c). La disolución de pequeños carburos ocurre, proporcionando de esta forma carbono para la migración de nuevas dislocaciones producidas por la deformación plástica.

En el recocido < 34 >, el acero que es enfriado lentamente, exhibe un punto de fluencia el cual puede ser eliminado por trabajado en frío, tal como el laminado superficial o el laminado de nivelación. A menos que la sobresaturación de carbono o nitrógeno sea extremadamente baja, los siguientes cambios secuenciales toman lugar y son típicos de la deformación por envejecimiento:

- a). El punto de fluencia retorna.
- b). La elongación del punto de fluencia se incrementa.
- c). El flujo de esfuerzos internos se incrementa.
- d). La resistencia a la tensión se incrementa y la ductilidad disminuye.

La mayoría de las manifestaciones de la deformación por envejecimiento son similares a las del endurecimiento por envejecimiento, pero la deformación tiene otra característica.

Después del recocido, las láminas de acero con bajo carbono son ligeramente deformadas (laminación superficial), para eliminar la brusca elongación del punto de fluencia que es característica de este material. Si el envejecimiento toma lugar después de la laminación superficial, la elongación del punto de fluencia retorna y las láminas son entonces susceptibles al estriado y a esfuerzos de tensión en subsecuentes deformaciones.

La solución al problema de la deformación por envejecimiento al igual que el endurecimiento por envejecimiento, se apoya en la eliminación de todo el carbono de no equilibrio desde la solución sólida en la ferrita.

< 34 >

2.5.3.3 Como se Alteran las Propiedades Mecánicas con el Envejecimiento

La figura 2.15 muestra la manera en la cual las propiedades mecánicas cambian. Los resultados son típicos de un acero semicalmado con 0.03%C y envejecido a 60°C (140°F). En la figura se nota que el límite de fluencia y la resistencia a la tensión primero se incrementan a un máximo y después decaen ligeramente. Contrariamente la ductilidad (indicada por la elongación y la reducción en área) decae a un mínimo y después se eleva ligeramente.

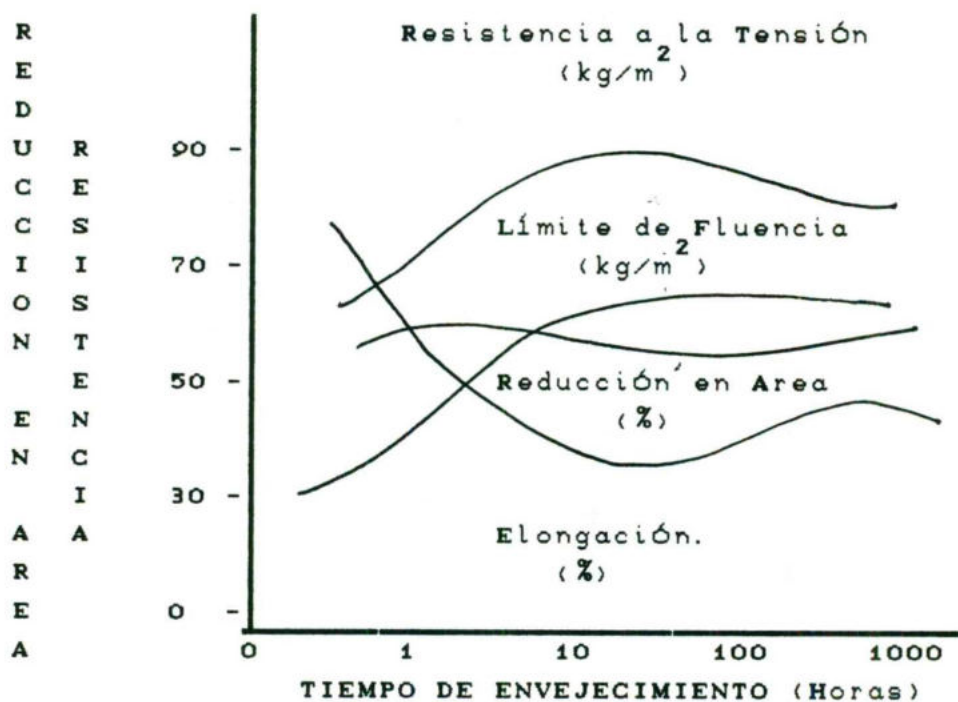


FIGURA 2.15 Acero con 0.03% C envejecido a 60°C.

Reportes previos de Keh y Leslie < 26 > muestran que la resistencia se eleva y la ductilidad decae durante la primera etapa de precipitación, cuando las partículas forman el carburo ϵ y crece. Durante la segunda etapa, la cementita se empieza a formar y el carburo ϵ se redisuelve, correlacionando con la ligera disminución en resistencia y elevando la ductilidad.

2.6 Procesos de Recocido Continuo en el Mundo

Desde que este proceso se adoptó como un proceso industrial, el recocido continuo ha sido modificado muchas veces. Tres modificaciones importantes son discutidas en esta sección, de las cuales dos son relevantes para producir láminas de acero con bajo carbono y calidad estampado profundo.

2.6.1 Proceso BISRA

Se han estudiado y desarrollado varios métodos para reducir el tamaño y el costo en capital con unidades convencionales de recocido continuo por la British Iron and Steel Research Association.

Gibbon < 36 > ha analizado el primer proceso piloto de recocido compacto BISRA en el cual se combinó el calentamiento eléctrico del acero con precalentamientos y subsecuentes enfriamientos rápidos (temple), en una aleación líquida de Plomo-Bismuto.

La primera línea compacta de recocido fue designada en procesos para láminas de acero con 127 mm de ancho y consistía de 2 tanques de acero bajo carbono completamente llenos con un eutéctico (plomo-bismuto), las láminas precalentadas pasan a través del primer tanque y se calientan eléctricamente a la temperatura de recocido antes de ser templadas en el segundo tanque. La figura 2.16 ilustra el proceso.

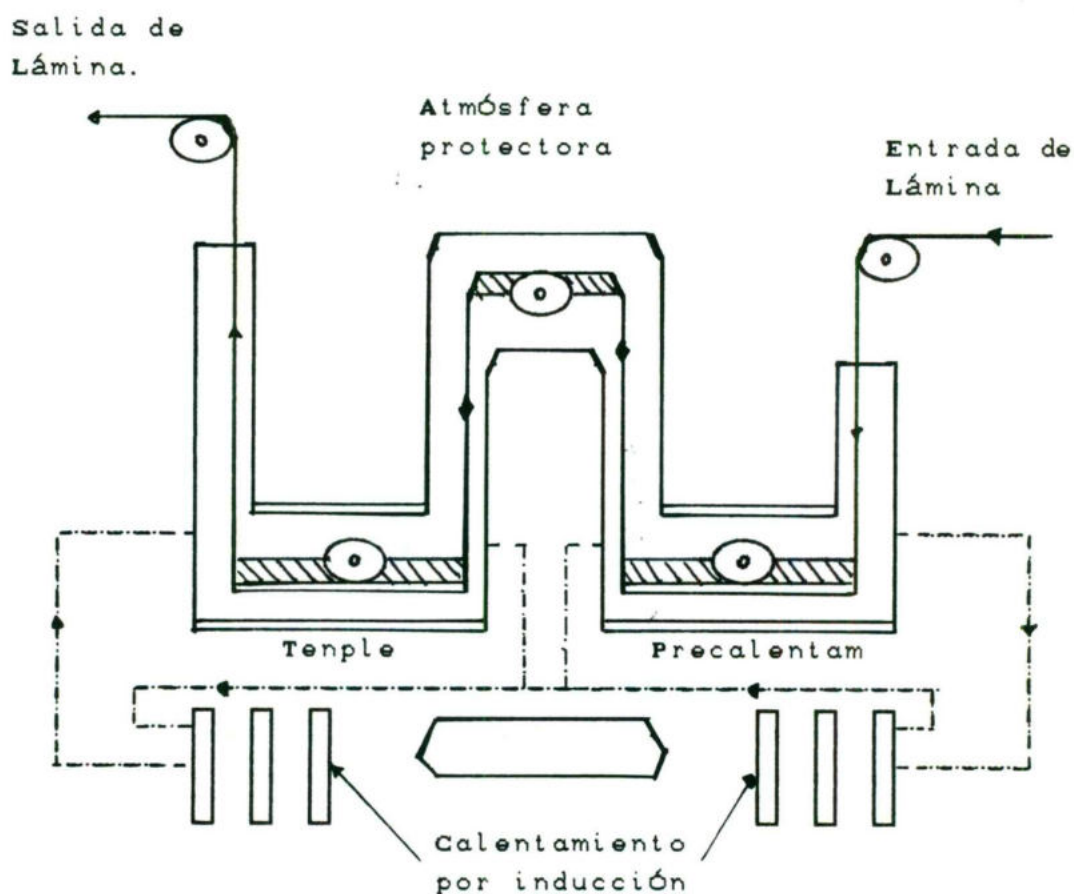


FIGURA 2.16 Proceso BISRA. Arreglo esquemático de la Primera Planta Piloto compacta de Recocido. <36>

Esta planta piloto fue más tarde rediseñada, así que los tanques de precalentamiento y temple fueron en la forma de ductos, reduciendo de esta forma la cantidad requerida de eutéctico plomo-bismuto. Ver figura 2.17

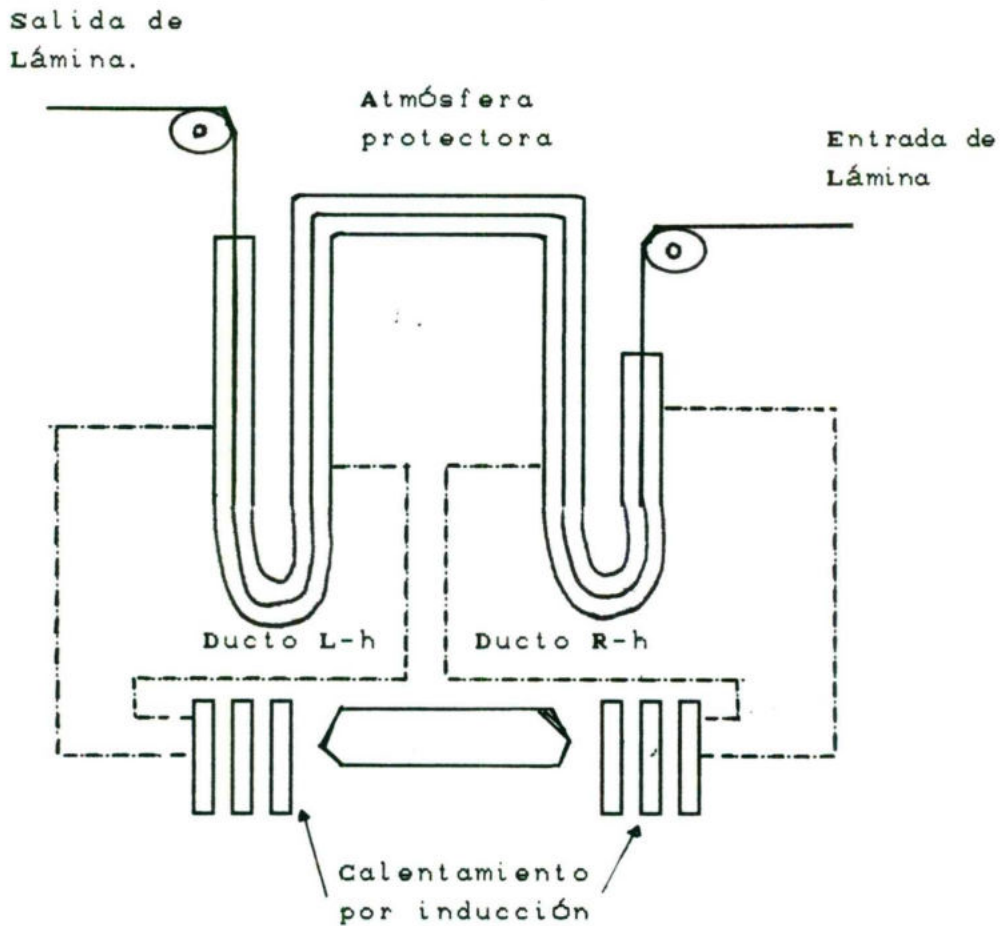


FIGURA 2.17 Proceso BISRA. Arreglo esquemático de la Segunda Planta Piloto compacta de Recocido. (36)

Otras investigaciones < 37-38 > indicaron que el bismuto podría sustituir al plomo-bismuto, como el medio de transferencia de calor, permitiendo así que el ciclo de recocido pudiera ser apreciablemente corto sin afectar la calidad del producto. El uso de sodio líquido como medio de transferencia de calor también se ha estudiado, las ventajas son para pretender rangos de calentamiento y enfriamiento más rápidos, la posibilidad de recuperar casi el calentamiento completo y reducir los requerimientos de espacio en las líneas convencionales de recocido. < 39 >

El proceso de recocido BISRA involucra el calentamiento de láminas reducidas en frío tan rápidamente como es posible a la temperatura de recocido (700°C), templando inmediatamente a una temperatura intermedia (150°C-260°C) y manteniendo a esta temperatura para envejecer al material. Este proceso produce material comparable en propiedades con el material que es recocido continuamente. Como ejemplo, tenemos el material que es adecuado para placas estañadas pero inadecuado para operaciones de conformado.

2.6.2 Proceso CAPL

La tecnología CAPL (Continuous Annealing and Processing Line) fue desarrollada por Nippon Steel Corporation y ha operado desde 1972. < 40-44 > La tecnología fue desarrollada como un intento para producir el recocido continuo de láminas de acero con bajo carbono reducidas en frío, con características de conformado iguales a las obtenidas en el proceso de recocido por lotes.

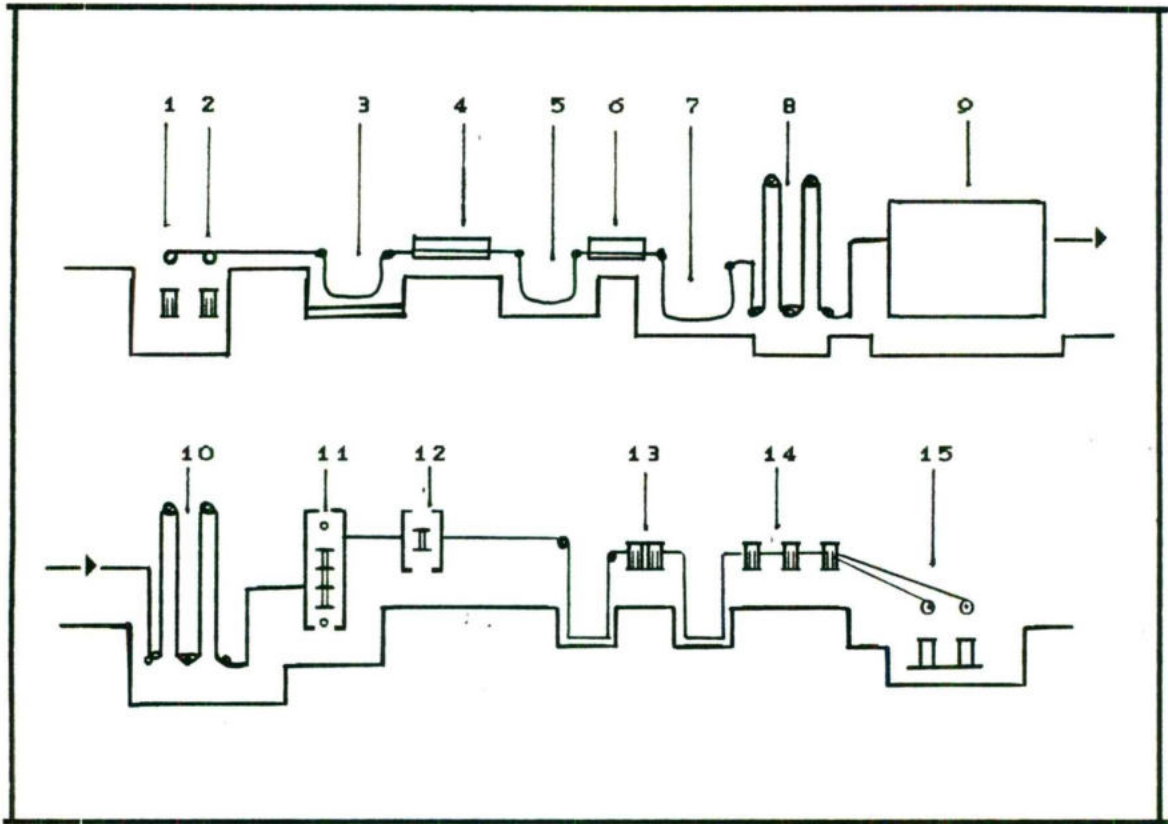
CAPL es una línea de recocido continuo, la cual incorpora las siguientes operaciones: limpieza electrolítica, recocido continuo y envejecimiento, laminado superficial, acabado, e inspección. Las especificaciones de la línea son dadas en la tabla III.

TABLA III

ESPECIFICACIONES PRINCIPALES DE RECOCIDO CONTINUO
Y LINEA DE PROCESO (CAPL). < 43 >

| | |
|-----------------------------|-----------------|
| CAPACIDAD DE PRODUCCION: | 34 000 TON/MES. |
| VELOCIDAD DE LA LINEA: | 200 M/MIN. |
| TAMAÑO DE LA LAMINA | |
| - ESPESOR: | 0.4 - 1.2 MM. |
| - ANCHO: | 750 - 1240 MM. |
| PESO MAXIMO DEL ROLLO: | 45 TON. |
| LONGITUD TOTAL DE LA LINEA: | 291 M. |

El arreglo típico de la línea CAPL es ilustrado en la figura 2.18 y consiste de 4 secciones: limpieza electrolítica, horno, laminado superficial e inspección.



- | | |
|--------------------------------|------------------------------|
| 1. Riel Principal No. 1. | 9. Horno. |
| 2. Riel Principal No. 2. | 10. Torre de Almacenamiento. |
| 3. Limpieza Caustica Caliente. | 11. Laminadora. |
| 4. Cepillado No. 1. | 12. Laminado de Nivelación. |
| 5. Limpieza electrolítica. | 13. Desbastadora. |
| 6. Cepillado No. 2 | 14. Lubricante. |
| 7. Enjuague Caliente. | 15. Enrollado No. 1 y 2. |
| 8. Torre de Almacenamiento. | |

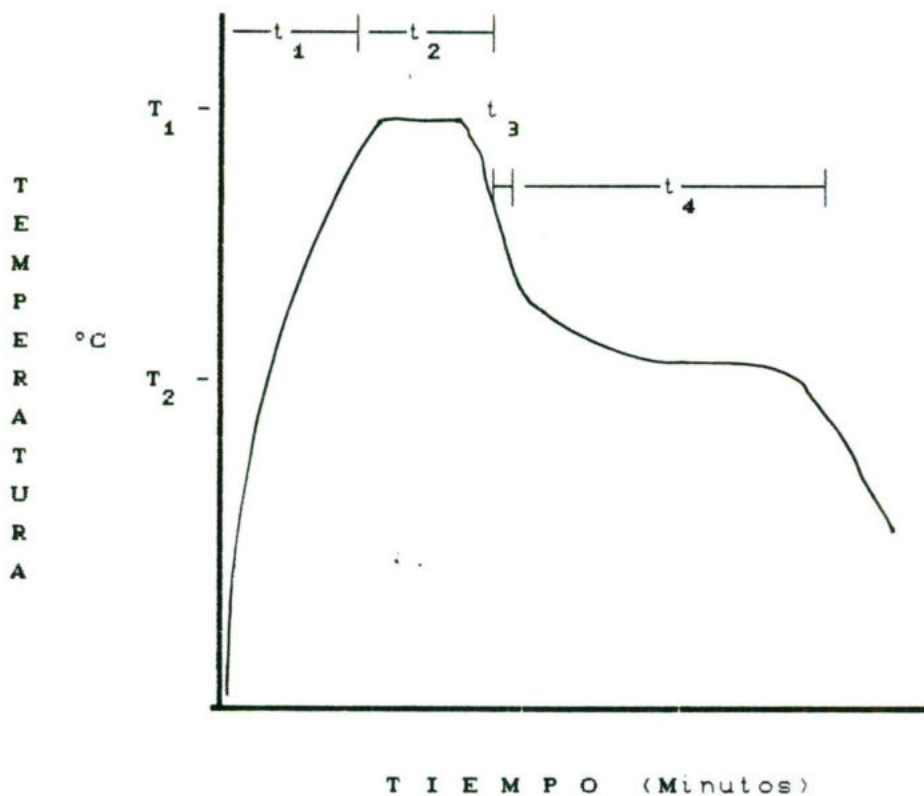
FIGURA 2.18 Arreglo esquemático de la línea CAPL. <40>

Después de la limpieza, la lámina entra a la sección del horno por medio de la torre que tiene una capacidad de almacenamiento de 300m (985 ft) y en seguida del recocido son laminadas superficialmente y niveladas antes de la inspección.

El horno de recocido continuo consiste de las siguientes cámaras conectadas en serie: Una cámara de calentamiento con gas, una de calentamiento eléctrico para permanencia de la lámina, otra de enfriamiento primario con un sistema para extraer el calor en donde la operación se realiza por medio de los efectos de aire-agua, una cámara de envejecimiento en la cual el calentamiento es eléctrico y por último una segunda cámara en donde inicialmente el enfriamiento es forzado por los efectos de aire-agua para que posteriormente la cámara sea mantenida a temperaturas inferiores a 0°C evitando así que la lámina este caliente antes de salir. Si el ciclo de calentamiento fuera profundo, éste podría ser semejante al que se muestra en la figura 2.19.

En la cámara de calentamiento, la lámina alcanza rápidamente una temperatura entre 700°C y 900°C, la operación se efectúa en 2 minutos; posteriormente se pasa a la cámara de permanencia en donde es mantenida por más de 2 minutos a la temperatura de recocido antes de que pase a la zona de enfriamiento primario para que el material llegue rápidamente a la temperatura de envejecimiento; el enfriamiento en ésta zona es de aproximadamente 5-30°C/seg., y el tiempo necesario para que la lámina envejezca a una temperatura entre 300-450°C es de 5 - 8 minutos.

El acero ya envejecido es nuevamente enfriado hasta aproximadamente 50°C en 2 minutos en la segunda cámara de extracción de calor.



Donde:

T_1 = Temperatura de Calentamiento (700 - 800°C)
 T_2 = Temperatura de envejecimiento (300 - 450°C)

t_1 = Tiempo de Calentamiento (2 min).
 t_2 = Tiempo de Permanencia (2 min).
 t_3 = Tiempo de Enfriamiento (15seg.).
 t_4 = Tiempo de Envejecimiento (5 min).

FIGURA 2.19 Ciclo térmico del proceso CAPL. <40>

Una importante restricción del material destinado al proceso CAPL es que debe de tener un contenido bajo en manganeso, ya que un exceso de este elemento resulta perjudicial para producir láminas de acero con calidad estampado profundo en el recocido continuo. Por esta razón el manganeso debe de estar presente solamente en cantidades estequiométricas, para que se combine únicamente con el azufre y el oxígeno. < 41 >

Por lo tanto se deben de considerar las relaciones siguientes:

$$0 \leq [\%Mn] - \frac{\text{Peso atómico de Mn}}{\text{Peso atómico de O}} \times [\%O]$$

$$- \frac{\text{Peso atómico de Mn}}{\text{Peso atómico de S}} \times [\%S] \leq 0.15$$

ó:

$$0 \leq K \leq 0.15$$

Se encontro que el valor " K " podría ser calculado usando la siguiente ecuación empírica:

a) Para aceros calmados :

$$K = \{ \% Mn \} - 55/16 \{ \% O \} - 55/32 \{ \% S \}$$

b) Para aceros calmados con aluminio:

$$K = \{ \% Mn \} - 55/32 \{ \% S \}$$

Una restricción adicional para la lámina en el proceso CAPL es que después de la laminación en caliente, se le da un acaba en frío y posteriormente se enrolla a temperaturas en el rango de 675°C-800°C, como se explicó en la sección 2.5.1 (Primer método). Cuando el material es enrollado en caliente (700°C) después del laminado en caliente (superior a 800°C) produce un tamaño de grano vasto y como consecuencia el material recocido producirá un tamaño de grano vasto después del laminado en frío.

2.6.3 Proceso NKK

Las modificaciones de la línea de recocido continuo desarrolladas por Nippon Kokan K.K de Japón < 45 - 49 >, también pretenden producir láminas con calidad estampado por un control restringido, tanto para el grado de acero como para el proceso.

Una ventaja en la línea NKK es que está arreglada de tal forma para que por un simple interruptor del patrón de alimentación de láminas, también se puedan producir placas estañadas por un ciclo de recocido convencional o láminas con calidad estampado profundo por el ciclo modificado de la NKK. Las principales especificaciones para la línea son detalladas en la tabla IV.

La alimentación de lámina dentro del horno modificado del proceso NKK pasa primero a una zona de entrada normal incorporando facilidades de limpieza. El horno para recocido consiste de 3 regiones que son: calentamiento, envejecimiento acelerado y enfriamiento.

TABLA IV

ESPECIFICACIONES DEL PROCESO NKK

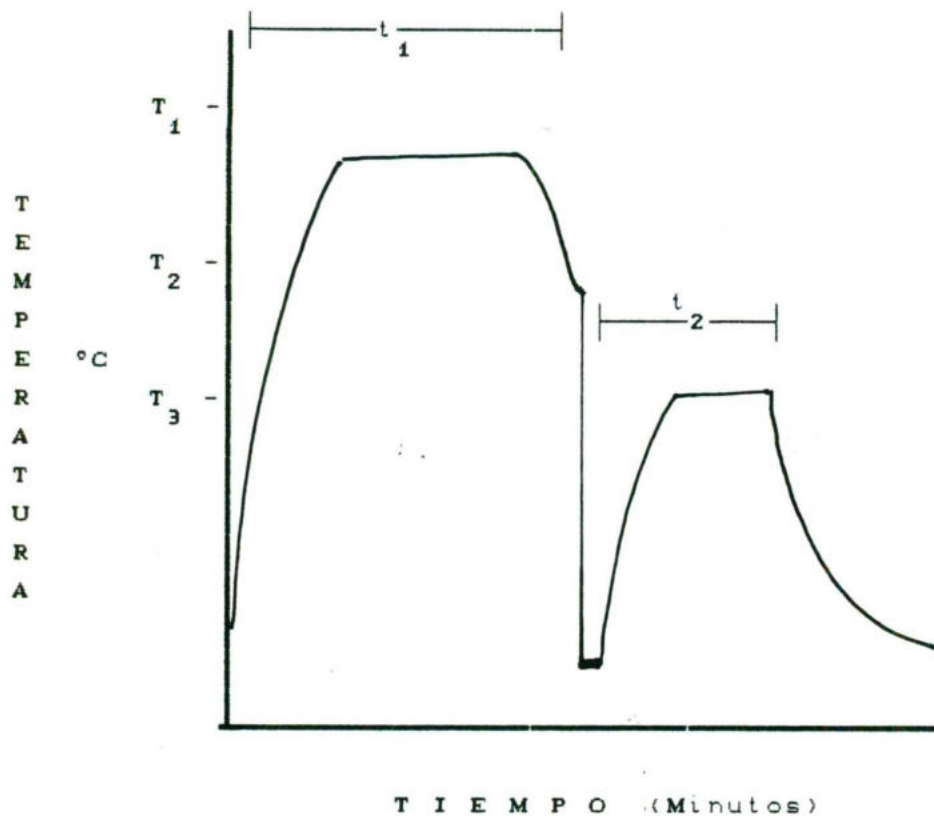
| | | |
|-----------------------|-----------------|-----------------|
| CAPACIDAD NOMINAL: | 32 000 TONS/MES | 43 000 TONS/MES |
| VELOCIDAD DE LINEA: | 572 M/MIN. | 250 M/MIN. |
| TAMAÑO DE LAMINA: | | |
| - ESPESOR: | 0.15-0.6 MM. | 0.4-1.2 MM. |
| - ANCHO: | 457 -1067 MM. | 610-1300 MM. |
| PESO MAX. DEL ROLLO: | 32 TONS. | 32 TONS. |
| LONG. TOTAL DE LINEA: | 131.56 M. | 156.5 M. |

La característica distintiva es que el envejecimiento es precedido por el temple en agua; esto, se hace con un sistema para enfriar mediante dispersión de agua localizado abajo del horno.

El ciclo de calentamiento patrón de este proceso es mostrado en la figura 2.20

Así como con el horno CAPL, el proceso NKK ha sido designado para dar resultados óptimos con láminas de acero de una composición química controlada. De esta manera un método especial fue desarrollado < 49 >, el cual permite que el acero con menos de 0.01% C sea producido.

Esos aceros con contenidos ultra bajos en carbono son laminados en caliente a temperaturas superiores a 650°C y posteriormente enrollados para requerimientos adicionales.



Donde:

- T₁ = Temperatura de calentamiento. (680 - 760°C).
- T₂ = Temperatura de enfriamiento. (450 - 700°C).
- T₃ = Temperatura de envejecimiento. (300 - 500°C).
- t₁ = Tiempo de calentamiento y permanencia. (10 - 300 seg).
- t₂ = Tiempo de envejecimiento. (0 - 150 seg).

FIGURA 2.20 Ciclo Térmico de Recocido Continuo NKK. <48>

Se encontró que el mejor resultado fue obtenido con acero que ha sido desoxidado con aluminio. Con esos pre-requisitos, elementos en solución sólida tales como el C, Mn, N, Al, son minimizados, así que el grano crece después de que el enrollado en caliente ha sido mejorado y la susceptibilidad al envejecimiento del acero es mínima. De tal forma el proceso NKK podría ser descrito como un método para manufacturar en frío láminas con calidad estampado, en el cual se combina un método específico, que es la condición de laminado en caliente y el recocido continuo.

COMPARACION DE LAS MODIFICACIONES DEL PROCESO CAPL Y EL PROCESO NKK EN LAMINAS PROCESADAS CONVENCIONALMENTE

Los investigadores del proceso CAPL y NKK afirmaron que láminas de acero con bajo carbono producidas por sus métodos, tienen propiedades comparables al material producido en recocido por lotes.

Esas afirmaciones están basadas en los datos presentados en la tabla V.

TABLA V

COMPARACION DE LAS PROPIEDADES MECANICAS EN LOS PROCESOS DE:
 RECOCIDO POR LOTES, RECOCIDO CONTINUO,
 PROCESO CAPL Y PROCESO NKK

| PROPIEDAD MECANICA: | LIMITE DE FLUENCIA: (kg/m ²) | RESISTENCIA A LA TENSION: (kg/m ²) | ELONGACION EN 2 IN: (%) |
|------------------------------|--|--|-------------------------------|
| RECOCIDO EN LOTES: (1) | 217 X 10 ⁵ | 361 X 10 ⁵ | 44 |
| RECOCIDO CONTINUO: (2) | 448 X 10 ⁵ | 446 X 10 ⁵ | 20 |
| PROCESO CAPL: (3) | 215 X 10 ⁵ | 359 X 10 ⁵ | 44.2 |
| PROCESO NKK: (4) | 241 X 10 ⁵ | 360 X 10 ⁵ | 45 |

- (1) Nippon Steel Corporation. (40)
 (2) Steel Company of Wales. (13)
 (3) Nippon Steel Corporation. (40)
 (4) Nippon Kokan Kabushiki Kaisha. (50)

La operación del recocido por lotes (recocido de rollo cerrado y recocido de rollo abierto) involucra muchos procesos consecutivos, tales como el enrollado después del laminado en frío, desenrollado para limpieza electrolítica, enrollado para tratamiento térmico, desenrollado para laminación superficial y finalmente enrollado para embarque.

Tales proceso separados requieren maquinaria pesada en el manejo de los rollos, además de espacio para almacenaje de los mismos.

La necesidad de esas operaciones separadas y los tiempos implicados en el proceso de recocido por lotes, frecuentemente superiores a una semana, dan tiempos de proceso largos desde que el acero llega en la condición de trabajado en frío, hasta que esta listo para embarque, por lo que el recocido por lotes es una operación de baja productividad.

En el proceso de recocido continuo, esencialmente las mismas operaciones son involucradas, como limpieza electrolítica, laminación superficial, etc., pero las operaciones de enrollado y desenrollado son eliminadas y con ellas el problema del manejo de rollos, almacenaje, etc.

Como un resultado en las operaciones continuas, se involucran tiempos de proceso cortos. Los ciclos de recocido continuo son en el orden de 2 minutos, así que el recocido continuo es una operación productivamente alta.

Otros problemas que se presentan en el material durante el recocido por lotes, como rugosidad, pandeo, rechazos, incrustaciones de arena, sobrecalentamientos localizados, laminación pobre, etc., son eliminados o reducidos en operaciones de recocido continuo.

Como un resultado de las grandes masas de acero involucradas en el recocido por lotes, los rangos de calentamiento son lentos permitiendo que el material recristalice a un tamaño de grano grande y los rangos de enfriamiento empleados (tiempos largos) a temperaturas altas favorece la precipitación de carburos.

Las características que da el proceso de recocido por lotes, permite la producción de acero con excelente formabilidad, tal como la que es requerida en la industria automotriz.

Por el contrario, el proceso de recocido continuo involucra rangos de calentamiento extremadamente altos, causando que el acero recristalice a un tamaño de grano muy fino, provocando que el material sea muy rígido y que tenga una dureza mayor que el material que es recocido por lotes.

Es característico en este proceso el enfriamiento rápido, lo cual ocasiona que suficiente carbono permanezca en solución sólida y que el producto tenga un alto grado de susceptibilidad al envejecimiento, resultando de tal forma que el material no tenga buenas propiedades mecánicas y que el proceso de recocido continuo sea limitado a la producción de material específico.

Los principales obstáculos para la aplicación exitosa del proceso de recocido continuo para la producción de láminas de acero con bajo contenido en carbono y con calidad estampado profundo son metalúrgicos. Específicamente esos obstáculos son:

- a). El problema de controlar la composición química y el grado de reducción en frío del material.
- b). El problema de obtener un tamaño de grano grande, y
- c). El problema de la precipitación de bastante carbono desde la solución sólida en ferrita para eliminar o reducir por lo menos los efectos del envejecimiento.

Normalmente, el acero de bajo carbono laminado en frío, es duro y frágil para la mayoría de las operaciones de conformado en frío. Sin embargo, si las láminas son recocidas abajo de la temperatura de 600°C, un reemplazamiento total de la estructura deformada por el grano recristalizado ocurrirá en segundos, de tal modo, se impartirá un grado razonable de ductilidad. Si en adición, la lámina es enfriada desde la temperatura de recocido, en un período de tiempo extendido (aproximadamente 10 segundos) se precipita suficiente carbono para dar un material el cual es razonablemente resistente a los efectos de envejecimiento.

Las limitaciones del recocido continuo llegan a ser evidentes cuando los productos de acero con bajo carbono requieren extremados grados de formabilidad y resistencia al envejecimiento.

La tabla VI resume los efectos de las características del proceso sobre las propiedades del material y su adecuabilidad para operaciones de conformado.

Se han realizado continuos esfuerzos para corregir o mejorar las líneas de recocido, que son el resultado del desarrollo de varios procesos patentados.

El método BISRA intenta solamente mejorar el recocido continuo para la producción de placas estañadas. El proceso CAPL y el proceso NKK representan intentos para producir acero con calidad de estampado profundo por prácticas de recocido continuo.

Sin embargo, los métodos más recientes atienden a las prácticas con un control limitado de la composición química y del laminado en caliente. El enrollado en caliente después del laminado en caliente tiene efectos indeseables para la producción de carburos vastos que no pueden ser dispersados por subsecuente laminación en frío y el control limitado necesariamente de la composición química, específicamente en el proceso NKK es inconveniente.

Todas las modificaciones sugeridas, con la excepción de la reducción de carbono a niveles extra-bajos, en el proceso NKK, pretenden alcanzar un tamaño de grano grande a pesar de los rangos de calentamiento rápidos empleados en el recocido continuo.

TABLA VI

CARACTERISTICAS DEL RECOCIDO POR LOTES Y DEL
RECOCIDO CONTINUO CONVENCIONAL

| RECOCIDO POR LOTES | | RECOCIDO CONTINUO | |
|--|--------|------------------------------|---------|
| CALENTAMIENTO LENTO: | | CALENTAMIENTO RAPIDO: | |
| Tamaño de Grano | Vasto | Tamaño de Grano | Fino |
| Elongación | Grande | Elongación | Pequeña |
| YS | Bajo | YS | Alto |
| UTS | Baja | UTS | Alta |
| ENFRIAMIENTO LENTO: | | ENFRIAMIENTO RAPIDO: | |
| Susceptibilidad al | | Susceptibilidad al | |
| Envejecimiento | Baja | Envejecimiento | Alta |
| FORMABILIDAD: | Buena | FORMABILIDAD: | Pobre |
| <p>YS : Límite de Fluencia.</p> <p>UTS : Resistencia a la Tensión.</p> | | | |

Sin embargo, existe ya otro método para alcanzar un tamaño de grano vasto en el recocido, uno de los cuales es independiente tanto de la composición química como de la temperatura de enrollado en caliente. Este método es el grado de deformación previa al recocido. La fuerte influencia de la deformación previa sobre el tamaño de grano final es bien conocida.

Aún no se han hecho serios intentos para investigar la integración y regulación de la deformación previa dentro del ciclo de recocido continuo. Una objeción que puede hacerse es que podría ser costoso recocer una lámina, deformarla a un grado controlable y recocerla nuevamente, pero esta objeción debe de ser firme contra el costo del control limitado de la composición química de manganeso, oxígeno, azufre, en el proceso CAPL, o contra el costo de equipo pesado y complicado como en el proceso NKK.

De aquí que el siguiente trabajo experimental representa un paso inicial en la formulación del ciclo de recocido continuo, en el cual la reducción previa será el factor crítico determinante para el tamaño de grano y de esta forma también para las propiedades mecánicas finales.

CAPITULO III

3.0 Introducción

El material que se empleó para la investigación fueron láminas de acero con bajo carbono y deformadas plásticamente en el rango de 60 - 70%. El modelo experimental para someter al material mencionado al proceso de recocido continuo consta de 3 etapas, las cuales se describen a continuación:

a) Tratamiento Térmico de Recocido Subcrítico (Recristalización I).

El tratamiento se dió con el fin de recristalizar completamente a las muestras y consistió en calentar el material a una temperatura aproximada de 600 -700°C, dando un tiempo de permanencia adecuado, a manera de segundos y enfriando rápidamente (temple en agua con hielo) para inhibir el envejecimiento. Aquí el tamaño de grano puede ser tan fino como sea posible para asegurar una cantidad mínima de deformación.

De los especímenes de este tratamiento se compararon dos muestras, una muestra con un tamaño de grano aproximadamente dos veces mayor que la otra muestra.

b) Deformación Intermedia en Frío. Los especímenes resultantes de las dos clases de material fueron deformados por laminación para incrementar la deformación arriba de la inestabilidad plástica. Se utilizó la deformación por laminación para producir la deformación intermedia, ya que se encontró que podría

ser muy controlable para obtener especímenes con un espesor determinado.

c) Tratamiento Térmico de Recocido Final (Recristalización II).

A los especímenes deformados por laminación se les dió un tratamiento de recocido final, también para recristalizar completamente a las muestras. El tratamiento consistió en calentar el material a una temperatura elevada, pero por supuesto menor a 723°C, dando un tiempo de permanencia corto y un enfriamiento lento (aire). Todo esto para asegurar las mejores propiedades mecánicas deseables en el material.

Después de que el material paso por las 3 etapas anteriores, las muestras fueron ensayadas y examinadas metalográficamente, determinando así las propiedades mecánicas empleando procedimientos estándar.

Como un avance de los resultados obtenidos se mostró que altos niveles de deformación intermedia que habían sido inicialmente planeados podrían ser necesarios para obtener un amplio rango de grano recristalizado.

3.1 Características y/o Propiedades del Material

El material de inicio para los experimentos fueron láminas de acero probablemente calado con aluminio, proporcionado en forma de rollos por la línea de producción normal de Altos Hornos de México, S.A de C.V..

La condición del acero proporcionado fue como deformado en frío en el rango de 60 - 70 % a un espesor de 0.8797 mm (0.0346 in).

Este material se empleó para la fabricación de acero con calidad estampado comercial. El acero cumple con los requerimientos de un material AISI 1005. < 51 > El análisis químico del acero se realizó en el Laboratorio de Pruebas y Ensayos de México (LAPEM), C.F.E.. Los resultados del análisis son mostrados en el reporte adjunto.

La tabla VII compara los resultados obtenidos del análisis químico del material empleado para la investigación con el análisis químico de un acero SAE 1005.

COMISION FEDERAL DE ELECTRICIDAD LABORATORIO

Av. APASEO DTE S/N CD. INDUSTRIAL
COD. POSTAL 36630 APDO. POSTAL 612
IRAPUATO, GUANAJUATO, MEXICO

OFICINA DE QUIMICA ANALITICA (G3233)
SECCION DE ANALISIS QUIMICO DE METALES

IDENTIFICACION: LAMINA No. 1 DE ACERO AL CARBON

EXPEDIENTE: 5XL

PROCEDENCIA: SRTA. MARICELA TALAVERA

ANÁLISIS No.: S/N - Q - 91

FECHA: 91/10/30

ANÁLISIS QUÍMICO


METODO DE PRUEBA: NOM B 1-1986

ESPECIFICACION: AISI 1005

| CONDICIONES AMBIENTALES DE PRUEBA | ELEMENTO ANALIZADO | EQUIPO EMPLEADO | RESULTADO | EXPRE- SADO EN % DE | VALOR LIMITE DE LA NORMA | |
|-----------------------------------|--------------------|----------------------------|-----------|---------------------|--------------------------|-------|
| | | | | | Min | Max |
| Ts°C PmmHg %Hum | | | | | | |
| 23 621 48 | CARBON | LECO CS-24 | 0.043 | C | ----- | 0.06 |
| 23 621 48 | AZUFRE | LECO CS-244 | 0.027 | S | ---- | 0.050 |
| 23 621 48 | FOSFORO | ESPECTROFOT. EVANS SPECTRA | 0.009 | P | ---- | 0.040 |
| 23 621 48 | MANGANESO | ESPECTROFOT. EVANS SPECTRA | 0.26 | Mn | ---- | 0.35 |
| 24 622 56 | SILICIO | MUFLA BLUE-M. RAD-0-GLOW | 0.005 | Si | ---- | ---- |
| 23 621 48 | CROMO | BURETAS KIMAX 17029 | 0.0 | Cr | ---- | ---- |
| 24 622 56 | NIQUEL | pH METRO L - N 7415 | 0.0 | Ni | ---- | ---- |
| 24 621 43 | MOLIBDENO | ESPECTROFOT. EVANS SPECTRA | 0.02 | Mo | ---- | ---- |

OBSERVACIONES: LA MUESTRA CUMPLE CON LOS REQUERIMIENTOS QUIMICOS DE UN MATERIAL AISI 1005.


ANALIZO
I. Q. GERARDO BARAJAS M.
SILVIA ARAUJO


REVISO
I. Q. JUAN F. SALDAÑA

+

JEFE DE OFICINA
I. Q. MARCO POLO CUEVAS

NOTA: ESTE INFORME NO DEBE DE SER REPRODUCIDO EN FORMA PARCIAL O TOTAL SIN LA AUTORIZACION PREVIA DEL LABORATORIO DE CFE

TABLA VII

COMPOSICION QUIMICA DEL MATERIAL

| LAPEM (C. F. E.) | | SAE 1005 | |
|--------------------|----------|-----------|------|
| % EN PESO | ELEMENTO | % EN PESO | |
| 0.043 | C | 0.060 | MAX. |
| 0.260 | Mn | 0.350 | |
| 0.009 | P | 0.040 | MAX. |
| 0.027 | S | 0.050 | MAX. |
| 0.005 | Si | ---- | |
| ---- | Cu | ---- | |
| ---- | Ni | ---- | |
| ---- | Cr | ---- | |
| ---- | Sn | ---- | |
| BALANCE | Fe | BALANCE | |

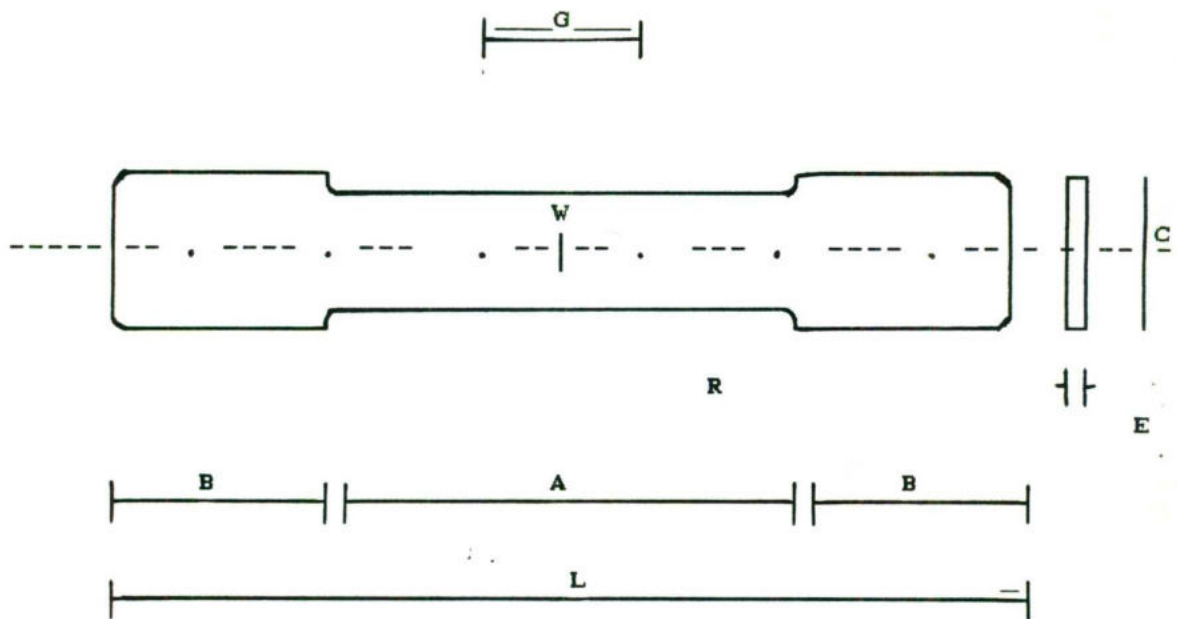
3.2 Preparación de Muestras
3.2.1 Recristalización I

Se cortaron especímenes rectangulares del rollo (5 cm x 2.5 cm), la dimensión longitudinal del espécimen fue paralela a la dirección de laminación. Estas muestras se trataron térmicamente por recocido subcrítico. La variación que se hizo a este tratamiento fue de que se emplearon enfriamientos bruscos (temple en agua con hielo), con el fin de que el envejecimiento fuera inhibido en los especímenes. Las muestras resultantes en esta etapa fueron empleadas para ensayos de dureza y estudios metalográficos.

Por otro lado, se cortaron de las láminas especímenes para ensayos de tensión y también la dirección de laminado fue paralela a la longitud de la muestra. El espécimen para la prueba de tensión fue elaborado en un "Tensilkut" de acuerdo con la especificación ASTM E8- 61T. < 52 >

La figura 3.1 muestra el espécimen estándar para ensayos de tensión, además se listan las dimensiones para piezas de prueba con una longitud normal de 2 pulgadas en la sección de prueba, las cuales fueron empleadas para la investigación.

* La ductilidad de la lámina de acero es medida por la elongación total o elongación uniforme y generalmente es ligeramente más grande en la dirección de la laminación que en la dirección transversal.



Donde:

| | | | |
|----|-----------------------------------|-----------------|-----|
| G: | Longitud entre marcas: | 50.0 ± 0.10 | mm. |
| W: | Ancho: | 12.5 ± 0.25 | mm. |
| E: | Espesor: | 0.8797 | mm. |
| R: | Radio de la sección reducida: | 13.0 | mm. |
| L: | Longitud total de la probeta: | 200.0 | mm. |
| A: | Longitud de la sección reducida: | 60.0 | mm. |
| B: | Longitud de la sección de agarre: | 50.0 | mm. |
| C: | Ancho de la sección de agarre: | 20.0 | mm. |

FIGURA 3.1 Espécimen rectangular estándar utilizado para ensayos de Tensión. (52)

El área de la sección transversal del espécimen se calculó por lo menos para 3 veces el ancho de la muestra y el espesor medido se tomó de la sección reducida de la muestra (sección A de la figura 3.1), cada valor fue el promedio de dos lecturas.

3.3 Procedimiento Experimental
3.3.1 Recristalización I

El objetivo del primer tratamiento de recocido (Recristalización I) fue para producir un material completamente recristalizado y proveer particularmente dos tamaños de grano estándar. Para esto fue necesario establecer el rango de temperaturas en el cual el material reducido en frío recristalizaría completamente y así poder escoger la temperatura de recristalización adecuada.

Los experimentos de este tratamiento térmico se realizaron utilizando especímenes rectangulares que fueron cortados de la lámina. Los especímenes se colocaron en bolsas de acero y estas se cerraron, las bolsas se abrieron y cerraron por lo menos 3 veces para efectuar un cierre hermético, de esta manera el material fue introducido al horno en donde iniciaría el ciclo térmico de recocido.

En este punto se comprobó la temperatura de trabajo del horno Lindberg con rango de trabajo de 200-1200°C, a una temperatura de 1000°C, teniendo una variación de $\pm 2^\circ\text{C}$ con un termopar Cromel-alumel. El registro de temperaturas se hizo con un indicador digital tomándose medidas en toda la cámara del horno y encontrándose uniformidad en ésta.

Se realizaron una serie de tratamiento térmicos de recocido en un amplio rango de temperaturas y por un tiempo de recocido de 20 a 60 minutos, hasta que se encontró la temperatura en la cual el material recrystaliza completamente. Una vez finalizado el intervalo de tiempo deseado, las bolsas de acero conteniendo el material de estudio se enfriaron rápidamente (temple en agua con hielo).

Las muestras resultantes de este ciclo térmico fueron empleadas para ensayos de dureza con el fin de establecer la temperatura de recrystalización óptima. Ver sección 3.4.1

Los valores de dureza de 3 especímenes después de cada tratamiento de recrystalización se promediaron para obtener un valor de dureza total para cada temperatura de recocido. Las temperaturas de recrystalización fueron establecidas trazando los valores de dureza contra las temperaturas de recocido.

Una vez determinado el rango de temperaturas de recocido en el cual el material recrystaliza completamente, fue necesario establecer el tiempo mínimo para producir un material completamente recrystalizado.

En esta etapa también se efectuaron tratamientos de recocido en el rango de 600-700°C, por un período de tiempo de recocido de 2-8 minutos, y para averiguar el tiempo óptimo a la temperatura de recrystalización de 700°C, se realizaron varios tratamientos isotérmicos. Como antes se volvió a medir la dureza después del recocido y el tiempo de recocido fue establecido trazando los valores de dureza contra el logaritmo del tiempo de recocido.

Cabe mencionar que una ventaja que se observó al usar las envolturas de acero fue de que además de proteger al material de trabajo, cuando las envolturas eran cerradas apropiadamente, neutralizaban el efecto atmosférico, minimizando así la oxidación superficial del espécimen.

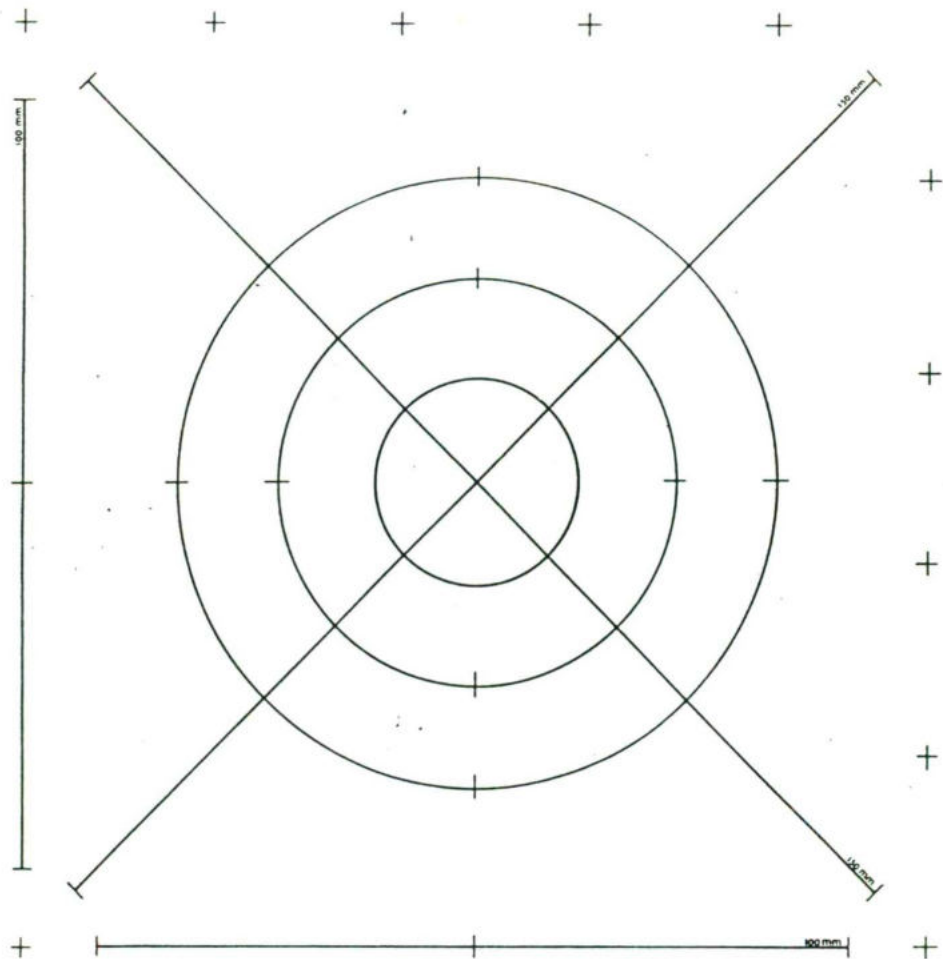
3.3.2 Deformación Intermedia
3.3.2.1 Recristalización

El objetivo del tratamiento de recristalización I fue la producción de especímenes con un tamaño de grano recristalizado particular. A estas muestras se les dió una deformación intermedia (deformación por laminación), antes del recocido final, recristalización II.

Para investigar el efecto producido para diferentes cantidades de deformación, se tronaron especímenes para medir la deformación producida para cualquier carga.

La deformación o elongación son medidas en una longitud normal establecida y que generalmente es de 2 pulg., por el extensómetro y los valores son leídos directamente de la gráfica Esfuerzo-Deformación.

La deformación unitaria puede determinarse dividiendo la variación de longitud medida entre la longitud inicial marcada en la probeta.



Donde:

| Círculo | Circunferencia | Diámetro. |
|---------|----------------|-----------|
| 1 | 83.3 | 26.53 |
| 2 | 166.7 | 53.05 |
| 3 | 250.0 | 79.58 |

FIGURA 3.2 Patrón de Prueba para medición del tamaño de Grano
<53>

Después de haber obtenido el valor de deformación deseable, la muestra se guardó nuevamente en la envoltura de acero para colocarla en el horno e iniciar el segundo tratamiento térmico de recocido (Recristalización II). Este proceso se realizó en el rango de temperaturas de 610 - 715°C por un tiempo constante de 10 minutos. Después de finalizado el tiempo de recocido, el espécimen se enfrió al aire y se determinaron sus propiedades mecánicas.

3.4 Ensayos Realizados

3.4.1 Ensayos de Dureza

La dureza fue medida con una Máquina de Prueba de Dureza Superficial Rockwell en la escala R 15-T y R 30-T. Un promedio de 10 lecturas por espécimen fueron reportadas como la dureza real del espécimen.

3.4.2 Ensayos de Tensión

Todos los ensayos se realizaron a temperatura ambiente en una Máquina de Prueba Universal, utilizando probetas preparadas específicamente de acuerdo a la norma ASTM E8-61T. La sección ancha de la probeta se colocó en las cabezas de la Máquina de prueba y la velocidad contra-cabeza fue de 12.700 m/min.. Las cargas se midieron con un Instron estándar GR de 9080 Kg. de carga por celda, mientras que las extensiones fueron medidas con un extensómetro designado para 2 pulg. de sección efectiva.

El movimiento contra cabeza de la Instron, el cual fue equipado con un control digital que podría ser ajustado y leído a ± 0.002 pulg., fue usado para calibrar el extensómetro.

Tal extensómetro dió un error de $\pm 0.1\%$ (para una sección efectiva del espécimen de 2 pulg.) para todos los cálculos del porcentaje de elongación.

Se obtuvo un registro en gráficas de carga contra variación de longitud para cada prueba, usando un sistema coordinado X-Y a la mayor sensibilidad consistente, con un tamaño limitado de gráficas.

El extensómetro registró la prueba completa: la zona elástica, la zona plástica, y el punto de ruptura.

La elongación total y uniforme fueron leídas directamente de la gráfica registrada. La carga límite (tomada como 0.2% que corresponde a una elongación señalada previamente para los metales), y la carga máxima, fueron divididas por el área de la sección transversal original de la probeta, para obtener la resistencia a la fluencia o límite aparente de elasticidad y la resistencia a la tensión.

Se promediaron respectivamente, la resistencia a la fluencia, la resistencia a la tensión, la elongación total y la elongación uniforme para dos especímenes ensayados de cada combinación de deformación intermedia y temperatura de recocido para dar el resultado final para cada condición.

3.4.3 Metalografías

De las probetas preparadas para ensayos de tensión se seleccionaron muestras que fueron cortadas de acuerdo a la dirección de la laminación, longitudinalmente, cuidando de que el corte no fuera realizado en la sección efectiva de la probeta.

El corte debería realizarse en la sección ancha de la probeta, percatándose además de que la probeta seleccionada para el corte no estuviera dañada, esto es que no estuviera deformada.

La muestra seleccionada fue montada en baquelita (resina plástica) y preparada para observación metalográfica. La muestra se desbastó con lijas de carburo de silicio de los siguientes números: 100, 240, 320, 400, 500 y 600.

En seguida la muestra se pulió sobre un paño Microcloth, inicialmente con pasta de diamante de 5 micrones, continuando con pasta de diamante de 1 micrón y finalmente se utilizó alúmina de 0.05 micrones para obtener la superficie a espejo generalmente requerida en la preparación de la probeta.

El espécimen fue atacado para revelar la microestructura con nital al 4% (4 ml de ácido nítrico en 96 ml de alcohol etílico), se observó al microscopio y se procedió a tomar fotografías de 5 campos distintos de la muestra, a un número de aumentos adecuado, utilizando procedimientos estándar.

3.4.4 Metalografía Cuantitativa

Para estimar el tamaño de grano del material que fue tratado térmicamente por recocido final (recristalización II), se realizó un exámen metalográfico cuantitativo sobre las muestras que fueron preparadas de acuerdo a la sección 3.4.3.. Para tal fin se empleo el método del intercepto de los 3 círculos y el número de aumentos para cada muestra fue seleccionado de acuerdo al método empleado (NORMA ASTM E-112). < 53-54 >

De acuerdo con la designación E-112, el patrón de prueba consiste de 3 círculos concéntricos e igualmente espaciados teniendo una circunferencia total de 500 mm., como se muestra en la figura 3.2.

El patrón de prueba se aplicó a 5 campos escogidos al azar y ampliamente separados, se registró el conteo de interceptos por patrón para cada uno de los 5 campos y se determinó de esta forma el tamaño de grano promedio (No. ASTM, o distancia media de interceptos \bar{l}) y el límite de confianza. En el evento en el cual el límite de confianza fue inadecuado se hicieron pruebas adicionales hasta que el límite de confianza calculado para la combinación de datos fue satisfactorio.

La estimación del tamaño de grano es incompleta sin una determinación de la precisión con la cual el tamaño de grano representa el promedio actual del tamaño de grano del espécimen examinado. Por lo tanto y de acuerdo con la práctica ingenieril, el 95% del límite de confianza fue establecido para cada medición del tamaño de grano.

3.5

Deformación Intermedia por Laminado

Se observó de acuerdo a los experimentos realizados que grandes cantidades de deformación, más allá del límite de la inestabilidad plástica, necesitaban ser investigados. Por consecuencia un grupo de muestras recristalizadas con un tamaño de grano inicial, T.G.I fueron reducidas por laminación. Esos especímenes se deformaron hasta que sus espesores se redujeron en el rango de 20 - 30%.

Las condiciones de la laminación fueron: velocidad de los rodillos 5 r.p.m., con rodillos de trabajo de 19.05 mm de diámetro. Además de que las pruebas de la laminadora se hicieron con rodillos de apoyo y sin ellos.

Después de efectuarse la reducción en frío, el espécimen se recristalizó en el rango de temperaturas de 610 - 715°C por 10 minutos, enfriándose al aire. Una vez terminado el ciclo térmico los especímenes fueron ensayados en tensión y se examinaron metalográficamente de acuerdo al procedimiento descrito en la sección 3.4.

CAPITULO IV

4.0 Resultados Experimentales

4.1 Introducción

El objetivo primordial de este trabajo de investigación es conocer los efectos en las propiedades mecánicas que el proceso de recocido continuo ejerce sobre las láminas de acero con contenido bajo en carbono y compararlas con las propiedades que tiene un material que ha sido tratado térmicamente por el proceso de recocido por lotes. Además de que se pretende restaurar la ductilidad perdida en los productos que han sido deformados en frío.

Por tal razón, a continuación se presentan una serie de resultados experimentales, resumidos y ordenados de una manera análoga para que puedan ser empleados para describir el procedimiento experimental.

Primeramente se presentan los resultados obtenidos del tratamiento de recocido subcrítico (recristalización I) que fueron usados para establecer los parámetros del recocido. Posteriormente se presentan los resultados de la deformación intermedia junto con los resultados del tratamiento de recocido final (recristalización II). También se presentan de una forma clara, breve y sencilla los resultados de los ensayos de tensión que mostraron el efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre las propiedades mecánicas del material después del tratamiento de recristalización II.

Se hace un enfoque principal en el efecto producido por la deformación intermedia y el tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final, presentándose una serie de fotomicrografías que tienen un doble objetivo:

- a). Documentar la estructura recristalizada y,
- b). Relacionar el tamaño de grano final con las propiedades mecánicas del material.

4.2 Recristalización I

En la figura 4.1 se muestran los resultados de dureza de muestras rectangulares, que se encontraban inicialmente deformadas en frío contra diferentes temperaturas de recocido y durante tiempo constante de 10 minutos. En la gráfica puede verse que el valor de dureza del material destinado para la investigación (acero bajo carbono y reducido en frío), es de 78 R 30-T y este valor de dureza fue retenido hasta que el material alcanzó la temperatura de recocido de 500°C, después de esta temperatura hubo un cambio apreciable en dureza.

Se notó que con un incremento de aproximadamente 100°C a partir de la temperatura de recocido de 500°C (aproximadamente 600°C), la dureza decae cerca de 25 puntos. Incrementos adicionales en temperatura no tienen influencia drástica sobre la dureza, por lo que los valores de dureza siguen disminuyendo ligera y gradualmente. Incrementos en el tiempo de recocido superiores a 60 minutos no tienen efecto significativo en los resultados de dureza.

La disminución significativa en los valores de dureza que tuvieron lugar en el rango de temperatura entre 500-600°C, se relacionó directamente con un cambio en la microestructura. Como se sabe, un material trabajado en frío presenta un grano altamente distorsionado, por lo que puede decirse que en el rango de temperaturas anteriormente señalado toma lugar la recristalización, y es aquí donde se reemplaza la red cristalina deformada por nuevos granos libres de deformación.

No obstante, el material recristalizó completamente cuando fue calentado por encima de la temperatura de 600°C por un período de tiempo de 10 minutos.

Por otro lado, la figura 4.2 muestra los resultados de dureza de muestras deformadas y que fueron recocidas a la temperatura indicada por períodos de tiempo de 2 a 10 minutos. En la figura se ve que para todas las temperaturas investigadas, los valores de dureza después del recocido estuvieron cerca de 50-60 R 30-T, los cuales corresponden a un material recristalizado. (Ver figura 4.1)

En resumen el rango de temperaturas en el recocido para producir un material recristalizado para tiempos cortos (~ 5 minutos) es de 600-700°C (sin llegar a la temperatura de transformación ferrita-austenita, 723°C).

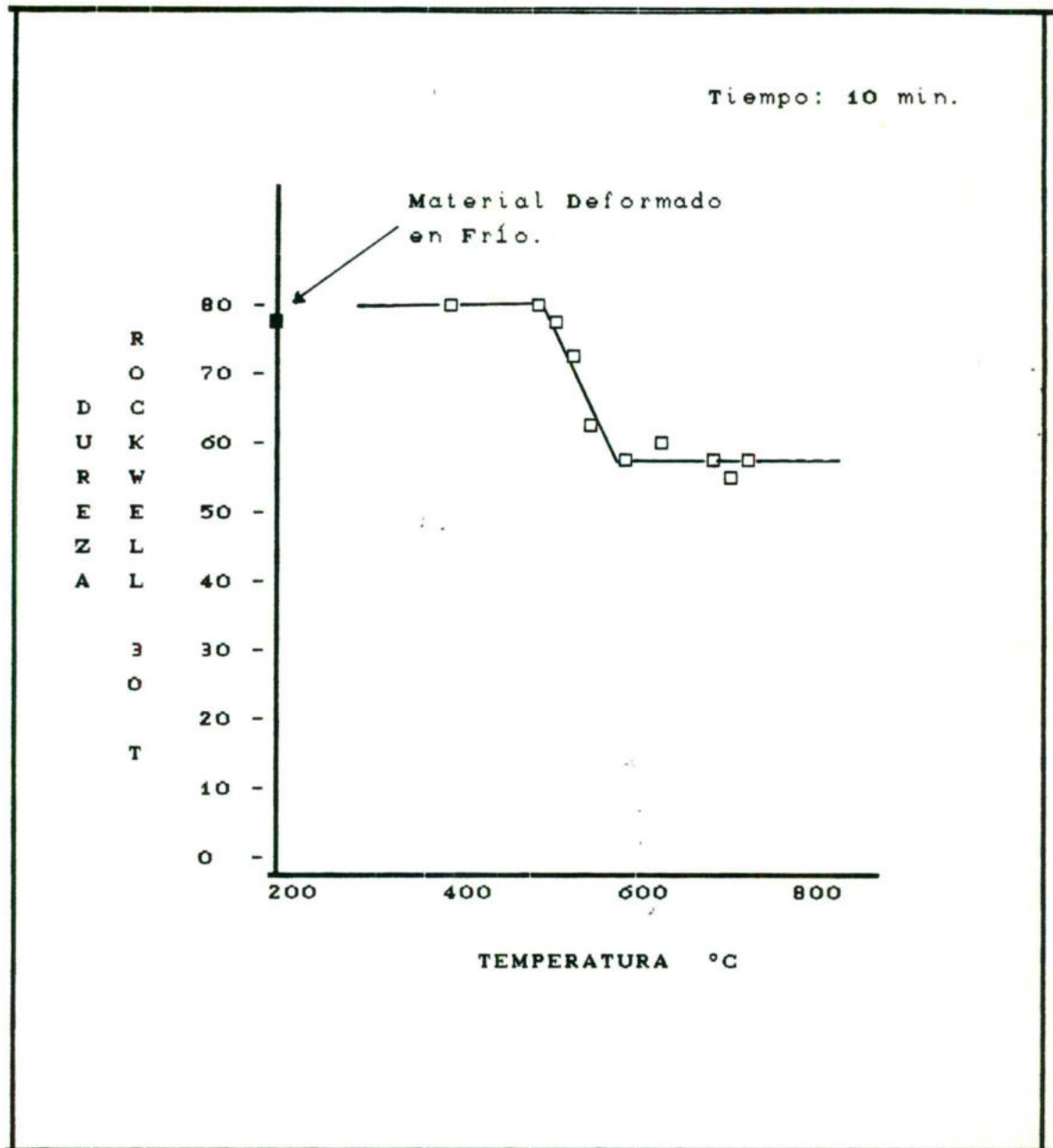


FIGURA 4.1 Efecto de la temperatura de recocido sobre la dureza superficial de Láminas de acero con bajo carbono y deformadas en frío ente 60-70%.

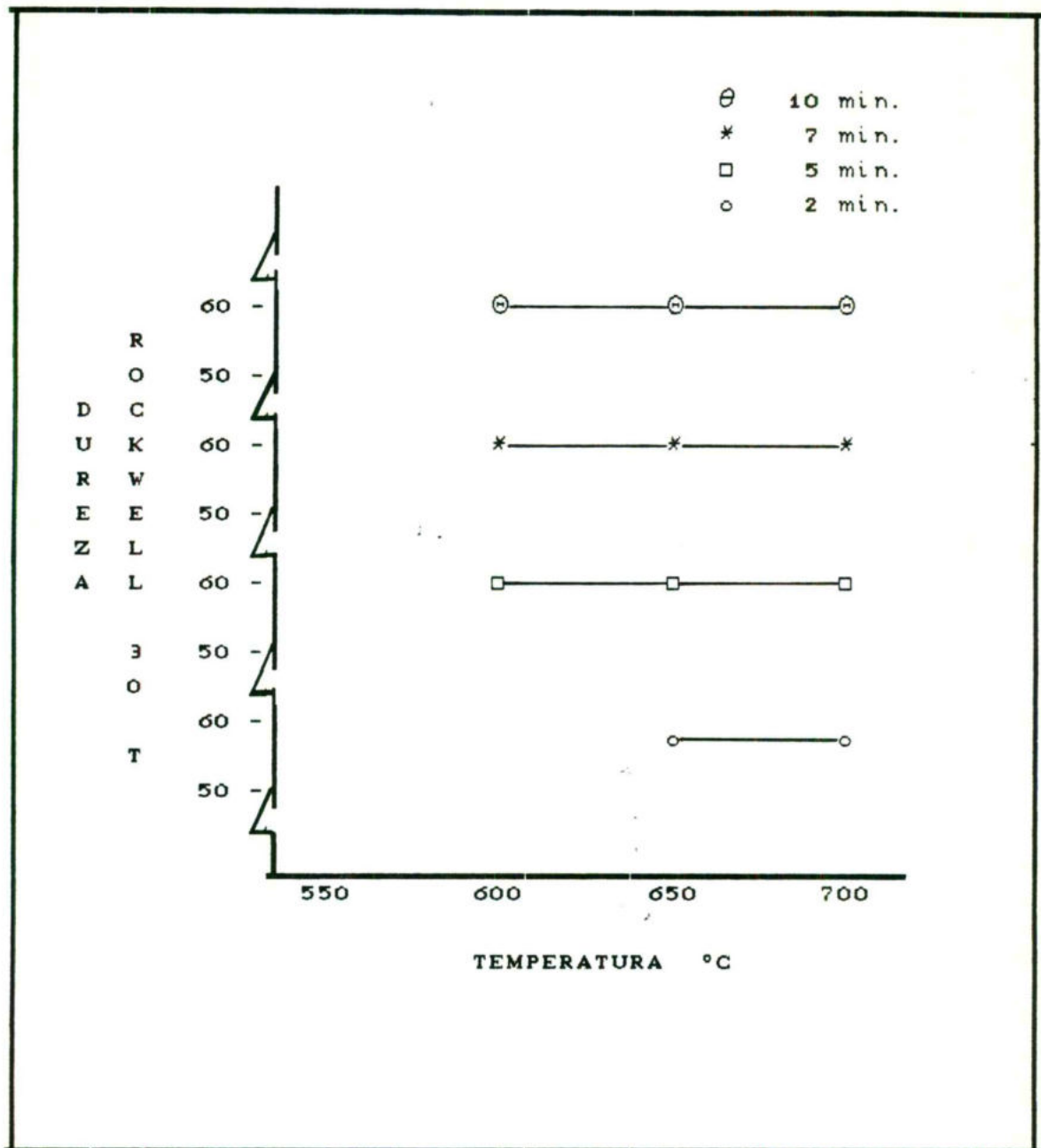


FIGURA 4.2 Efecto en la temperatura y el tiempo de recocido sobre la dureza superficial del material deformado en frío.
Dureza del Material de inicio 78 R 30-T.

La figura 4.3 muestra los resultados de dureza para muestras recocidas isotérmicamente a 700°C por varios tiempos. Cada punto trazado se ha marcado con su equivalente en minutos u horas para facilitar su interpretación.

En esta gráfica se observa que no existe ningún efecto en la temperatura de recocido a 700°C para períodos de tiempo cortos (menos de 2 minutos). Cuando se incrementa el tiempo de recocido (arriba de 3.0 minutos) una disminución de cerca de 25 puntos con respecto al material reducido en frío ocurre. Después de 4 minutos de recocido la dureza disminuye ligeramente conforme aumenta el tiempo.

Como conclusión, el tiempo de permanencia a la temperatura de 700°C para un material completamente recristalizado fue de 4 minutos o más.

Los resultados de las figuras 4.1 - 4.3 se muestran en las tablas A-I - A-III del apéndice A.

Estos experimentos fueron necesarios para familiarizarse con las características del proceso de recocido y así poder establecer los parámetros del mismo.

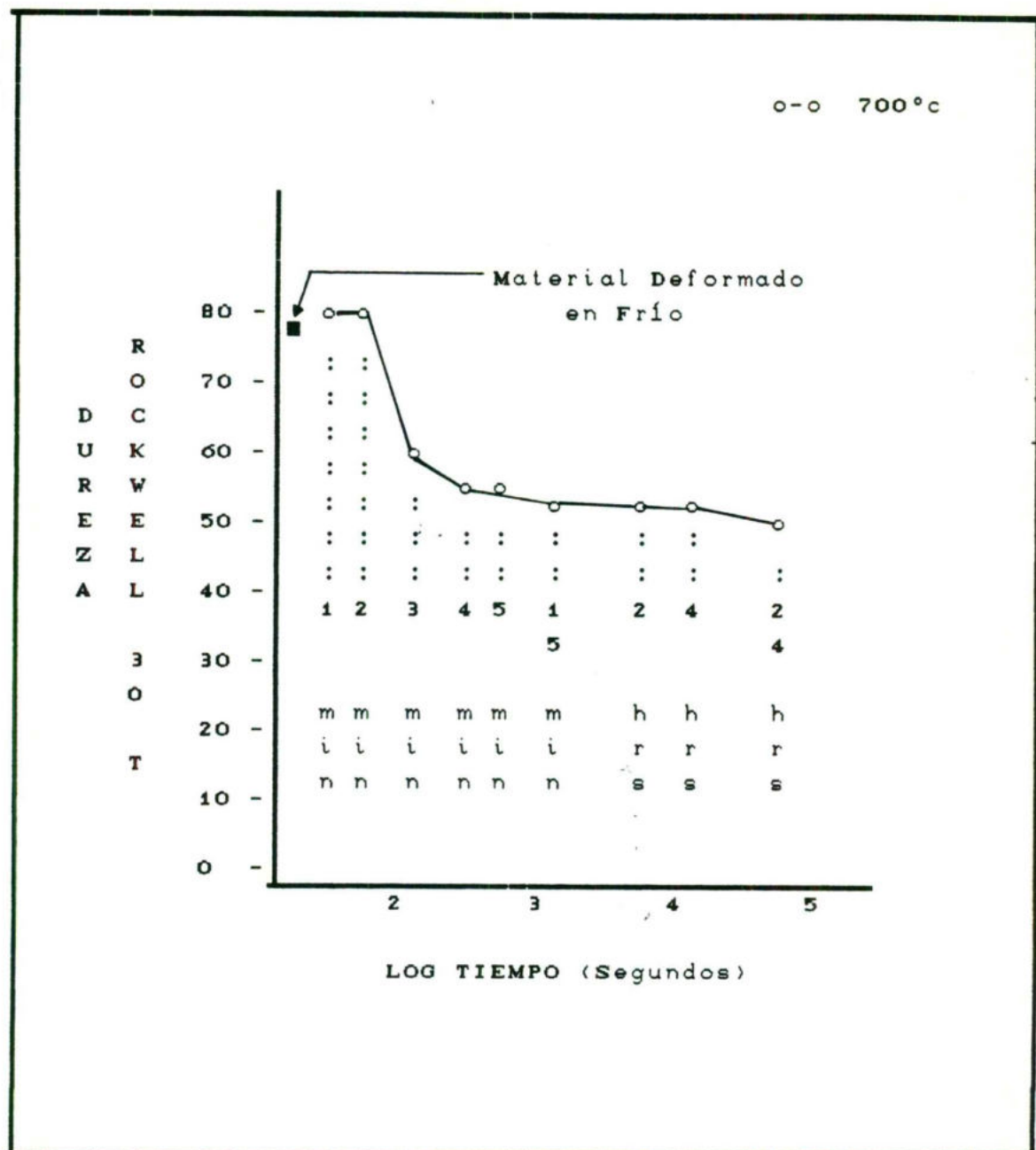


FIGURA 4.3 Efecto del tratamiento isotérmico sobre la dureza en el material de inicio.

Como un resultado de los experimentos anteriores se decidió correr dos tipos de pruebas con el material reducido en frío, utilizando envolturas metalizadas y empleando una temperatura de recocido de 700°C. Las características para cada prueba son dadas a continuación:

Prueba Número 1

- Tratamiento Térmico de 5 minutos.
- Tamaño de grano: I.
- Temperatura de Recocido: 700°C.
- Medio de Temple: Agua con hielo.
- Temperatura del Medio de Temple: 2°C.
- Tiempo de Enfriamiento: 5 minutos.

Prueba Número 2

- Tratamiento Térmico de 24 horas.
- Tamaño de Grano: II.
- Medio de Temple: Agua con hielo.
- Temperatura del Medio de Temple: 2°C.
- Tiempo de Enfriamiento: 5 minutos.

Estos dos tratamientos fueron necesarios para proporcionar inicialmente dos tamaños de grano diferentes, uno fino (T.G.I) y uno vasto (T.G.II), en orden para investigar el efecto de las variables de prueba en la investigación.

En seguida se proporcionan los dos tamaños de grano iniciales:

| | | |
|---------------------|-------------|------------|
| Tamaño de Grano I: | No. ASTM: | 8.4899 |
| | \bar{l} : | 0.0175 mm. |
| Tamaño de Grano II: | No. ASTM: | 6.0244 |
| | \bar{l} : | 0.0400 mm. |

La relación de tamaño de grano fue aproximadamente de 1:2.

4.3 Deformación Intermedia

Recristalización II

A las muestras de acero en la forma de especímenes para tensión y con tamaño de grano I ó tamaño de grano II, después del tratamiento de recristalización I se les dió una deformación intermedia seguido de un tratamiento de recristalización final. En este caso la temperatura de recocido fue en el rango de 610-715°C por un tiempo de recocido constante de 10 minutos. Una vez terminado el ciclo de recristalización II las muestras se enfriaron al aire, todavía dentro de las envolturas de acero. El rango de enfriamiento fue de 35°C/min., establecido así para permitir tiempo suficiente para la precipitación de carbono en equilibrio. Ver apéndice B.

Cabe mencionar que los resultados se describirán de una manera breve. Debido a la gran cantidad de experimentos realizados se obtuvieron una gran cantidad de gráficas Esfuerzo-Deformación y por tanto de datos, los cuales no son

incluidos en el presente trabajo por considerarse que podrían ser el tema de estudio para otro trabajo de investigación.

En este trabajo el enfoque principal es hacia la variación del tamaño de grano con respecto al proceso completo. Recristalización-Deformación-Recristalización.

4.3.1 Resistencia a la Fluencia

Se observó que el valor de resistencia a la fluencia correspondiente a una deformación de cero que fue reportada del material inmediatamente después del tratamiento de recristalización I fue mayor para las muestras de tamaño de grano I que para las muestras correspondientes al tamaño de grano II.

Por tanto puede decirse que el material con el tamaño de grano mayor, T.G II, experimentó una resistencia a la fluencia menor a la del tamaño de grano mas pequeño, T.G.I.

El valor de resistencia a la fluencia se incrementa uniformemente conforme se incrementa la cantidad de deformación, hasta que en determinado porcentaje de deformación alcanza un máximo para decaer bruscamente con un incremento adicional de deformación; después de este decremento brusco, nuevamente el valor de resistencia continuó incrementándose con aumentos en deformación.

Con los resultados obtenidos se pudo observar que conforme la temperatura de recocido era mayor el valor de resistencia a la fluencia alcanzaba un máximo a menor

cantidad de deformación. El comportamiento de resistencia a la fluencia con la cantidad de deformación fue muy similar en todas las temperaturas de recocido y para los dos tamaños de grano iniciales, T.G.I y T.G.II; excepto que para el tamaño de grano inicial más grande el valor de resistencia a la fluencia máximo fue más pequeño y la deformación a la cual ocurrió la brusca disminución de resistencia a la fluencia fue colocada a un valor más alto de deformación.

4.3.2 Deformación Crítica

El valor de resistencia a la fluencia disminuyó bruscamente cuando el nivel de deformación fue muy severo, dependiendo tanto de la temperatura de recocido como del tamaño de grano inicial del material. A estos niveles severos de deformación se les denominó deformación crítica.

Se observó que la deformación crítica disminuyó conforme se eleva la temperatura de recocido. Además de que a la misma temperatura de recocido el material con el tamaño de grano mayor requirió un alto grado de deformación para alcanzar el nivel crítico.

4.3.3 Resistencia a la Tensión

El comportamiento de resistencia máxima con la cantidad de deformación fue muy similar en todas las temperaturas de recocido, para los dos tamaños de grano iniciales y este comportamiento fue similar al observado en la sección 4.3.1.

Para el tamaño de grano más pequeño el valor de resistencia a la tensión fue mayor al experimentado para el tamaño de grano mayor. También como antes, conforme se incrementa la deformación se incrementa la resistencia a la tensión hasta que alcanza un valor crítico de deformación. Incrementos adicionales a este valor crítico ocasionan una disminución severa en la resistencia y una vez pasada la región crítica continúa incrementándose la resistencia a la tensión con incrementos en deformación.

En contraste con los resultados de resistencia a la fluencia, la relación de la disminución de la resistencia a la tensión comparada con la disminución en resistencia a la fluencia fue de 1:3. El efecto de la temperatura de recocido y de la cantidad de deformación sobre la resistencia a la tensión no fue tan marcado.

4.3.4 Elongación Uniforme

Los resultados de ductilidad son presentados únicamente en términos de la elongación uniforme.

El comportamiento de la elongación uniforme con el grado de deformación fue diferente al que se observó tanto para la resistencia a la fluencia como para la resistencia a la tensión. En la temperatura más alta de recocido, 715°C el valor de la elongación uniforme permaneció constante hasta que se alcanzó la región crítica de deformación, en esta región la elongación disminuyó a un nivel mínimo antes de regresar bruscamente justo arriba de su nivel previo.

Cuando se empleó una temperatura de recocido más baja, 650°C-705°C, la elongación uniforme disminuyó ligeramente a un valor mínimo cuando se incremento la deformación; el valor mínimo fue alcanzado conforme la deformación era mayor y conforme la temperatura de recocido disminuía, regresando bruscamente casi siempre a su valor inicial cuando se alcanzaba el valor crítico de deformación.

Con la temperatura de recocido más baja, 610°C, la elongación uniforme disminuyó uniformemente hasta una deformación máxima de 30%. Esta relación fue observada para ambas muestras de tamaños de grano, T.G.I y T.G.II, respectivamente.

4.3.5 Relación Límite de Fluencia-Resistencia a la Tensión

La relación límite de fluencia - resistencia a la tensión es un criterio importante en la selección del material utilizado para operaciones severas de conformado. Por tal motivo se dirá que la variación de los valores en la relación límite de fluencia-resistencia a la tensión con respecto a la cantidad de deformación tiene un comportamiento análogo al que se describió en la sección 4.3.1 y 4.3.3.

4.4 Variación del Tamaño de Grano

El efecto de la deformación intermedia sobre el tamaño de grano recristalizado final es mostrado en las figuras 4.4-4.8 para ambos tamaños de grano iniciales.

Cada una de las gráficas corresponde a una temperatura de recocido determinada y a un tiempo constante de 10 minutos.

Los datos de las figuras 4.4-4.8 se muestran en las tablas A-IV - A-VIII del apéndice A.

La medición del tamaño de grano es válida sólo en muestras recristalizadas completamente, las cuales fueron deformadas más allá de la deformación crítica.

El tamaño de grano es expresado como la distancia media de interceptos (\bar{l}) o "diámetro" de grano en mm., calculado al 95% del límite de confianza (sección 3.4.4) y también es trazado en términos del número de tamaño de grano ASTM. En las gráficas se encuentran además los dos tamaños de grano iniciales (T.G.I y T.G.II), empleados en los experimentos; también se muestra el tamaño de grano correspondiente a material recocido por lotes y a dos aceros japoneses (CEP = calidad estampado profundo; CEEP = calidad estampado extra-profundo).

La información de los valores de los 3 últimos tamaños de grano mencionados fue incluida en las gráficas para establecer de esta manera una comparación entre el tamaño de grano recristalizado final obtenido de los experimentos realizados en esta investigación y material que es producido normalmente en la industria.

Por otro lado, se observó de las fotomicrografías obtenidas que el material deformado más allá de la deformación crítica tiene un tamaño de grano recristalizado



vasto y a medida que la cantidad de deformación se incrementa el tamaño de grano tiende a disminuir.

Este comportamiento fue observado para la temperatura de 715°C, 705°C y 675°C y para materiales de los dos tamaños de grano iniciales. También puede decirse que el tamaño de grano grande (T.G.II) al inicio, fue el tamaño de grano final más grande y en todos los casos el tamaño de grano final fue considerablemente más grande que el tamaño de grano correspondiente a materiales comerciales.

Cuando se empleó la temperatura de recocido de 650°C (figura 4.7), se observó que el material con el tamaño de grano inicial (T.G.I y T.G.II), no alcanzó a recrystalizar completamente resultando un tamaño de grano irregular y deformado.

Para temperaturas de recocido de 610°C se observó que la cantidad de deformación crítica nunca fue excedida. El grano recrystalizado no fue obtenido a esta temperatura de recocido y las fotomicrografías de tamaño de grano del tratamiento recrystalización-deformación-recrystalización, mostraron mucha variación de las muestras de tamaño de grano inicial II. También hubo una variación notable en el tamaño de grano final con el tamaño de grano inicial I, ya que se obtuvo un tamaño de grano final muy fino para muestras con un tamaño de grano inicial I.

4.5 Metalografías

4.5.1 Microestructuras

Las figuras 4.9 y 4.10 muestran el tamaño de grano del material de inicio, T.G.I y T.G.II, empleado en los experimentos. Posteriormente se muestran un grupo de fotomicrografías que muestran el tamaño de grano recrystalizado final de muestras seleccionadas que fueron deformadas más allá del intervalo de deformación crítica, seguido del tratamiento de recrystalización II. Todas estas fotomicrografías se tomaron a una amplificación de 100X. Ver figuras 4.11 - 4.22.

Cada fotomicrografía se encuentra acompañada de algunos datos, para establecer así una correlación entre las variables en el proceso y la microestructura del material.

Los datos que acompañan a las fotomicrografías son:

- Tamaño de grano inicial.
- Cantidad de deformación.
- Temperatura de recocido.
- Tiempo de recocido.
- Tamaño de grano recrystalizado final.
- Amplificación.

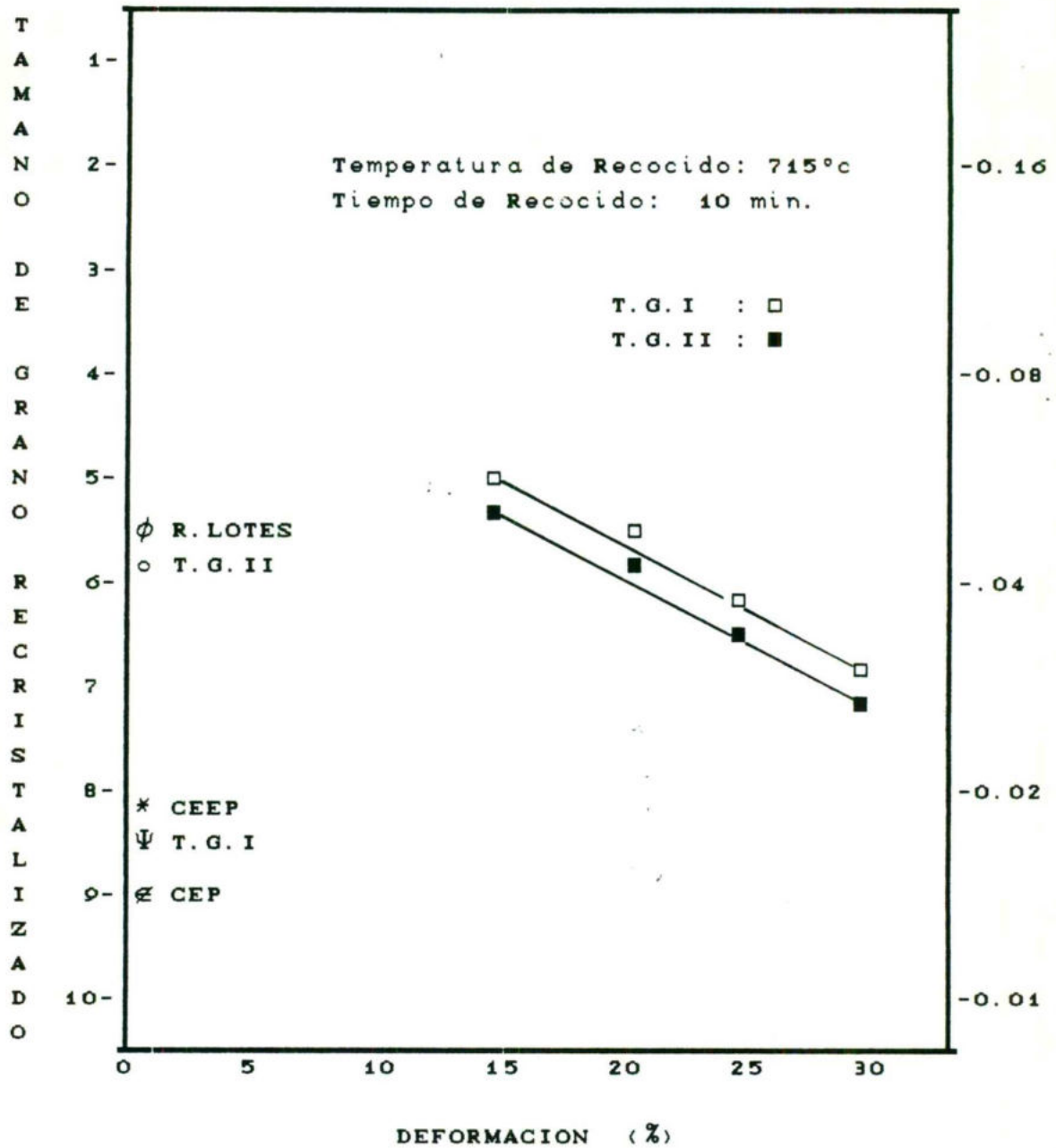


FIGURA 4.4 Efecto de la cantidad de deformación y del tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.

No. ASTM.

\bar{L} , mm

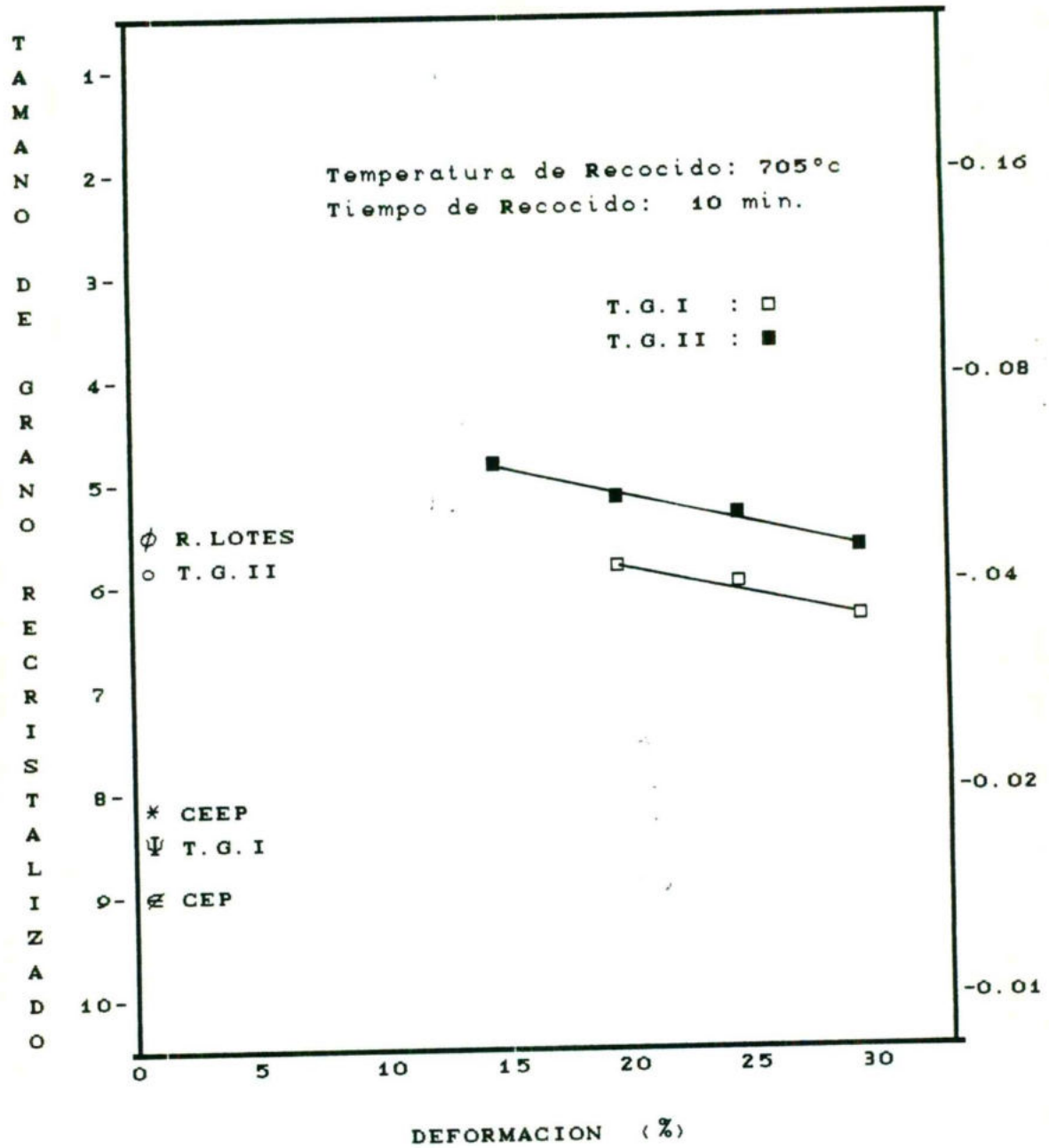


FIGURA 4.5 Efecto de la cantidad de deformación y del tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recrystalizado final.

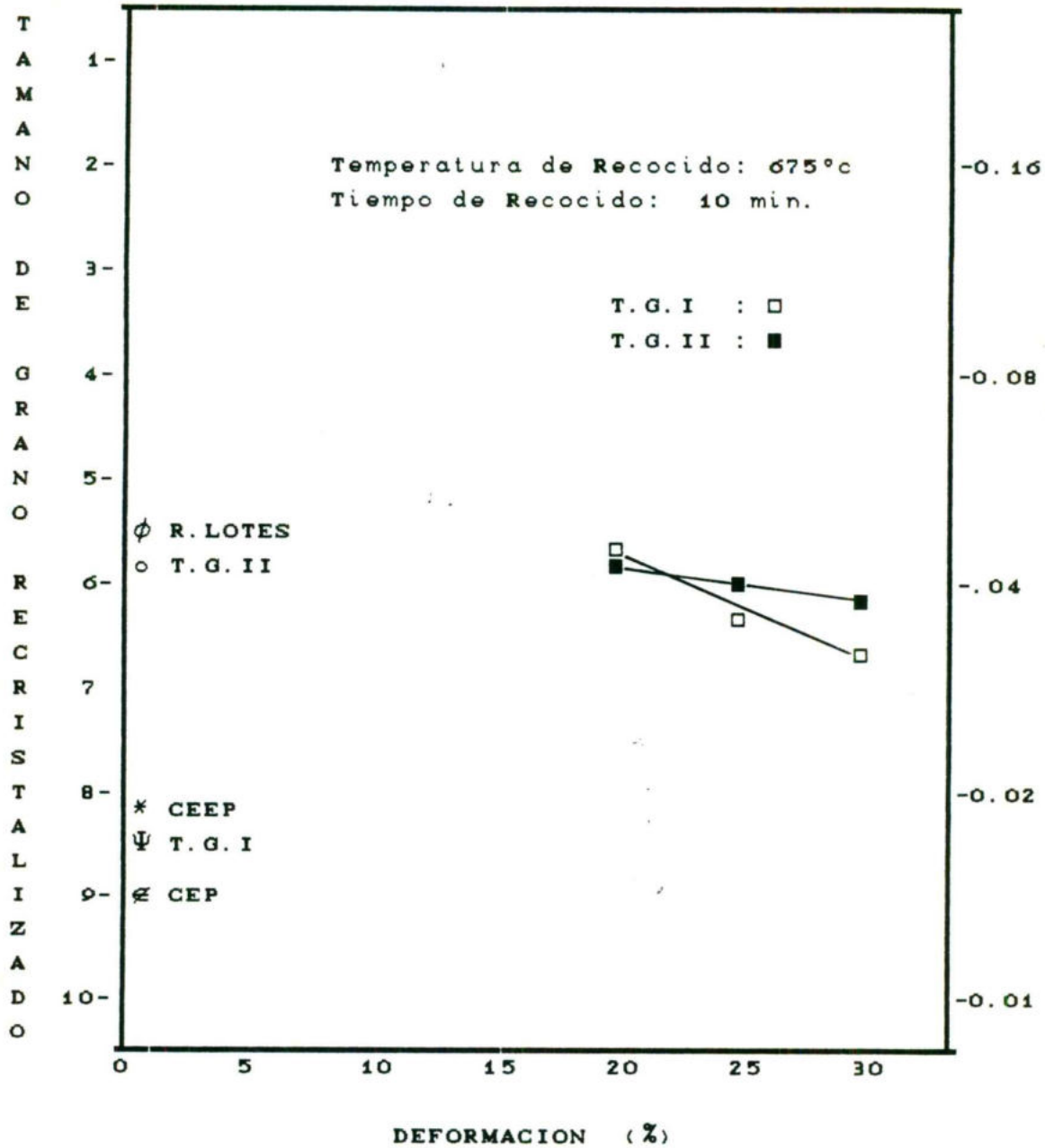


FIGURA 4.6 Efecto de la cantidad de deformación y del tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.

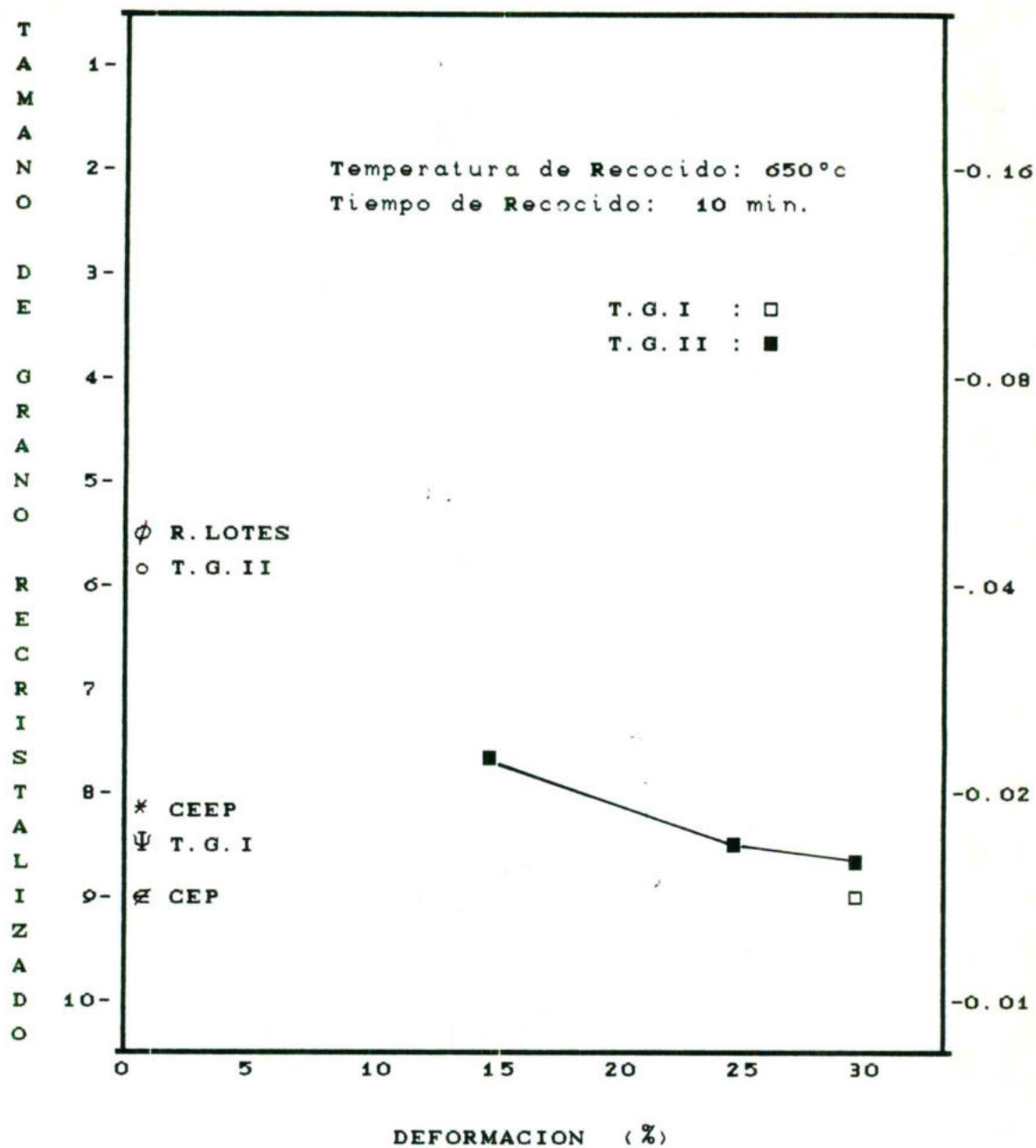


FIGURA 4.7 Efecto de la cantidad de deformación y del tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.

No. ASTM.

\bar{l} , mm

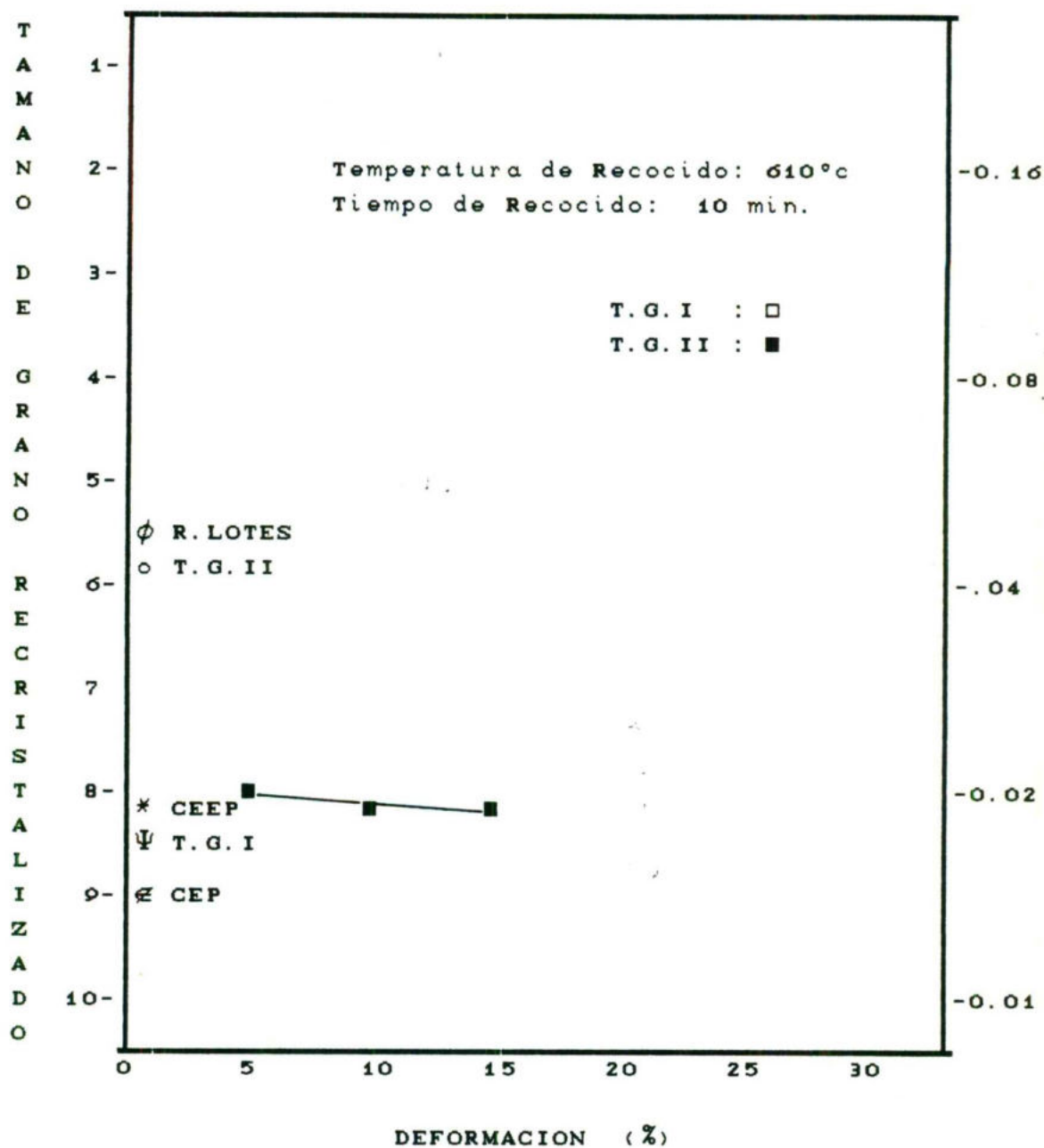


FIGURA 4.8 Efecto de la cantidad de deformación y del tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recrystalizado final.



Tratamiento Térmico de 5 minutos.

Tamaño de grano I.

- No. ASTM :

8.4899

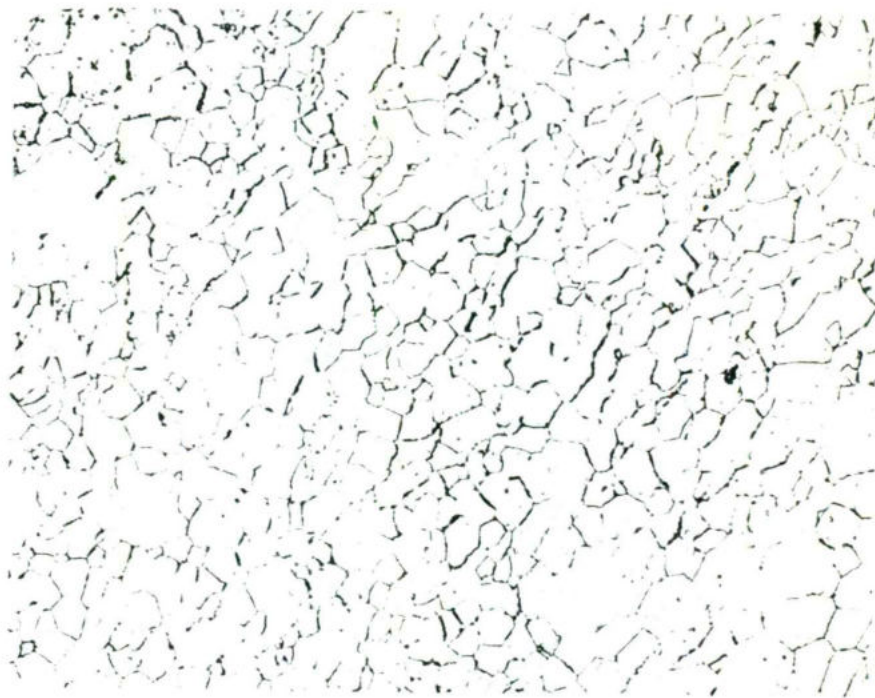
- \bar{l} :

0.0175 mm.

FIGURA 4.9 Tamaño de Grano I.

Tratamiento de Recristalización I.

Amplificación 100X.



Tratamiento Térmico de 24 horas.

Tamaño de grano inicial II.

- No. ASTM :

6.0244

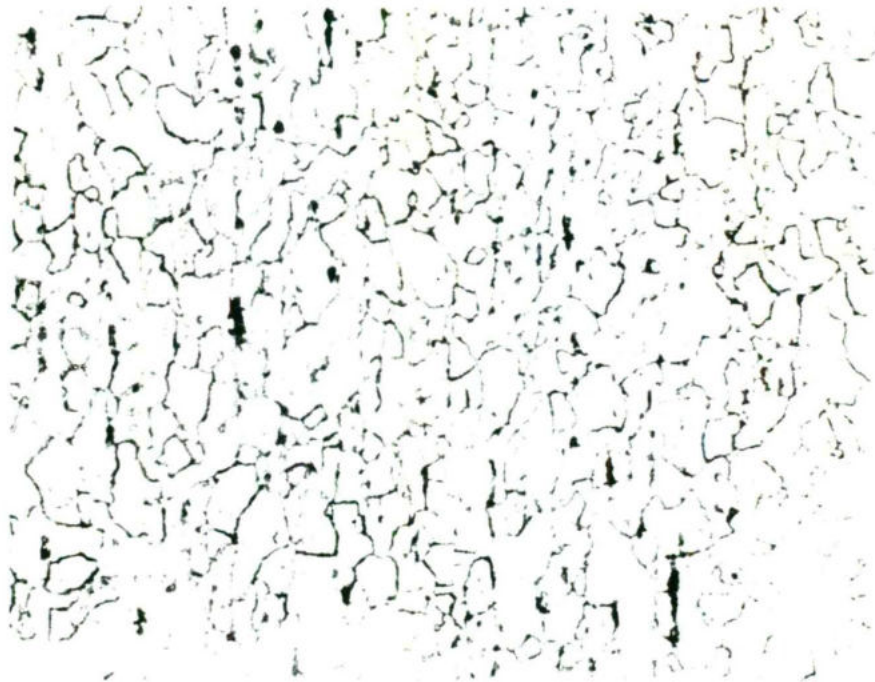
- l :

0.0400 mm.

FIGURA 4.10 Tamaño de Grano II.

Tratamiento de Recristalización I.

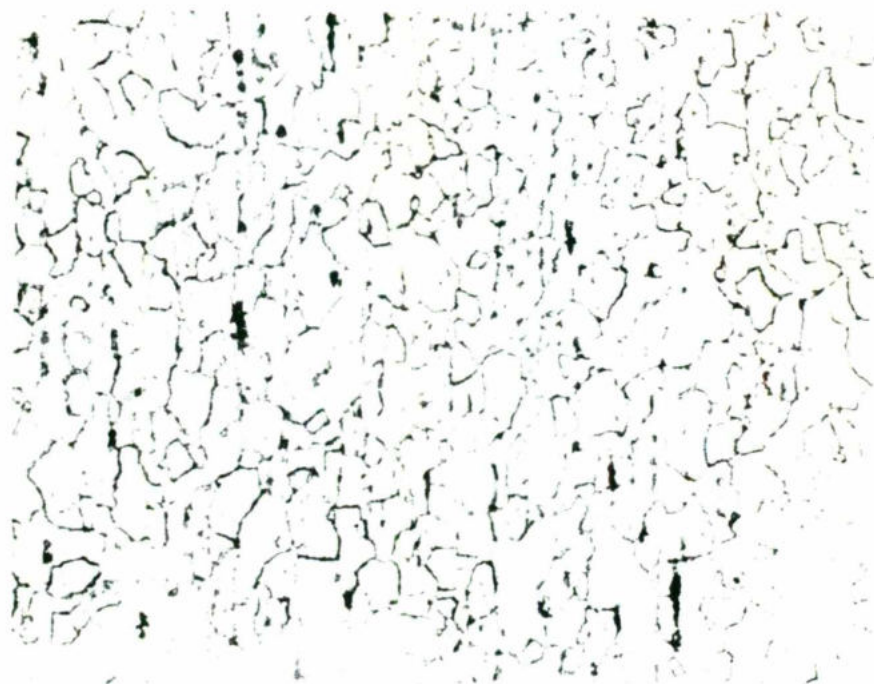
Amplificación 100X.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|-----------|
| Tamaño de Grano Inicial: | I. |
| Cantidad de Deformación: | 25%. |
| Temperatura de Recocido: | 715°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 6.4942 |
| - \bar{d} : | 0.0350 mm |
| Amplificación: | 100X. |

FIGURA 4.11 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|-----------|
| Tamaño de Grano Inicial: | I. |
| Cantidad de Deformación: | 25%. |
| Temperatura de Recocido: | 715°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - \bar{N} . ASTM: | 6.4942 |
| - \bar{l} : | 0.0350 mm |
| Amplificación: | 100X. |

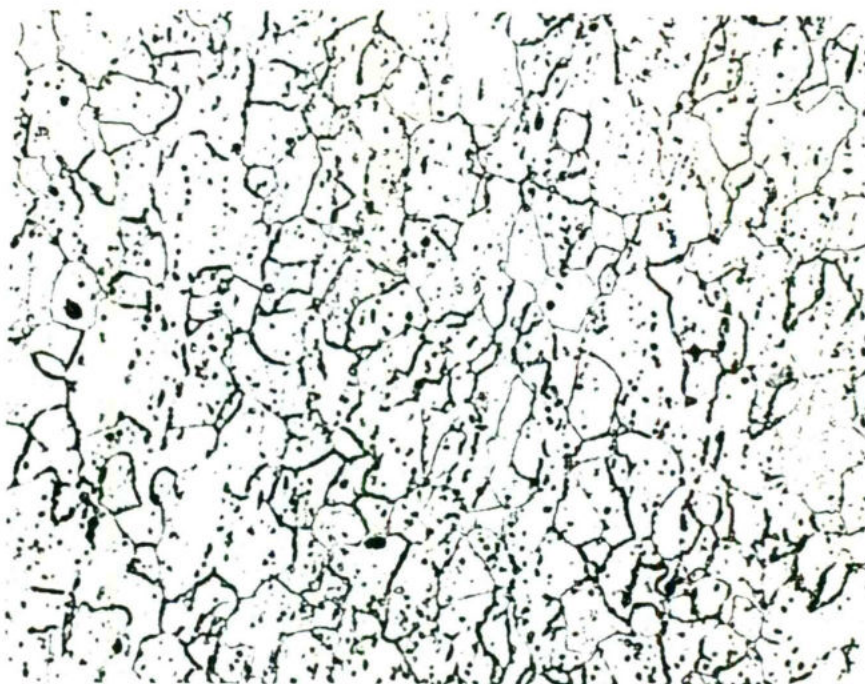
FIGURA 4.11 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | II. |
| Cantidad de Deformación: | 30%. |
| Temperatura de Recocido: | 715°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 7.3539 |
| - \bar{d} : | 0.0260 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

FIGURA 4.13 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | II |
| Cantidad de Deformación: | 20%. |
| Temperatura de Recocido: | 715°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 6.1439 |
| - \bar{l} : | 0.0380 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

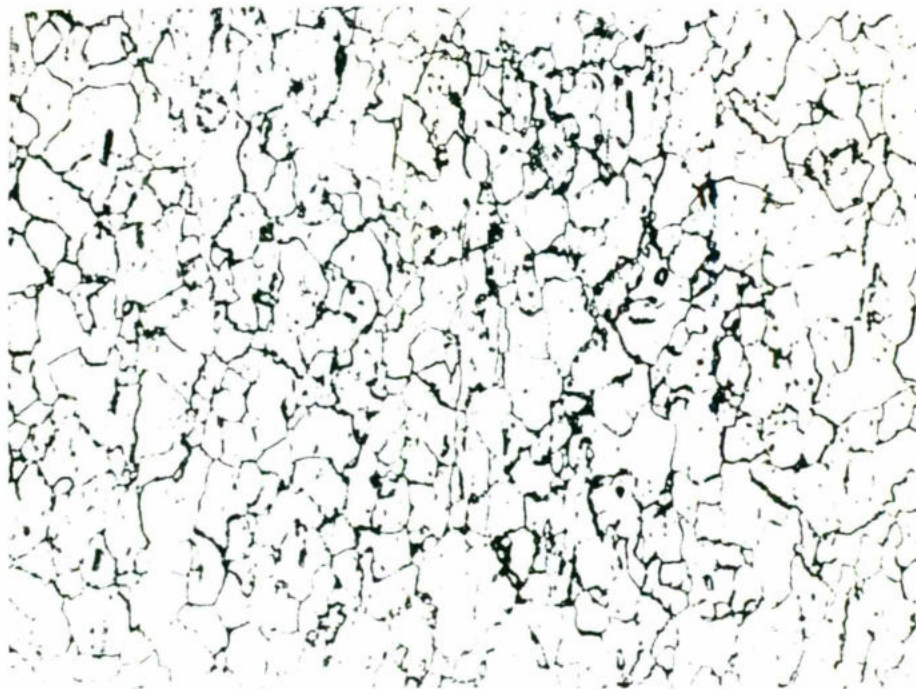
FIGURA 4.14 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|-----------|
| Tamaño de Grano Inicial: | I. |
| Cantidad de Deformación: | 30%. |
| Temperatura de Recocido: | 705°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 6.4481 |
| - \bar{d} : | 0.0350 mm |
| Amplificación: | 100X. |

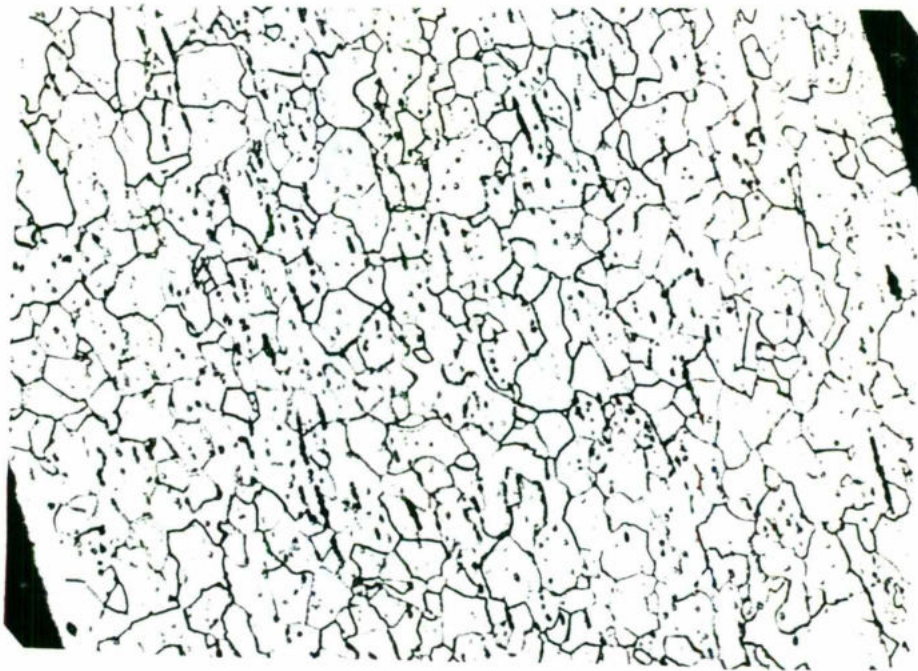
FIGURA 4.15 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|-----------|
| Tamaño de Grano Inicial: | I. |
| Cantidad de Deformación: | 20%. |
| Temperatura de Recocido: | 705°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 6.1655 |
| - \bar{d} : | 0.0390 mm |
| Amplificación: | 100X. |

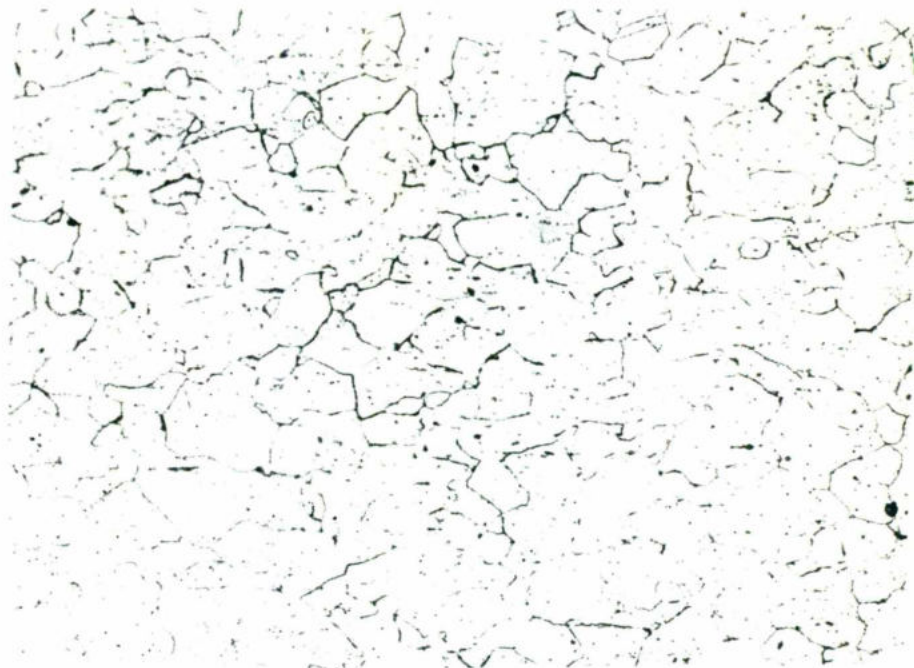
FIGURA 4.16 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | II. |
| Cantidad de Deformación: | 30%. |
| Temperatura de Recocido: | 705°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 5.8205 |
| - \bar{d} : | 0.0420 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

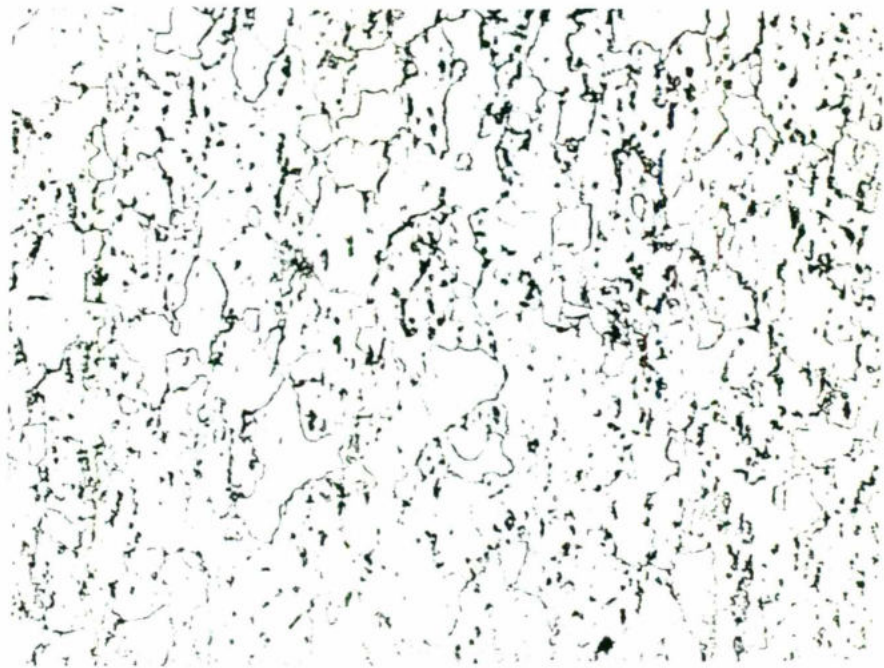
FIGURA 4.17 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | II. |
| Cantidad de Deformación: | 25%. |
| Temperatura de Recocido: | 705°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 5.4260 |
| - \bar{d} : | 0.0500 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

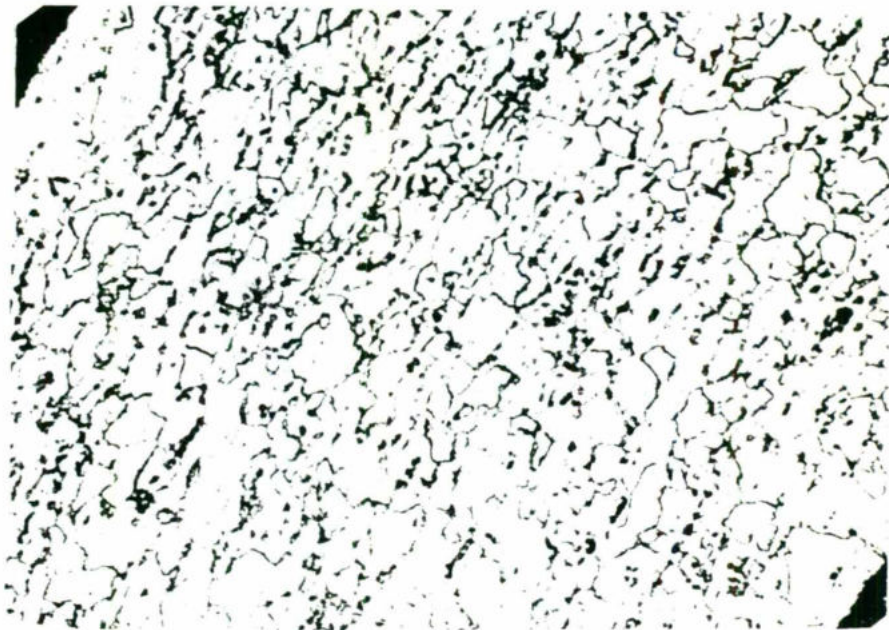
FIGURA 4.18 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | I. |
| Cantidad de Deformación: | 30%. |
| Temperatura de Recocido: | 675°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 6.8216 |
| - \bar{l} : | 0.0315 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

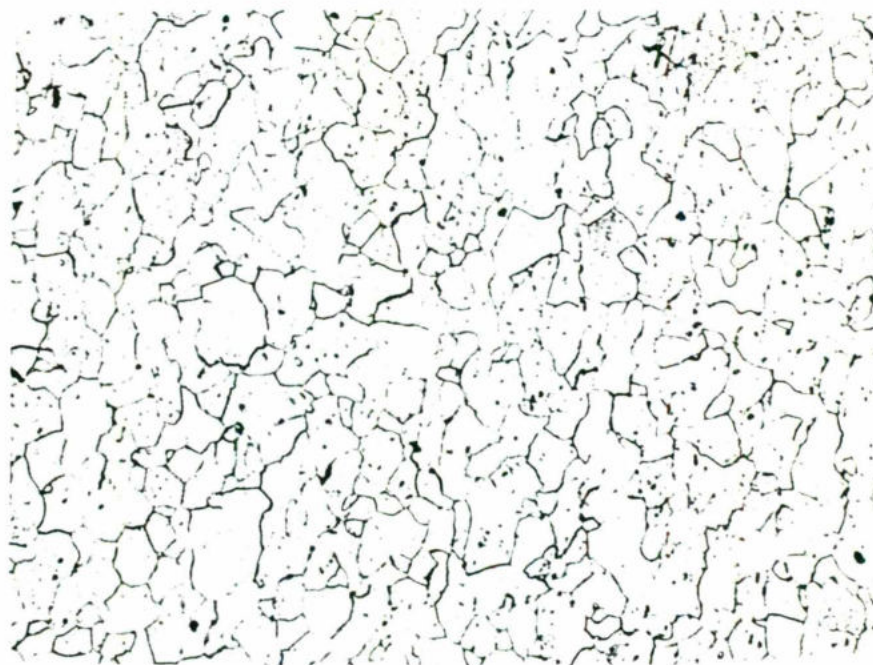
FIGURA 4.19 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | I. |
| Cantidad de Deformación: | 20%. |
| Temperatura de Recocido: | 675°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 5.9828 |
| - \bar{d} : | 0.0420 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

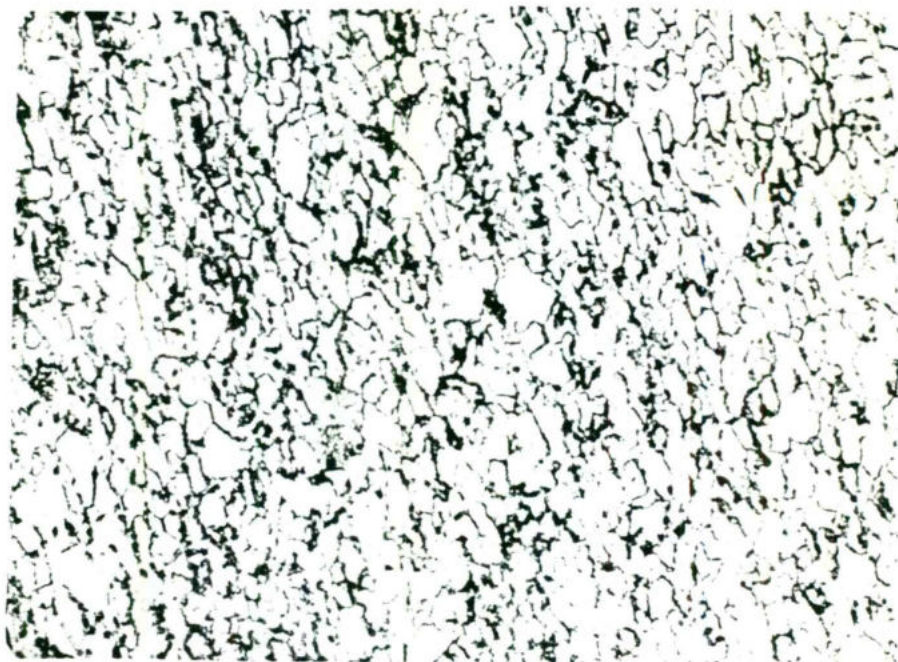
FIGURA 4.20 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | II. |
| Cantidad de Deformación: | 30%. |
| Temperatura de Recocido: | 675°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 5.9840 |
| - \bar{l} : | 0.0400 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

FIGURA 4.21 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | II. |
| Cantidad de Deformación: | 20%. |
| Temperatura de Recocido: | 675°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 6.0324 |
| - l: | 0.0400 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

FIGURA 4.22 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.

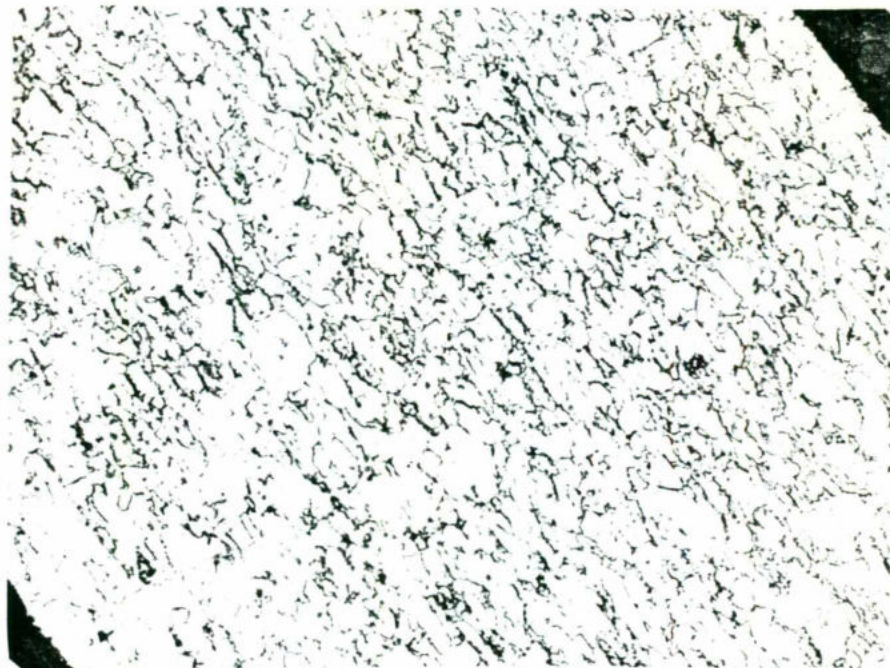
Ahora se muestran una serie de fotomicrografías en las cuales el tamaño de grano final no recrystalizó, aún deformando el material más allá de la deformación crítica. Ver figuras 4.23-4.26. Las fotomicrografías se encuentran acompañadas por los mismos datos que el grupo de fotomicrografías anteriores.

Hubo una diferencia notable entre el tamaño de grano de muestras que recrystalizaron completamente después del tratamiento de recocido final, con aquellas en las cuales el tamaño de grano no alcanzó a recrystalizar.

Se obtuvo un tamaño de grano final muy grande por el tratamiento de recrystalización II, aún para temperaturas más bajas (675°C) que la temperatura óptima de recrystalización (705°C). También fue muy interesante notar que muestras tanto de tamaño de grano I como de tamaño de grano II no recrystalizaron completamente a la temperatura de 650°C , aún a la deformación más alta experimentada (30%).

Se aclara que la medición de tamaño de grano se realizó en muestras que fueron tratadas a la temperatura de 650°C y 610°C a pesar de que el método empleado para la determinación de tamaño de grano no es válido para muestras que no han recrystalizado. Esta medición se hizo solamente para tener una idea de cuál es el tamaño de grano en muestras que no recrystalizaron completamente.

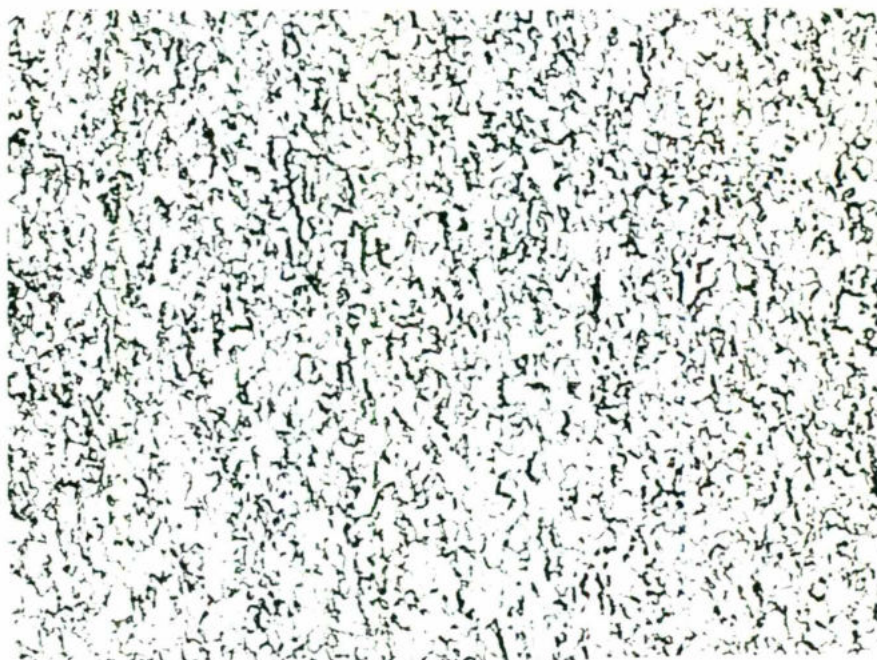
Por último se muestra una fotomicrografía del material que ha sido tratado por el proceso de recocido por lotes, con la finalidad de establecer una comparación entre el tamaño de grano de este material y el tamaño de grano del material empleado para la investigación. Ver figura 4.27.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | I. |
| Cantidad de Deformación: | 30%. |
| Temperatura de Recocido: | 650°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 8.9492 |
| - \bar{d} : | 0.0152 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

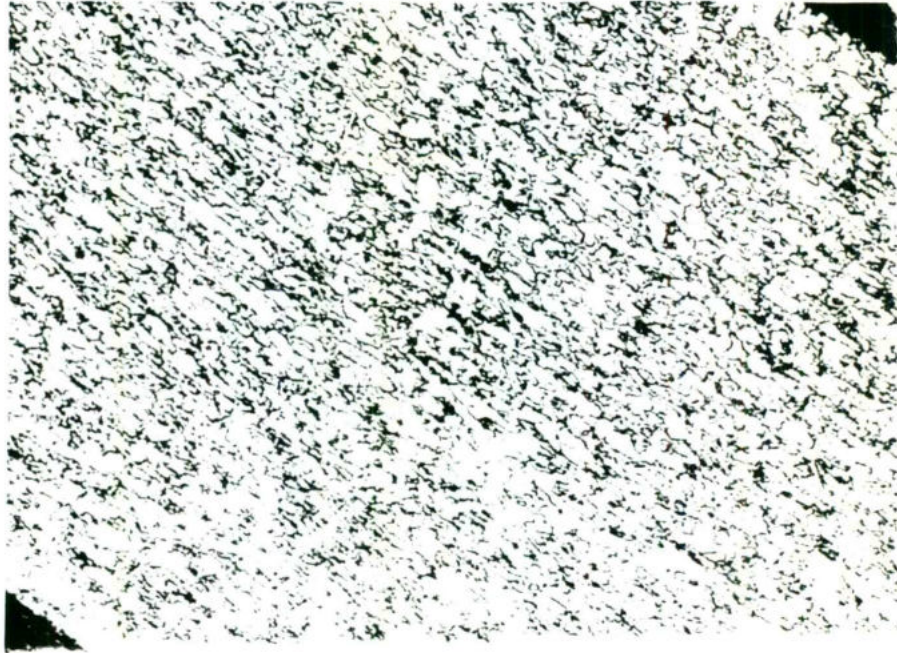
FIGURA 4.23 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | II. |
| Cantidad de Deformación: | 30%. |
| Temperatura de Recocido: | 650°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 8.7749 |
| - \bar{l} : | 0.0162 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

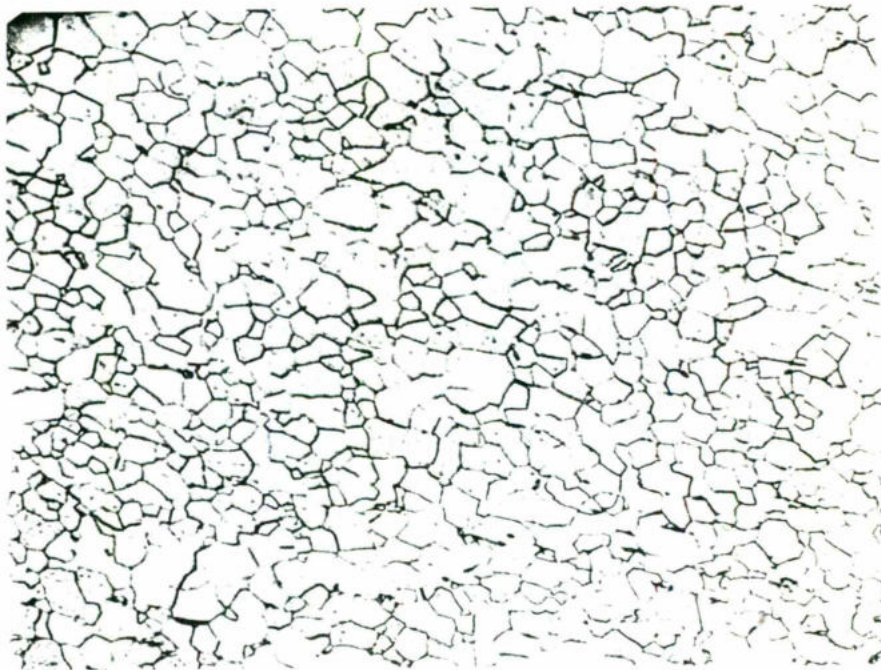
FIGURA 4.24 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | I. |
| Cantidad de Deformación: | 30%. |
| Temperatura de Recocido: | 610°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 9.5055 |
| - \bar{d} : | 0.0125 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

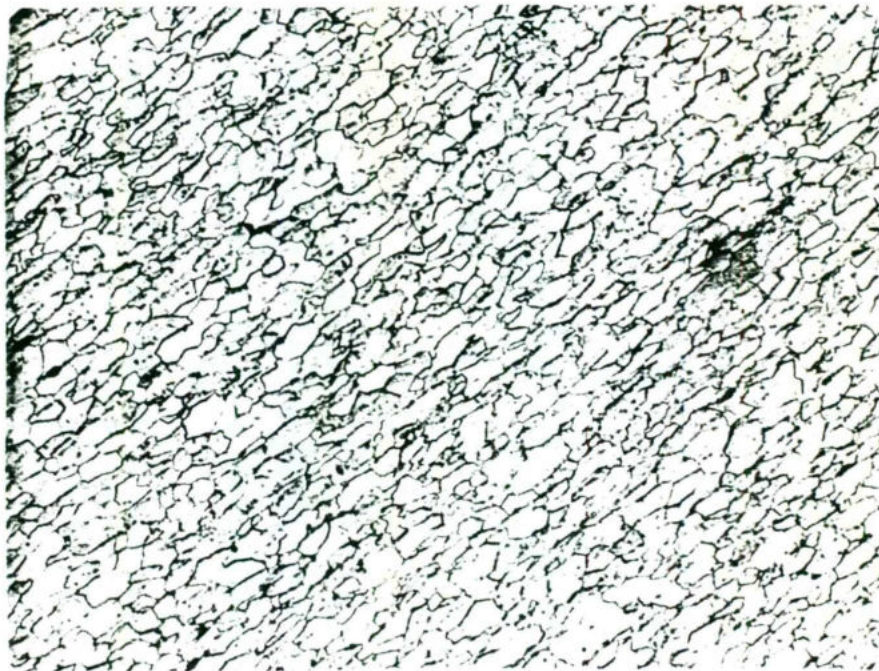
FIGURA 4.25 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido por Lotes.

| | |
|--------------------------|----------------|
| Temperatura de Recocido: | 700°C |
| Tiempo de Recocido: | 7-10 días. |
| Medio de Enfriamiento: | Horno Apagado. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 5.9055 |
| - \bar{d} : | 0.0450 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

FIGURA 4.27 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.



Recocido Continuo.

| | |
|--------------------------|------------|
| Tamaño de Grano Inicial: | II. |
| Cantidad de Deformación: | 20%. |
| Temperatura de Recocido: | 610°C. |
| Tamaño de Grano final: | |
| - No. ASTM: | 8.4919 |
| - \bar{d} : | 0.0175 mm. |
| Amplificación: | 100X. |

FIGURA 4.26 Efecto de la deformación intermedia, temperatura de recocido y tamaño de grano inicial sobre el tamaño de grano recristalizado final.

A continuación se muestran una serie de tablas en las cuales se establecen las propiedades mecánicas del material utilizado para la investigación, así como también del material que fue sometido a recocido continuo por los procesos CAPL y NKK. Por último se muestran los resultados de las propiedades mecánicas del material que fue tratado por recocido en lotes en la planta Altos Hornos de México, S.A. de C.V. (Proceso de recocido comercial).

TABLA VIII

PROPIEDADES MECANICAS EN LAMINAS DE ACERO CON BAJO CARBONO
 DEFORMADAS EN FRIO ENTRE 60-70%
 (MATERIAL DE INICIO)

| PROPIEDAD MECANICA: | MATERIAL DEFORMADO: |
|-----------------------------------|---------------------------|
| LIMITE DE FLUENCIA | 11.309 kg/mm ² |
| RESISTENCIA MAXIMA | 68.182 kg/mm ² |
| ELONGACION TOTAL EN 2 PULGADAS | 2.527 % |

TABLA IX

PROPIEDADES MECANICAS EN LAMINAS DE ACERO BAJO CARBONO
SOMETIDAS AL PROCESO DE RECOCIDO CONTINUO

| PROPIEDAD MECANICA: | RECOCIDO CONTINUO: |
|-----------------------------------|---------------------------|
| LIMITE DE FLUENCIA | 21.880 kg/mm ² |
| RESISTENCIA MAXIMA | 32.820 kg/mm ² |
| ELONGACION TOTAL EN 2 PULGADAS | 38.427 % |
| TAMAÑO DE GRANO | 0.024 mm |

TABLA X

PROPIEDADES MECANICAS DE MATERIAL SOMETIDO A RECOCIDO
CONTINUO POR LOS PROCESOS CAPL Y NKK

| PROPIEDAD MECANICA: | PROCESOS | |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | CAPL | NKK |
| LIMITE DE FLUENCIA | 19.614 kg/mm ² | 22.004 kg/mm ² |
| RESISTENCIA MAXIMA | 32.760 kg/mm ² | 32.900 kg/mm ² |
| ELONGACION TOTAL EN 2 PULGADAS | 44.200 % | 45.000 % |
| TAMAÑO DE GRANO | ----- | 0.0190 mm |

TABLA XI

PROPIEDADES MECANICAS DE METERIAL RECOCIDO POR LOTES
 EN LA PLANTA ALTOS HORNOS DE MEXICO, S.A. DE C.V.
 (RECOCIDO COMERCIAL)

| PROPIEDAD MECANICA: | RECOCIDO POR LOTES: |
|-----------------------------------|---------------------------|
| LIMITE DE FLUENCIA | 24.342 kg/mm ² |
| RESISTENCIA MAXIMA | 31.734 kg/mm ² |
| ELONGACION TOTAL EN 2 PULGADAS | 35.637 % |
| TAMAÑO DE GRANO | 0.023 mm |

CAPITULO V

5.0 Discusión

Se hace una discusión de los resultados descritos en el capítulo anterior, porque se cree que pueden ser aprovechados desde dos trayectorias diferentes.

- Primero, estos resultados pueden ser aprovechados para fijar una técnica de proceso que permita obtener un producto con propiedades mecánicas idénticas a las de un material que ha sido tratado por otro proceso de recocido comercial.
- Segundo, los resultados pueden ser relacionados con los que se obtienen cuando el material es tratado por recocido comercial para efectuar así mejoras en el proceso o tener un ahorro significativo en el mismo.

Por tal razón se evalúa la aplicabilidad de los resultados para la producción comercial en láminas de acero con calidad estampado profundo.

5.1 Discusión de Resultados

5.1.1 Recristalización I

Los mecanismos por los cuales los metales y aleaciones restauran el daño estructural causado por la deformación mecánica (llamase tensión, laminado, torsión, compresión, etc.) son activados térmicamente.

Por lo que el material deformado tiene que ser calentado para que pueda ocurrir la recristalización.

La recristalización es caracterizada por el reemplazamiento de granos deformados, los cuales son característicos del estado de trabajado en frío, "estado de alta energía, alta deformación" por nuevos granos equiaxiales libres de deformación, con un cambio consecuente en las propiedades físicas y mecánicas. La recristalización tiene lugar mediante una combinación de nucleación con granos libres en deformación y el crecimiento de estos núcleos para abarcar todo el material trabajado en frío. Más tarde los límites de grano continúan emigrando conforme el grano recristalizado crece, guiando así el crecimiento del grano, el cual es un aspecto importante del proceso de recocido por lotes (pero no del recocido continuo).

La temperatura a la cual ocurre la recristalización se conoce como "temperatura de recristalización" y puede ser definida como la temperatura a la cual un material particular con una cantidad específica de deformación plástica en frío recristaliza completamente en un período de tiempo específico.

La temperatura de recristalización depende sobre todo de las características del material tales como:

- a). Cantidad de Deformación Plástica Previa.
- b). Tamaño de Grano antes de la Deformación, y
- c). La Pureza o Composición Química del material.

Cuando las láminas de acero con bajo carbono y reducidas en frío entre 60-70% fueron recocidas por períodos de tiempo de 2 a 60 minutos a temperaturas entre 600-700°C, la única diferencia que se observó fue el tamaño de grano final.

Por tal motivo se estableció el rango de temperaturas de 600-700°C, en el cual el material podría recrystalizar, también se seleccionó la temperatura de 700°C como la temperatura de recocido adecuada para realizar el tratamiento de recrystalización I.

Cuando el material fue recocido isotérmicamente a 700°C en envolturas de acero, el material se suavizó entre 2 y 4 minutos, y después de 4 minutos a 700°C el material recrystalizó completamente. Ver figura 4.3. Un incremento en tiempo más allá de 4 minutos reflejó un incremento en el tamaño de grano final. Por lo tanto, de acuerdo a estas aseveraciones se estableció el tiempo de 5 minutos y 24 Horas a la temperatura de 700°C, para recocer al acero con bajo carbono y reducido en frío para producir un material con dos diferentes tamaños de grano iniciales recrystalizados, T.G.I y T.G.II, respectivamente.

5.1.2 Deformación Intermedia Recrystalización II

La deformación intermedia única y exclusivamente se refiere a la deformación producida por tensión o laminado en las probetas entre los tratamientos de recocido de recrystalización I y recrystalización II.

El objetivo principal de esta investigación fue utilizar la deformación intermedia para controlar el tamaño de grano, produciendo especímenes con un tamaño de grano final por el proceso de recristalización final (recristalización II).

El rango de temperaturas de recristalización es determinado por el intervalo a el cual se forma el núcleo, N, y el intervalo a el cual crece, G, y ese intervalo es mayor a temperaturas de recocido más altas y a mayor grado de deformación plástica en frío previa. < 18-55 >

El rango de nucleación y crecimiento también influye en el tamaño de grano de un material recristalizado. < 56 >

Tanto N como G se incrementan con la temperatura a todos los grados de deformación y también se incrementan con el grado de deformación a todas las temperaturas.

La naturaleza de esta variación es de importancia singular para esta investigación, por lo que se dirá:

- N se incrementa con la deformación más rápidamente que G, por lo que el tamaño de grano final después de una recristalización completa varía con la relación N:G; por lo tanto el tamaño de grano final disminuye conforme se incrementa la deformación.
- Conforme se reduce la deformación antes del recocido a valores cada vez más pequeños, la velocidad de nucleación desciende con mayor rapidez que la velocidad de crecimiento. Como una consecuencia, la relación de N a G disminuye en magnitud conforme disminuye la deformación.

Puede concluirse que una cantidad crítica de trabajado en frío corresponde a una cantidad justamente capaz de formar los núcleos necesarios para la recristalización. Esto concuerda con el hecho de que los núcleos se forman en puntos con energía de deformación reticular elevada. El número de estos puntos deberá aumentar ciertamente con la severidad de la deformación y a deformaciones bajas su número deberá casi desvanecerse. El límite de deformación como una consecuencia, recristaliza granos grandes.

La existencia de esta relación permite el control del tamaño de grano recristalizado a través de la manipulación de el grado de deformación plástica en frío previa y por lo tanto de N y G.

La deformación crítica podrá disminuir con un incremento en el tiempo de recocido. Este incremento de tiempo aumentará la posibilidad de la aparición de núcleos. < 56 >

Sin embargo, el tiempo de recocido en el tratamiento de recristalización II fue constante a 10 minutos, porque se encontro que para este período de tiempo la recristalización era uniforme en carácter.

Las muestras tratadas por el proceso de deformación-recristalización fueron empleadas para examinación metalográfica. De los estudios realizados se cuantificó el tamaño de grano del material. Se observó además la variación de las propiedades mecánicas del material utilizado para la investigación y tratado por el proceso de recocido continuo con material que fue tratado por otro proceso de recocido comercial.

5.1.2.1 Variación del Tamaño de Grano

Investigaciones previas <57> han mostrado que el tamaño de grano recristalizado depende sobre todo de la cantidad de deformación que se le ha dado al material antes del tratamiento de recocido. Una deformación ligeramente mayor a la deformación crítica solamente induce un nivel relativamente bajo de deformación en el material, el cual crea pocos sitios en donde un núcleo puede formarse y crecer.

La ligera deformación adicional al nivel crítico de deformación origina un tamaño de grano grande después de que el material es recocido. Incrementos mayores de deformación al nivel crítico permiten progresivamente una mayor formación de núcleos resultando un tamaño de grano más pequeño.

El tamaño de grano inicial (antes del tratamiento de deformación) también influencia el tamaño de grano después del recocido y el tamaño de grano inicialmente grande (T.G.II), es el tamaño de grano recristalizado más grande.

< 33 - 57 >.

La teoría descrita concuerda con los resultados establecidos anteriormente para la cantidad de deformación investigada (0 - 30%).

Cuando la cantidad de deformación fue ligeramente mayor que la deformación crítica, el tamaño de grano recristalizado fue muy grande. Por lo tanto, se observó que cuando la cantidad de deformación se incrementa, el tamaño de grano recristalizado disminuye uniformemente.

El tamaño de grano inicial resultó un tamaño de grano grande recrystalizado a una deformación, temperatura y tiempo de recocido constante. Para el tamaño de grano grande inicial (T.G.II), la recrystalización no tuvo lugar a la temperatura más baja de recocido, 610°C, aún con la cantidad más grande de deformación experimentada (30%).

También se observó para la temperatura de 650°C que el material con el tamaño de grano más pequeño (T.G.I) no alcanzó a recrystalizar, cuando fue ligeramente deformado más allá del nivel crítico de deformación. Por el contrario para el tamaño de grano mayor (T.G.II) todas las muestras recrystalizaron y conforme el nivel crítico de deformación fue excedido el grano se afinaba.

5.2 Evaluación de Resultados

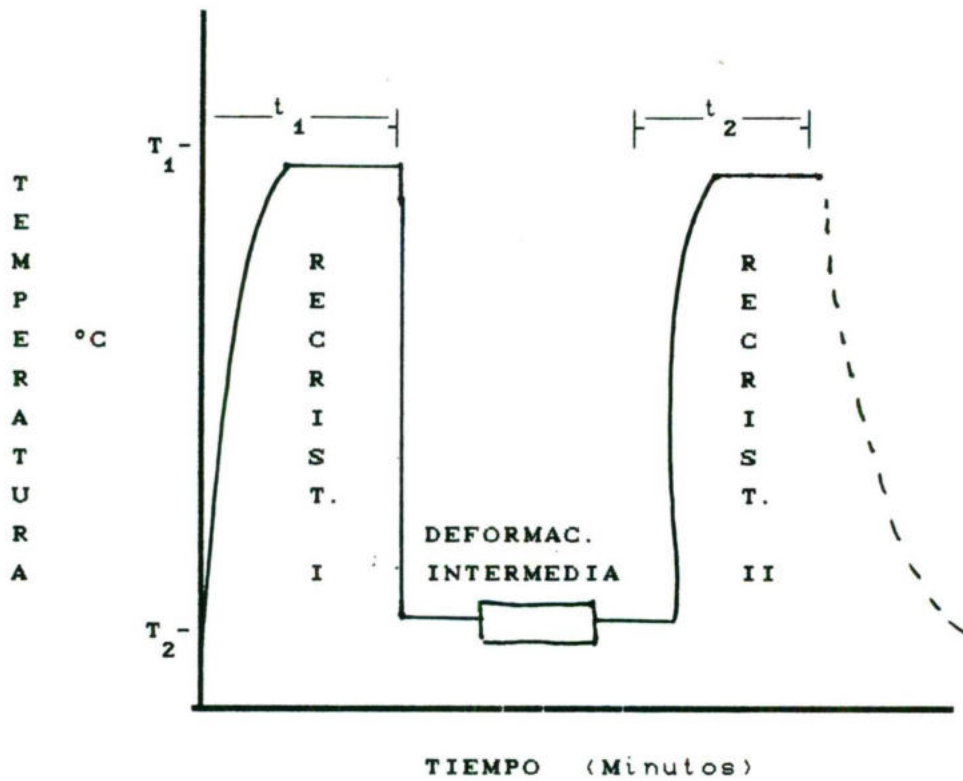
El recocido continuo es altamente exitoso para la producción de placas estañadas, pero ahora deseamos que llegue a ser un método aceptado para la producción de láminas de acero con calidad estampado. Por tal motivo debe de encontrarse un método que asegure que las láminas de acero tratadas por el proceso de recocido continuo desarrollen un tamaño de grano apropiado, y que las propiedades resultantes de material tratado por este método sean muy semejantes a las propiedades que desarrolla un material tratado en el recocido por lotes, y aún más que el material no sea susceptible al envejecimiento.

Por la información que se tiene, se sabe que los dos procesos japoneses que se encuentran ya en uso, proceso CAPL y NKK, aseguran que el grano crezca suficientemente durante el recocido continuo a través de un control limitado de la composición química y de la historia del material; mientras que los efectos de envejecimiento son minimizados por la incorporación de una sección de envejecimiento dentro de la línea de recocido. Se ha reportado para estos dos métodos que se obtiene un acero con propiedades comparables al material que ha sido producido en el recocido por lotes.
< 40-50 >.

Sin embargo, el programa experimental para el presente trabajo de investigación corresponde a un ciclo de recristalización - deformación - recristalización, efectuado a un acero con bajo carbono y producido normalmente con deformación plástica en frío, sin un control limitado de la composición química del material. Tal ciclo térmico es mostrado en la figura 5.1.

Se observa en la figura que primeramente se realiza un tratamiento térmico de recristalización inicial, a continuación el material es deformado a temperatura ambiente y por último el material es tratado por un segundo ciclo de recristalización.

De acuerdo con los resultados de esta investigación, el tamaño de grano producido por el primer tratamiento de recristalización fue fino con la única finalidad de asegurar que la cantidad de deformación posterior a este tratamiento fuera mínima.



Donde:

T_1 = Temperatura de recocido.

T_2 = Temperatura de deformación intermedia.

t_1 = Tiempo de calentamiento y permanencia. Parte I.

t_2 = Tiempo de calentamiento y permanencia. Parte II.

FIGURA 5.1 Diagrama Esquemático del ciclo propuesto.
Recristalización-Deformación-Recristalización.

Por tal razón, la primera recristalización se realizó a la máxima velocidad en la cual se pudiera obtener un material completamente recristalizado y teniendo un enfriamiento muy rápido.

La temperatura de recristalización en el segundo tratamiento térmico podría ser también tan alta como fuera posible, claro, pero por supuesto menor a 723°C, para asegurar un material completamente recristalizado.

El rango de enfriamiento en el segundo tratamiento de recristalización fue lento garantizando así que los efectos del envejecimiento fueran los mínimos satisfactorios y que no lleguen a afectar las propiedades mecánicas deseables en el material.

La cantidad de deformación intermedia es el factor crítico determinante para el tamaño de grano recristalizado final. Por lo tanto esa cantidad de deformación podría ser manipulada para apropiar la especificación del producto final. Consecuentemente, se puede producir un acero con un tamaño de grano fino deformando el material grandes cantidades, mientras que un acero con grano grande podría ser producido deformándolo en cantidades pequeñas.

En seguida se muestra la tabla XII que establece una comparación entre las propiedades en láminas de acero con bajo carbono que fueron recocidas por esta técnica y material que fue tratado por otros procesos de recocido comercial.

TABLA XII

COMPARACION EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DE
MATERIAL RECOCIDO POR DIFERENTES METODOS

| PROPIEDAD MECANICA: | LIMITE DE FLUENCIA (kg/mm ²) | RESISTENCIA MAXIMA (kg/mm ²) | ELONGACION EN 2 IN. (%) | TAMAÑO DE GRANO (mm) |
|----------------------------------|---|---|---------------------------------|------------------------------|
| RECOCIDO POR LOTES: | 24.342 | 31.734 | 35.637 | 0.023 |
| PROCESO CAPL: | 19.614 | 32.760 | 44.200 | ----- |
| PROCESO NKK | 22.004 | 32.900 | 45.000 | 0.019 |
| RECOCIDO CONTINUO SUGERIDO | 21.880 | 32.820 | 38.427 | 0.024 |

En la tabla se observa que la técnica de recristalización - deformación - recristalización, ofrece resultados muy favorables comparados con los obtenidos por otro método de producción. Se aprecia también que la técnica tiene algunas ventajas sobre los otros procesos como:

1. No es necesario tener un control muy restringido de la composición química del material para obtener un tamaño de grano recocido especificado.
2. Se puede producir un amplio rango en el tamaño de grano recristalizado y consecuentemente un amplio rango de propiedades mecánicas, variando únicamente la cantidad de deformación intermedia.
3. Los efectos del envejecimiento son inhibidos en el primer tratamiento de recristalización por lo tanto no es necesario la incorporación de una sección de envejecimiento dentro de la línea de recocido continuo.

El proceso sugerido presenta también algunas desventajas como son;

1. El costo de la línea de recocido continuo convencional se incrementa cuando se adiciona la sección de deformación intermedia.
2. El segundo tratamiento de recristalización incrementa también el costo de la línea de recocido continuo.

Pero estas desventajas pueden ser omitidas debido a que la técnica propuesta incrementa notablemente los rendimientos del gran tonelaje de láminas de acero destinadas para operaciones de conformado.

NOTA

No son evaluados los resultados de los ensayos de resistencia a la fluencia, resistencia a la tensión, elongación total o uniforme y la relación límite de fluencia-resistencia a la tensión, porque estos fueron obtenidos de otro trabajo de investigación. < 58 >

Sin embargo, en capítulos anteriores se hace una breve descripción de como fueron realizados, así como también se explica de una manera clara y sencilla los resultados obtenidos de tales ensayos. Lo anterior se hizo con la única finalidad de que el lector tuviera una secuencia en el presente trabajo de investigación, además de que tenga una idea clara de todo el trabajo experimental que se realizó para llegar a el objetivo principal de este tema de investigación, variación de tamaño de grano del material que es sometido al proceso de recocido continuo.

CAPITULO VI

6.0 Conclusiones

Se fijan una serie de conclusiones para el material empleado en la presente investigación (acero bajo carbono y reducido en frío entre 60-70 %), que fue sometido al ciclo térmico propuesto y dentro de los límites empleados en el programa experimental (cantidad de deformación, temperatura y tiempo de recocido).

1. En el ciclo propuesto, no fue necesario tener un control restringido de la composición química del material para asegurar el desarrollo de un tamaño de grano recristalizado adecuado.
2. Los efectos del envejecimiento fueron reducidos en el primer ciclo de recocido, en donde se realizó un enfriamiento rápido, debido a que el material se mantuvo a bajas temperaturas con el único fin de inhibir o reducir dichos efectos. Por lo que se refiere al segundo ciclo de recocido los efectos de envejecimiento fueron mínimos y satisfactorios a causa del tipo de enfriamiento empleado (aire).

3. La respuesta final del material con los dos tamaños de grano de inicio fue semejante. Tal respuesta puede ser evidenciada particularmente por las propiedades mecánicas reflejadas para ambas muestras de tamaño de grano.
4. La temperatura de recocido tuvo una fuerte influencia sobre la deformación crítica. Tal deformación disminuyó conforme la temperatura de recocido aumentaba.
5. Se experimento un tamaño de grano grande en o ligeramente mayor a la deformación crítica. Este tamaño de grano disminuyo rápidamente conforme se incrementaba la cantidad de deformación.
6. Controlando la cantidad de deformación intermedia, es posible producir un amplio rango de tamaño de grano recristalizado final y consecuentemente un amplio rango de propiedades mecánicas sin variar la temperatura y tiempo de recocido empleado en el presente trabajo.
7. La cantidad de deformación aplicada al material para producir un tamaño de grano recristalizado final apropiado fue de 20-30 % para ambos tamaños de grano.
8. Se puede garantizar un tamaño de grano adecuado en la producción de láminas de acero para operaciones de conformado empleando la técnica propuesta, recristalización - deformación - recristalización.

9. No existe una variación muy significativa en las propiedades mecánicas de material que ha sido tratado por la técnica propuesta con aquellas propiedades que refleja un material que ha sido tratado por otro proceso de recocido comercial.

10. El costo del ciclo propuesto es sumamente elevado a causa de que consta de una sección de deformación y una sección de un segundo ciclo de recristalización adicional. Más sin embargo el costo de estas unidades adicionales puede ser minimizado debido a que en la técnica propuesta se incrementan notablemente los rendimientos de grandes tonelajes de láminas de acero destinadas para operaciones de conformado. Por tal razón es un proceso altamente productivo y sumamente económico.

CAPITULO VII

7.0 Sugerencias para Trabajos Posteriores

Con referencia a las conclusiones detalladas en el capítulo anterior podemos observar que el éxito del método propuesto para la producción continua de láminas de acero con calidad de estampado es obvio. No obstante se cree que es necesario hacer una serie de sugerencias para perfeccionar aún más la técnica propuesta.

- a). Podrían realizarse experimentos con la técnica sugerida empleando otros grados de acero los cuales son normalmente recocido por lotes. También puede experimentarse con aceros que se encuentren normalmente deformados plásticamente en frío pero tal vez en cantidades mayores o menores.
- b). Podría investigarse en experimentos adicionales cuál es el efecto de variar el espesor del material de inicio y si esto podría causar una influencia significativa sobre la ductilidad del material.
- c). Con la cantidad de deformación intermedia experimentada (20 - 30 %), el material reflejó buenas propiedades mecánicas para la producción de láminas de acero con calidad estampado profundo, pero podría investigarse si la variación en propiedades es notable cuando dicha cantidad de deformación es incrementada.

- d). Se podría modificar el rango de calentamiento en el segundo ciclo de recocido de recristalización, ya que se cree posible que este parámetro podría tener algún efecto sobre la cantidad de deformación intermedia necesaria para desarrollar un tamaño de grano adecuado.

APENDICE A

TABLA A-I

EFFECTO DE LA TEMPERATURA DE RECOCIDO SOBRE
LA DUREZA SUPERFICIAL DEL MATERIAL

| TEMPERATURA (°C) | DUREZA (R 30-T) |
|-----------------------|----------------------|
| 500 | 80.64 |
| 525 | 79.83 |
| 550 | 70.29 |
| 575 | 59.24 |
| 600 | 55.98 |
| 625 | 56.50 |
| 650 | 57.09 |
| 675 | 55.75 |
| 700 | 54.94 |

TABLA A-II

EFFECTO DE LA TEMPERATURA Y TIEMPO DE RECOCIDO
 SOBRE LA DUREZA SUPERFICIAL DEL MATERIAL

| TIEMPO (MINUTOS) | TEMPERATURA (°C) | DUREZA (R 30-T) |
|---------------------|-----------------------|----------------------|
| 2 | 600 | 82.25 |
| | 625 | 81.05 |
| | 650 | 64.90 |
| | 675 | 57.40 |
| | 700 | 57.10 |
| 5 | 600 | 59.80 |
| | 625 | 57.80 |
| | 650 | 56.40 |
| | 675 | 56.40 |
| | 700 | 55.60 |
| 7 | 600 | 58.70 |
| | 625 | 56.85 |
| | 650 | 53.50 |
| | 675 | 55.95 |
| | 700 | 54.45 |
| 10 | 600 | 57.40 |
| | 625 | 56.20 |
| | 650 | 56.90 |
| | 675 | 55.30 |
| | 700 | 55.25 |

TABLA A-III

EFFECTO DEL TRATAMIENTO ISOTERMICO SOBRE LA DUREZA
 EN EL MATERIAL DE INICIO
 (TEMPERATURA DE RECOCIDO 700°C)

| LOG. DE TIEMPO (MINUTOS) | DUREZA (R 30-T) |
|-----------------------------|--------------------|
| 1.0 | 79.02 |
| 2.0 | 79.10 |
| 3.0 | 62.00 |
| 3.5 | 57.00 |
| 4.0 | 55.80 |
| 15 | 54.20 |

| LOG. DE TIEMPO (HORAS) | DUREZA (R 30-T) |
|-----------------------------|--------------------|
| 2.0 | 53.7 |
| 4.0 | 53.0 |
| 24 | 51.0 |

TABLA IV

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.I.
 No. ASTM : 8.4899
 \bar{l} : 0.0175 mm.

| TEMPERATURA 715°C | | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | |
| | No. ASTM | \bar{l} , mm. |
| 5 | 8.6790 | 0.0167 |
| 10 | 8.8536 | 0.0152 |
| 15 | 5.2575 | 0.0550 |
| 20 | 5.9783 | 0.0400 |
| 25 | 6.4942 | 0.0350 |
| 30 | 7.1936 | 0.0280 |

TABLA IV

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.II

No. ASTM : 6.0244

\bar{l} : 0.0400 mm.

| TEMPERATURA 715°C | | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | |
| | No. ASTM | \bar{l} , mm. |
| 5 | 8.8842 | 0.0155 |
| 10 | 8.9736 | 0.0150 |
| 15 | 5.4869 | 0.0500 |
| 20 | 6.1439 | 0.0380 |
| 25 | 6.5726 | 0.0345 |
| 30 | 7.3599 | 0.0260 |

TABLA V

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.I.
 No. ASTM : 8.4899
 \bar{l} : 0.0175 mm.

| TEMPERATURA 705°C | | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | |
| | No. ASTM | \bar{l} , mm. |
| 5 | 8.4278 | 0.0177 |
| 10 | 8.3927 | 0.0175 |
| 15 | 5.9038 | 0.0420 |
| 20 | 6.1655 | 0.0390 |
| 25 | 6.2362 | 0.0375 |
| 30 | 6.4481 | 0.0350 |

TABLA V

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.II

No. ASTM : 6.0244

\bar{l} : 0.0400 mm.

| TEMPERATURA 705°C | | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | |
| | No. ASTM | \bar{l} , mm. |
| 5 | 7.0652 | 0.0300 |
| 10 | 5.9734 | 0.0400 |
| 15 | 5.0093 | 0.0600 |
| 20 | 5.2937 | 0.0530 |
| 25 | 5.4260 | 0.0500 |
| 30 | 5.8205 | 0.0420 |

TABLA VI

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.I.

No. ASTM : 8.4899

\bar{l} : 0.0175 mm.

| TEMPERATURA 675°C | | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | |
| | No. ASTM | \bar{l} , mm. |
| 5 | 9.1839 | 0.0145 |
| 10 | 9.0153 | 0.0150 |
| 15 | 9.3874 | 0.0132 |
| 20 | 5.8928 | 0.0420 |
| 25 | 6.3750 | 0.0360 |
| 30 | 6.8216 | 0.0315 |

TABLA VI

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.II.

No. ASTM : 6.0244

\bar{l} : 0.0400 mm.

| TEMPERATURA 675°C | | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | |
| | No. ASTM | \bar{l} , mm. |
| 5 | 6.3828 | 0.0385 |
| 10 | 7.2590 | 0.0275 |
| 15 | 6.9861 | 0.0300 |
| 20 | 6.0324 | 0.0400 |
| 25 | 5.8179 | 0.0420 |
| 30 | 5.9840 | 0.0400 |

TABLA VII

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.I.
 No. ASTM : 8.4899
 \bar{l} : 0.0175 mm.

| TEMPERATURA 650 °C | | | |
|----------------------|---------------------------|---|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | | |
| | No. ASTM | | \bar{l} , mm. |
| 5 | ----- | } Material no recrista lizado. | ----- |
| 10 | ----- | | ----- |
| 15 | ----- | | ----- |
| 20 | ----- | | ----- |
| 25 | ----- | | ----- |
| 30 | ----- | | ----- |

TABLA VII

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.II
 No. ASTM : 6.0244
 \bar{l} : 0.0400 mm.

| TEMPERATURA 650°C | | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | |
| | No. ASTM | \bar{l} , mm. |
| 5 | 7.5236 | 0.0250 |
| 10 | 7.6428 | 0.0240 |
| 15 | 7.8031 | 0.0215 |
| 20 | 7.9157 | 0.0205 |
| 25 | 8.5092 | 0.0175 |
| 30 | 8.7749 | 0.0162 |

TABLA VIII

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.I.
 No. ASTM : 8.4899
 \bar{l} : 0.0175 mm.

| TEMPERATURA 610°C | | | |
|----------------------|---------------------------|---|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | | |
| | No. ASTM | | \bar{l} , mm. |
| 5 | ----- | } Material no recrista lizado. | ----- |
| 10 | ----- | | ----- |
| 15 | ----- | | ----- |
| 20 | ----- | | ----- |
| 25 | ----- | | ----- |
| 30 | ----- | | ----- |

TABLA VIII

EFFECTO DE LA DEFORMACION INTERMEDIA, TEMPERATURA DE RECOCIDO Y TAMAÑO DE GRANO INICIAL SOBRE EL TAMAÑO DE GRANO RECRISTALIZADO FINAL

TAMAÑO DE GRANO INICIAL: T.G.II.

No. ASTM : 6.0244

\bar{l} : 0.0400 mm.

| TEMPERATURA 610°C | | |
|----------------------|---------------------------|-----------------|
| DEFORMACION (%) | T A M A Ñ O D E G R A N O | |
| | No. ASTM | \bar{l} , mm. |
| 5 | 8.2198 | 0.0190 |
| 10 | 8.3233 | 0.0180 |
| 15 | 8.3845 | 0.0175 |
| 20 | ----- | ----- |
| 25 | ----- | ----- |
| 30 | ----- | ----- |

APENDICE B

Envejecimiento del Acero Recocido

El envejecimiento de aceros al carbono es el resultado de la precipitación del intersticial de carbón sólido y nitrógeno desde la sobresaturación en ferrita. El envejecimiento es observado a través del cambio en las propiedades mecánicas del material y ocurre en acero si el rango de enfriamiento desde la temperatura de recocido es suficientemente rápido.

Evaluación Experimental

En el primer tratamiento de recristalización (recristalización I) las muestras fueron recocidas isotérmicamente a una temperatura de recocido de 700°C por períodos de tiempo constante de 5 minutos y 24 horas respectivamente. Una vez finalizado el tiempo de permanencia las muestras fueron templadas utilizando como medio de temple agua con hielo a una temperatura aproximada de 2°C .

Fue característico en este proceso el rango de enfriamiento rápido, lo cual ocasionó que suficiente carbono permaneciera en solución sólida y que las láminas de acero tuvieran un alto grado de susceptibilidad al envejecimiento. Lo anterior se observó, porque las muestras resultantes de tal ciclo térmico fueron empleadas para ensayos de dureza y ensayos de tensión, y los resultados de los ensayos mostraron una variación considerable en las propiedades mecánicas con respecto a las que se esperaban.

Por tal motivo se procedió a colocar las muestras en refrigeración a una temperatura aproximada de -10°C , inmediatamente después de que habían sido templadas y de que se encontraban a temperatura ambiente.

Lo anterior se realizó así porque la literatura reporta que manteniendo el material a temperaturas bajas (menores de 0°C) se elimina o reduce por lo menos los efectos de envejecimiento.

Cuando las muestras iban a ser deformadas se sacaban de refrigeración se esperaba a que estuvieran a temperatura ambiente y en ese momento eran deformadas por laminación a la cantidad deseada.

Por lo que se refiere al segundo tratamiento de recristalización (recristalización II), el enfriamiento se hizo al aire, por lo que los efectos de envejecimiento no se presentaron en el material aún después de mucho tiempo.

Conclusión

Se comprobó para el primer tratamiento de recocido (recristalización I) que muestras que fueron mantenidas en refrigeración no mostraban una diferencia significativa en propiedades mecánicas con aquellas en las cuales se efectuó un enfriamiento lento.

Para el segundo tratamiento de recocido (recristalización II), se comprobó que el enfriamiento fue suficientemente lento asegurando así que las propiedades de envejecimiento fueran satisfactorias.

VOCABULARIO

VOCABULARIO

ACERO BAJO CARBONO:

Acero que contiene cantidades mínimas de carbono y sólo cantidades residuales de otros elementos.

ALUMEL:

Aleación de base níquel con aproximadamente 2.5% de Mn, 2% de Al y 1% de Si, utilizado principalmente como componente de los termopares pirométricos.

AUSTENITA:

Solución sólida de uno o más elementos en hierro cúbico centrado en la cara.

CARBONITRURACION:

Introducción de carbono y nitrógeno dentro de una aleación sólida ferrosa manteniéndola por encima de A_{c1} en una atmósfera que contiene gases apropiados como hidrocarburos, monóxido de carbono y amoníaco. La aleación carbonitrurizada se endurece generalmente por temple.

CARBURO:

Compuesto de carbono con uno o más elementos metálicos.

CARBURIZACION:

Introducir carbono en una aleación sólida ferrosa manteniéndola por arriba de la temperatura crítica inferior en contacto con un material carbonoso adecuado, el cual puede ser un sólido, un líquido o un gas.

CEMENTITA:

Compuesto de hierro y carbono conocido químicamente como carburo de hierro, con la fórmula química aproximada Fe_3C .

CROMEL:

Aleación de 90 Ni - 10 Cr, utilizada en termopares. Serie de aleaciones al níquel-cromo, algunas con hierro, utilizadas para aplicaciones resistentes al calor.

DEFORMACION:

Medida del cambio en la forma o tamaño de un cuerpo, referido a su forma o tamaño original. La deformación lineal es el cambio por unidad de longitud de una dimensión lineal (en la dirección del esfuerzo aplicado).

DEFORMACION CRITICA:

Deformación apenas suficiente para causar el crecimiento de granos muy grandes durante el calentamiento donde no tiene lugar transformación alguna.

DEFORMACION ELASTICA:

Cambio de dimensiones que acompaña a la tensión en el intervalo elástico; las dimensiones originales se restauran al suprimir la carga.

DEFORMACION POR ENDURECIMIENTO:

Incremento en dureza y resistencia causado por deformación plástica a temperaturas inferiores que las del intervalo de recristalización.

DEFORMACION PLASTICA:

Deformación que permanece al suprimir la carga que produce la deformación.

DESCARBURIZACION:

Pérdida de carbono de la superficie de una aleación ferrosa como resultado de calentar en un medio oxidante que reacciona con el carbono presente en la superficie.

DUCTILIDAD:

Capacidad de un material para deformarse plásticamente sin fracturarse, medida por la elongación o reducción de área en una prueba de tensión.

DUREZA:

Resistencia del metal a la deformación plástica generalmente por indentación. Puede medirse por varias pruebas de dureza como Brinell, Rockwell o Microdureza.

ELASTICIDAD:

Propiedad de un material en virtud de la cual tiende a recuperar su tamaño y forma originales después de la deformación.

LIMITE ELASTICO:

Carga máxima a la que un material puede someterse sin que resulte ninguna deformación permanente después de la liberación completa de la carga.

ELONGACION:

Incremento en la longitud calibrada de la muestra, medida después de la fractura de la muestra entre puntos dentro de la longitud calibrada de la muestra, generalmente expresada como porcentaje de la longitud original de la muestra.

ENSAYOS DE DUREZA SUPERFICIAL ROCKWELL:

Forma de ensayo de dureza rockwell mediante cargas relativamente ligeras que producen penetración mínima. Utilizado para determinar la dureza superficial o la dureza de secciones delgadas o piezas pequeñas, o donde una gran impresión de dureza podría ser perjudicial.

ENVEJECIDO:

En una aleación, un cambio en propiedades que generalmente ocurre con lentitud a temperatura ambiente y con más rapidez a temperaturas superiores.

ESFEROIDAL:

Calentar y enfriar para producir una forma globular de carburo en acero.

EUTECTICO:

Reacción isotérmica reversible en que una solución líquida se convierte en dos o más sólidos íntimamente mezclados al enfriar, cuyo número de sólidos formados es el mismo que el de componentes que integran el sistema.

EXTENSOMETRO:

Instrumento para medir los cambios causados por cargas en una dimensión lineal de un cuerpo.

FERRITA:

Solución sólida de uno o más elementos en hierro cúbico centrado en el cuerpo.

FLUENCIA:

Cambio en el comportamiento del material de la zona elástica a la de inestabilidad o a la plástica directamente.

LIMITE DE FLUENCIA:

Carga en la que un material exhibe una desviación específica, de la proporcionalidad existente entre la carga y la variación de longitud. Una compensación del 0.2% se utiliza para muchos metales.

FORMABILIDAD:

Facilidad relativa con que un metal puede conformarse mediante la deformación plástica.

GRANO:

Cristal individual en un metal o aleación policristalina.

TAMAÑO DE GRANO:

Medida de las áreas o volúmenes de granos en un metal policristalino, generalmente expresado como promedio cuando los tamaños individuales son bastante uniformes.

INCLUSIONES:

Materiales no metálicos en una matriz sólida metálica.

HIERRO ALFA:

Hierro puro con sistema cristalino cúbico centrado en el cuerpo, estable a temperaturas inferiores a 910°C .

INTERSTICIAL:

El compuesto se forma por la unión entre los elementos de transición, como el titanio, el tantalio, el tungsteno y el hierro, con el hidrógeno, el oxígeno, el carbono, el boro, y el nitrógeno.

Intersticial significa "entre los espacios" y los últimos cinco elementos tienen átomos relativamente pequeños que se acomodan en los espacios de la estructura cristalina del metal.

LAMINACION:

Reducir el espesor de la sección transversal de una placa de metal, o conformar productos de metal, mediante el empleo de rodillos.

METODO DE INTERCEPTOS:

Método para determinar el tamaño de grano, contando el número de granos por unidad de longitud intersecados por líneas rectas.

METALOGRAFIA:

Ciencia que estudia la constitución y estructura de metales y aleaciones reveladas ya sea con el microscopio óptico o con un instrumento más sofisticado, como el microscopio electrónico.

MICROESTRUCTURA:

Estructura de metales pulidos y atacados químicamente, revelada por un microscopio a una amplificación mayor de diez diámetros.

NUCLEACION:

Inicio de una transformación de fase en sitios discretos, creciendo la nueva fase sobre los núcleos.

NUCLEO:

Primera partícula estructuralmente estable, capaz de iniciar la recristalización de una fase o el crecimiento de una nueva fase que posee una intercara con la matriz original.

PRECIPITADO COHERENTE:

Precipitado en una etapa intermedia entre una fase sobresaturada distinguible, formado a partir de ésta pero reteniendo aún la red del solvente aunque la red esté deformada. Tal precipitado no tiene límite de fase.

PROPIEDAD MECANICA:

Propiedades de un material que revelan su comportamiento elástico y plástico cuando se aplica una carga, indicando de este modo su adaptabilidad para las aplicaciones mecánicas.

RECOCIDO:

Calentar y mantener a una temperatura adecuada y luego enfriar a una rapidez apropiada, para reducir dureza, mejorar la maquinabilidad, facilitar el trabajado en frío, producir una microestructura deseada u obtener las propiedades mecánicas deseadas.

RECOCIDO DE RECRISTALIZACION:

Recocido del metal trabajado en frío para producir una nueva estructura de grano sin cambio alotrópico.

RECRISTALIZACION:

Formación de una estructura nueva, de granos libres de deformación a partir de un metal trabajado en frío, generalmente llevada a efecto por calentamiento.

RESISTENCIA A LA TENSION:

Relación de carga máxima aplicada al área original de la sección transversal. Máxima carga convencional, en tensión, que un material puede soportar.

TEMPERATURA DE RECRISTALIZACION:

Temperatura mínima aproximada a la que ocurre recristalización completa de un metal altamente trabajado en frío dentro de un tiempo especificado.

TEMPLE:

Endurecimiento de una aleación ferrosa mediante enfriamiento rápido.

TERMOPAR:

Dispositivo para medir temperaturas; consta de 2 aleaciones diferentes, que producen una fuerza electromotriz aproximadamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre sus extremos de unión, caliente y frío.

TIEMPO EFECTIVO DE PERMANENCIA:

Es el tiempo total al que debe sujetarse un material cuando ha alcanzado la temperatura para homogeneización del núcleo.

TRABAJO EN FRIO:

Deformación plástica de un metal a temperatura inferior a la de recristalización.

TRATAMIENTO TERMICO:

Calentar y enfriar un metal o aleación sólida en tal forma que se obtengan las condiciones o propiedades deseadas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS



REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Harold. E. McGannon;
The Making, shaping and Treating of Steel.
United States Steel.
Novena Edición. 1971. Capítulo 33, Pág. 861-978.

2. G.F.Harvey.
The Journal of the Australian Inst. of Metals.
Vol.22. No. 1. Marzo 1977. Pág. 28-37.

3. H.B.Helm, W.H.Swisshelm, W.F.Carter, John Soyring.
Simposio sobre Hornos para Recocido.
Iron and Steel Engineer 32. Marzo 1955. Pág. 73-81.

4. E.N.Archibald.
Técnicas Modernas en la Reducción en Frío de Láminas.
Iron and Steel Engineer 34. Marzo 1957. Pág. 141-146.

5. G.A.Hawdon.
ISI Spe. Rep. No. 79. 1963. Pág. 13-21.

6. J.A.Bauscher, J.K. Magor.
Usos de Procesos para Rollo Abierto.
Iron and Steel Engineer 39. Mayo 1961. Pág. 73-84.

7. C.L.Kobrin.
Iron Age. Vol. 199. 1967. Pág. 55-88.

8. D.J.Blickwede.
ISI Yearbook. 1961. Pág. 167-194.

9. S.H.Kalin., E.M.Ouchy.
AIME. Met. Conf. Series Flat Rolled.
Prod. III. Interscience Publishers, N.Y. 1962.
Vol. 16. Pág. 99-111.

10. drever, Horace, C.E.Peck, H.W.Lynn, E.B.Fitzgerald.
Simposio sobre Recocido Continuo para Láminas de Acero.
Iron and Steel Engineer 34. Febrero 1957. Pág. 69-94.

11. H.C.Morrow.
Recocido Continuo para Láminas de Acero.
Control en una línea de R.C. a alta velocidad.
Mechanical Engineer 76. Diciembre 1954. Pág. 990-994.

12. A.F.Mohri, R.F.Mehl.
Recrystallization Metals Handbook. (Ed. 1948).
American Society for Metals. Pág. 170-190.

13. M.A.Adams, J.R.Bevan.
ISI Spec. Rep. No.95. 1966. Pág. 135-142.

14. Eberhard Doenst, Jean-Claude Zinn.
Primera Línea de R.C. para Láminas de Acero en Europa.
Metallurgical Plant and Technology.
Vol.6. No.1. 1983. Pág.64-74.

15. Harold E. McGannon.
The Making, shaping and Treating of Steel.
United States Steel. Novena Edición. 1971.
Capítulo 33. Pág. 977-979.

16. S.Garber.
Journal of ISI. Vol. 200. Pág. 466-471.

17. D.J.Blickwede.
AIME. Met. Conf. Series. Interscience, N.Y. 1959.
Vol.1. Pág. 91-92.

18. Sidney H. Avner.
Introducción a la Metalurgia Física.
Segunda Edición, 1988.
McGraw-Hill de México.,S.A. de C.V. Pág. 111-152.

19. American Society for Metals.
Metals Handbook. Properties and selection of Materials.
Vol. 1. Octava Edición. 1969. Pág. 321.

20. W.T.Lankford et al..
Transactions ASM. Vol. 42. Pág. 1200.

21. M.V. Balakrishnan, O'Neil.
ASM Source Book on Forming of Steel Sheet.
1976. Pág. 100.

22. H.S.Erisman.
ASM Source Book on Forming of Steel Sheet.
1976. Pág. 84.

23. ANNUAL Book of ASTM Standards. 1976.
Vol. 3. Parte 3.

24. R.L.Rickett, F.C.Kristufek.
ASM Transactions. Vol. 41. 1949. Pág. 1113.

25. Precipitation Out of Dual Solid Solutions of Carbon and
Nitrogen in Alpha-Iron.
Acta Metalúrgica. Vol 2. 1964. Pág. 361.

26. A.S.Keh, W.C.Leslies.
Materials Science Research.
Vol. 1. Plenum Press. 1963. Pág. 208.
27. M.G.H.Wells, J.F.Butler.
ASM Transactions. Vol. 59. 1966. Pág.427.
28. K.F.Hale, D.McLean.
Journal, Iron & Steel Institute.
Vol. 201. 1963. Pág. 337.
29. R.I.Whitfify, D.I.Wise.
4th. Mechanical Working Conference of Flat-Rolled .
AIME. Chicago. 1962.
30. M.Atkinson et. al..
Sheet Metal Ind.. 1963. Pág. 49,57.
31. R.F.Dewsnap.
Recent Developments in Annealing.
ISI. Spec. Rep. No. 79. 1963. Pág. 112-120.
32. E.W.Williams.
ISI. Spec. Rep. No. 79. 1963. Pág. 87-92.

33. Mandolfo, Zmeskal.
Engineering Metallurgy. McGraw-Hill. Pág. 161.

34. Eric R. Morgan, Donald J. Knight.
Jones and Laughlin Steel Corp.
AIME. 1965. Pág. 379-400.

35. A.F.Mohi.
Iron Steel Engineer. Vol. 33. Pág. 148-154.

36. W.H.Gibbon.
ISI. Spec. Rep. No.79. 1963. Pág. 101-111.

37. P.W.Davies et. al..
ISI. Spec. Rep. No.79. 1963. Pág. 121.127.

38. W.H.Gibbon et al..
Journal of the ISI. Septiembre 1967. Pág. 910.927.

39. J.E.Erhardt, Jr..
AIME. Met. Conf. Series. Flat-Rolled Prod. VII.
Interscience Publishers. N.Y. 1962.
Vol. 16. Pág. 123-128.

40. K.Toda et al..
SEAISI. Quarterly. Octubre 1974.

41. Canadian Patent No.948,530. 1974.
K.Toda, H.Gonda et.al..
Nippon Steel Corp..Tokyo,Japan.

42. K.Toda, B.Kawasaki, T.Saiki.
Iron and Steel Engineer. Octubre 1973.

43. K.Toda, S.Hanai et al..
Steet Metal Insustries. Septiembre 1974.

44. United States Patent No.3,798,076.
M.Shimizu, H.Takechi et al..
Nippon Steel Corp. Tokyo,Japan.

45. T.Kurihara, K.Nakaoka et al..
Iron an Steel Engineer. Agosto 1974.

46. Canadian Patent No. 949,809.1974.
H,Kubatera, H.Inagaki et al..
Nippon Kokan Kabushiki Kaisha. Tokyo,Japan.

47. Canadian Patent No. 949,809.1974.
H,Kubatera, H.Inagaki et al..
Nippon Kokan Kabushiki Kaisha. Tokyo,Japan.

48. H.Kubotera, K.Nakaoka et al..
The Iron and Steel Institute of Japan.
Research Article No. 663.

49. Canadian Patent No. 931,483. 1973.
H.Kubatera, Y.Hashimota et al..
Nippon Kokan Kabushiki Kaisha. Tokyo,Japan.

50. Nippon Kokan K.K.
NKK-CAPL-Process for Drawing Quality Cold Strip.
Technical Billetin. 1976.
(Tech. No. 284-018).

51. SAE Standard J403.
SAE Handbook. 1986.
Publicado por la Sociedad de Ingeniería Automotriz.

52. ASTM. 1988. Anual Book of Standards.
Designación E8. Pág. 120-138.

53. ASTM. 1991. Anual Book of Standards.
Designación E-112. Pág. 289-299.

54. H.Abrams.
Grain Size Measurement by the Interscept Method.
Metallography. Vol.4. 1971. Pág. 59-78.

55. Robert E. Reed Hill.
Principios de Metalurgia Física.
Segunda Edición. 1974.
D.Van Nostrand Company. Pág. 237-313.

56. W.A.Anderson, R.F.Mehl.
Transactions AIME. Vol. 161. 1945. Pág. 140.

57. J.S. Smart, A.A.Smith.
Transactions AIME. Vol. 152. 1943. Pág. 103.

58. Jaime Garcia Vargas.
Recocido Continuo.
Montreal, Cánada. Enero 1979.