

1
2ej.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUIMICA



**EXAMENES PROFESIONALES
FAC. DE QUIMICA**

**"ANALISIS METALÚRGICO DE ACERO BAJO
CARBÓN CONTENIENDO DIFERENTES
CANTIDADES DE Sn"**

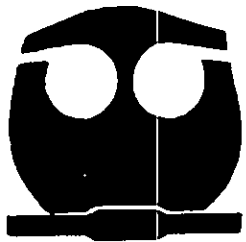
[Faint, illegible text]

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A :

JOSÉ ENRIQUE BALDERAS SILVA



México, D. F.

1998

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

173373



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO

Presidente: Prof. Noguez Amaya María Eugenia
Vocal : Prof. Salas Banuet Guillermo F.
Secretario: Prof. Robert Nuñez Teresita del Niño Jesús
1er. Suplente: Prof. García Galán Sergio
2do. Suplente: Prof. Amaro Villeda Adrián Manuel

Sitio donde se desarrolló el tema:

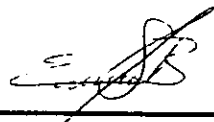
Laboratorios de Fusión, Tratamientos Térmicos, Metalografía y Ensayos
Mecánicos del Departamento de Ingeniería Metalúrgica del edificio "D"
de la Facultad de Química

Asesor del tema



M. en C. María Eugenia Noguez Amaya

Sustentante



José Enrique Balderas Silva

Quiero darle las gracias a todas las personas
que de alguna u otra forma intervinieron
en la realización de esta tesis

uieo a e as a ia a a i e o a e
u a eu a oo u ia y o e e a i a ia

INDICE

	página
I. INTRODUCCIÓN	1
II. ANTECEDENTES	2
A. Ambiente y Reciclaje	2
B. Hojalata Estañada	4
Caja Base	5
Procesamiento del Acero para la Hojalata	5
-Tipos de Acero según su desoxidación	5
El Acero Base	7
-Composiciones Químicas	7
Método de Manufactura	8
Procesos de Estañado	8
-Proceso de Inmersión en Caliente (Hot Dip)	9
-Proceso Electrolítico	9
Procesos de Fabricación de Latas	10
-Manufactura de latas de tres piezas	10
-Proceso de Estampado y Planchado de Pared (DWI)	11
-Proceso de Estampado y Reestampado (DRD)	11
Acero Libre de Estaño (Tin Free Steel)	11
C. Estaño en el Acero	12
Estaño y Elementos Residuales	15
Efecto de otros elementos en pequeñas cantidades	19
Remoción del Estaño	21

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL	22
Introducción	22
Modelo	23
Preparación de los moldes de arena	25
Material y Equipo para los moldes	26
Técnica de Fusión	27
Material y Equipo para la fusión	28
Preparación de la Carga y Fusión	28
Adición del Sn	29
Cálculos de la Cantidad de Sn agregado	30
Desarrollo de los Análisis	31
Análisis Químicos	31
Análisis Metalográficos	31
Pruebas de Dureza	31
Pruebas Mecánicas	31
Análisis con Microsonda	32
Tratamientos Térmicos de Recocido y Normalizado	32
IV. RESULTADOS	33
Análisis Químicos del Acero con Sn	34
Análisis Químicos del Acero obtenido a partir de Hojalata	34
Durezas del Acero con Sn	35
Durezas del Acero obtenido a partir de Hojalata	35
Propiedades Mecánicas del Acero con Sn	37
Propiedades Mecánicas del Acero obtenido a partir de Hojalata	37
Figuras de Microestructuras de Acero con Sn	42
Figuras de Acero con Sn obtenidas con Microsonda	50

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
VI. CONCLUSIONES	60
VII. APÉNDICES	62
Apéndice A	63
Apéndice B	64
Apéndice C	65
Apéndice D	66
Apéndice E	67
VIII. BIBLIOGRAFIA	68

I INTRODUCCIÓN

El estaño es considerado un potencial obstáculo en el reciclado de la hojalata; sin embargo y en general, los investigadores han encontrado que el estaño incrementa la resistencia mecánica, incrementa la dureza aunque decrece la ductilidad y en un mayor o menor grado decrece la tenacidad al impacto. En los estudios reportados hasta el presente, el contenido máximo de estaño analizado en el acero es de 0.30%, en investigaciones enfocadas básicamente a la resistencia mecánica.

El objetivo de esta tesis es, estudiar el efecto de altos contenidos de estaño en un acero al carbón de colada, para simular experimentalmente el tipo de material que se obtendría si se reciclara al 100% la hojalata, realizando un análisis metalúrgico (caracterización de las propiedades junto con la microestructura presente y la composición, para entender su comportamiento).

En este estudio también se analizan otros elementos residuales y no residuales presentes que, junto con el estaño pueden provocar severos problemas metalúrgicos en los aceros. Esta tesis es parte de una investigación del proyecto IN503996 de DGAPA.

II. ANTECEDENTES

A.- Ambiente y Reciclaje:

La protección ambiental ha adquirido tal nivel de importancia que debe ser tomada en cuenta en todas las decisiones de cualquier cadena productiva, desde la obtención de materias primas y utilización de energía, hasta los procesos de producción, el tratamiento de desechos e incluso la forma de consumo de los productos finales.

Esta conciencia ecológica ha provocado que cada vez se incursione en nuevas técnicas y métodos para el tratamiento de basura. En lo referente a latas de acero desechadas, han habido esfuerzos en la búsqueda de una recuperación a gran escala para reutilizarlas como chatarra en la producción de acero¹.

El reciclaje produce ahorros mayores; cada tonelada de hojalata reciclada significa economizar 1.5 toneladas de mineral de hierro, media tonelada de coque y un 74% del consumo de energía (23.65 millones de BTU) en producir una tonelada de acero nuevo sin usar chatarra, además al reciclar se tienen las siguientes reducciones:

- 86% de contaminantes del aire
- 40% del consumo de agua
- 76% de contaminantes del agua
- 97% de residuos mineros²

(cuando 454g de latas de acero se reciclan, se ahorran 5450 Btu; energía suficiente como para mantener un foco de 60 watt prendido por más de 26 horas)³; todo esto, después de remover la capa de estaño de 2 a 3 Kg de estaño por tonelada de chatarra (cerca del 0.25% del peso total)⁴.

Se generan además ahorros indirectos, como el hecho de que la hojalata reciclada no ocupa espacio en los tiraderos de basura (hay una reducción del 12 al 15% en volumen del desperdicio

total y del 5 al 6% de reducción en peso), evita el costo de limpieza futura en los basureros y ahorros en el tratamiento de basura. En la figura I se muestra el reciclaje de la hojalata.



Figura I.- Esquema del reciclaje de la hojalata

Afortunadamente, el acero de la hojalata es poco nocivo para el medio ambiente, ya que se descompone en óxido de hierro, elemento degradable, y en mucho menor proporción en óxido de estaño; sin embargo, tirar ese acero es una pérdida en términos de espacio, energía y materias primas⁵.

Actualmente se recicla el 66% de todo el acero producido en los Estados Unidos para producir acero "nuevo"⁵.

B.- Hojalata Estañada:

La hojalata, es un acero de calidad especial (bajo contenido en carbono) revestido químicamente de ambos lados con una capa fina de estaño comercialmente puro, a la hojalata también se le conoce como "tin plate"; por lo tanto el nombre de hojalata a cualquier lámina de acero es incorrecto.

Las latas de acero han estado en uso desde el siglo XIX; inicialmente fueron desarrolladas por Nicholas Appert en 1809, quién logró tal desarrollo a raíz de una convocatoria de Napoleón Bonaparte el cual ofreció 12,000 francos a quien desarrollara un nuevo método para conservar los alimentos que sus ejércitos consumían; posteriormente, un inglés llamado Peter Durand desarrolló un proceso para preservar alimentos envasados en metal "*canisters*" que fueron producidas con hojas de hierro cubiertas con estaño; desde entonces las latas de acero se han desarrollado en varios aspectos.

La importancia de la lámina estañada en la industria alimenticia es bien reconocida, y su extenso uso atestigua las propiedades únicas de este producto, en el cual están combinadas la resistencia y durabilidad del acero, la resistencia a la corrosión del estaño y la protección electroquímica que el estaño da a los contenidos consumibles; el aluminio por otro lado, no provee dicha acción y está limitado solo para productos con expectativas de vida corta. La lámina estañada ha sido el material ideal para la fabricación de contenedores de alimentos (latas estañadas), aerosoles, latas para bebidas, juguetes, utensilios para cocina y toda una serie de usos; todo esto debido a la protección no tóxica de la capa delgada de estaño.

Caja Base:

La hojalata es usualmente vendida por caja base (*base box*), un término que es único con la industria de la hojalata. Los grados comerciales del "chapeado" de estaño electrolítico disponibles actualmente en el mercado, incluyen pesos de recubrimientos de 0.10 (45.4), 0.25 (113.5), 0.50 (227), 0.75 (340.5) y 1.00 libras (454g) de estaño por caja base, identificados por los números 10, 25, 50, 75 y 100 respectivamente.

La unidad de área es la caja base, igual al área de 112 hojas de un tamaño de 14 pulgadas por 20 pulgadas ó 31,360 pulgadas cuadradas (217.78ft^2 ó 20.31m^2).

Procesamiento del Acero para la Hojalata

El acero usado para la producción de la hojalata es hecho por procesos de hogar abierto y básico al oxígeno. Dependiendo de la rigidez requerida para las diversas aplicaciones, el fósforo puede variar de residual hasta tan alto como 0.15%.

Los aceros al carbón pueden ser clasificados dentro de cuatro tipos, dependiendo de la práctica empleada de desoxidación⁷; esos tipos de acero son:

Aceros Efervescentes (Rimmed).- La parte superior del lingote no tiene cavidad de rechupe, es un acero bajo carbón (<0.15%C) parcialmente desoxidado con ferromanganeso; el contenido de Mn en este tipo de acero no supera el 0.4%. El metal en contacto con las paredes del molde está casi libre de carbono, como no hay reacción con el oxígeno, se forma una capa sana.

Aceros "Capped".- Este acero es una variación del acero efervescente, después que el acero ha efervescido por un periodo corto, el molde es tapado para detener la acción efervescente. Este tipo de lingote tiene una delgada zona de hierro relativamente puro y menor segregación en el corazón como el que tiene un acero efervescente.

Aceros Semi-muertos (Semikilled).- Son frecuentemente usados para aceros al carbón con contenidos de 0.15 a 0.30%C. Se agrega Ferrosilicio y un poco de Aluminio en la olla pero en menor cantidad que el requerido para una acero muerto. También se les conoce como aceros muertos al Silicio.

Aceros Muertos (Killed).- Un acero muerto o calmado es aquel en el cual la desoxidación final se realiza con Aluminio, previniendo cualquier evolución de gas o desprendimiento gaseoso durante la solidificación; en el molde está totalmente calmado y cuando solidifica, en la superficie se forma un rechupe. Todos los aceros conteniendo más del 0.30%C son “muertos”; es el acero más uniforme y químicamente más sano, además de obtenerse un tamaño de grano pequeño⁷.

Es de especial importancia durante la manufactura de la hojalata la selección del acero base con la composición apropiada para el trabajo. Virtualmente toda la hojalata está hecha de aceros teniendo composiciones (del metal en la olla) dentro de los intervalos de composición dados en la tabla 1.

TABLA 1
COMPOSICIONES DEL METAL EN LA OLLA

Elemento	Aceros Rimmed y Capped
Carbono	0.03 a 0.15
Manganeso	0.20 a 0.60
Fósforo	0.15 máx
Azúfre	0.050 máx
Silicio	0.010 máx
Cobre	0.20 máx
Aluminio	

El Acero Base:

La hoja de acero base, conocida como lámina o "placa negra" (black plate), se obtiene a partir de lingotes de acero (virtualmente, todo el acero es producido a partir de colada continua). Para el acero que formará la base del envase, existen cuatro tipos en cuanto a su composición química, los cuales están enlistados en la tabla 2.

TABLA 2
TIPOS DE ACERO UTILIZADO PARA EL ACERO BASE (Ref. 8)

Elementos	Tipo L	Tipo MR	Tipo MC	Tipo D
Carbono	0.12	0.12	0.12	0.03-0.07
Manganeso	0.60	0.60	0.60	0.25-0.40
Fósforo	0.015	0.020	0.04-0.15	0.015
Azufre	0.050	0.050	0.050	0.035
Silicio	0.010	0.010	0.010	0.020
Cobre	0.06	0.20	0.20	0.06
Cromo	0.06			0.05
Niquel	0.04			0.05
Molibdeno	0.05			

Esta tabla especifica el contenido máximo en porciento de elementos
El espacio en blanco significa que no está especificada la tolerancia

Tipo L:

Este acero tiene bajo contenido de fósforo y metales residuales, es utilizado para los productos muy corrosivos.

Tipo MR:

Es similar al tipo L pero tiene un contenido más elevado en cobre. Este grado es usado para productos medianamente corrosivos.

Tipo MC:

Este acero es similar al tipo MR a excepción de que los límites del fósforo se incrementan de 0.04 a 0.15%. Este grado es usado para productos no corrosivos donde la resistencia del contenedor es la principal consideración.

Tipo D:

Este acero se aplica en operaciones donde el metal se tiene que deformar mucho⁸.

Método de Manufactura:

El punto de partida en la manufactura de la hojalata es el laminado en caliente con un espesor típico aproximadamente de 2mm. Este es decapado para remover la escama formada durante el laminado en caliente y el material es entonces laminado en frío hasta el espesor deseado en otro reducido sencillo o doble. Para un reducido sencillo, la reducción del laminado en frío es del orden del 90% y se obtiene un material dentro de un intervalo de espesor de 0.16-0.6mm. Después del laminado, la lámina es suavizada mediante un recocido continuo con el objeto de restaurar la ductilidad; el material recocido es entonces trabajado ligeramente en frío (comúnmente llamado "temper rolling") antes de la operación de estañado; este tratamiento mejora el acabado de la superficie y la alisa, además provee las propiedades mecánicas requeridas para aplicaciones particulares.

En el reducido doble, el acero laminado en frío y recocido es sujeto a una segunda reducción en frío del 30 al 40%. El recocido no se lleva a cabo y el material es trabajado endurecido, exhibiendo una marcada direccionalidad en las propiedades; aquí se obtienen espesores dentro de un intervalo del 0.13 al 0.27mm. La alta resistencia del reducido doble proporciona la facilidad para reducir el costo de una lata u otro componente por decremento en el espesor del material sin perder rigidez.

En este punto el producto reducido doble o sencillo ahora llamado placa negra (black plate) está listo para el recubrimiento de estaño⁹.

Procesos de Estañado:

Los procesos de inmersión en caliente y el electrolítico -que se explicarán a continuación, son procesos que se utilizan para producir tin plate:

Proceso de Inmersión en caliente (Hot Dip):

El primer paso es el decapado, con el fin de remover todos los contaminantes de la superficie tales como óxidos ligeros, resultado de los tratamientos de recocido. El decapado se realiza con H_2SO_4 con una concentración del 2 al 6% a una temperatura de 65° a 82°C de 2 a 4 minutos, seguido de un enjuague con agua fría. Posteriormente el acero decapado se almacena en una solución de HCl al 0.10% hasta estar listo para el estañado.

La máquina estañadora consiste de una serie de guías para que las hojas sean cubiertas (a partir de mecanismos de alimentación) con estaño por medio de inmersión en baños de estaño fundido, a la salida del baño, se le dá un baño de aceite de palma para protegerlo de la oxidación; seguido de esto, pasa a una máquina de lavado para remover el exceso de aceite de la hoja recubierta; y por último pasa por un apilador en donde las hojas son apiladas. En los Estados Unidos, en 1971 menos del 0.1% de la hojalata producida era fabricada por el proceso de inmersión en caliente.

Proceso Electroлитico:

Antes de 1937, toda la hojalata producida era manufacturada por el proceso de inmersión en caliente⁸; pero a principios de 1935, fueron diseñadas y construidas pequeñas unidades experimentales de electrodeposición de estaño en acero, a partir de los resultados de esos estudios, apareció la hojalata electroлитica comercial en 1937.

El desarrollo temprano de la hojalata electroлитica en los Estados Unidos estaba dando un mayor ímpetu ya que no podía obtenerse un producto con un recubrimiento ligero por el proceso de inmersión en caliente. La urgente necesidad de conservar estaño durante la Segunda Guerra Mundial, dió una fenomenal expansión al desarrollo del proceso de la hojalata electroлитica y en 1948 más de la mitad de esta era producida electroлитicamente.

El electroestañado puede estar acompañado con electrolitos acidos (fenolsulfónico, cloruro-fluoruro, fluoroborato o sulfato), alcalinos o acidos-halógeno⁸.

El proceso Ferrostan involucra la electrodeposición de estaño para la producción de la hojalata.

Previamente a la deposición del estaño, la lámina de acero es limpiada con un decapado electrolítico seguido de un lavado; el proceso Ferrostan usa un baño ácido de sulfato estanoso y estaño con una pureza no menor a 99.85%.

El baño alcalino para la deposición del Sn en acero opera a una temperatura de 80°C y a una concentración de KOH de 0.25N (condiciones estrictamente controladas en el baño debido a que las eficiencias de corriente y densidad de corriente son funciones de la temperatura y la concentración de KOH).

Después de la deposición (dentro de un intervalo de 2.25 a 30 gr/m²), el recubrimiento es fundido con un calentador de inducción de alta frecuencia o de resistencia a una temperatura superior al punto de fusión del estaño(232°C), e.g. 260-270°C, seguido por un enfriamiento en agua.

Este tratamiento produce una superficie reflectiva y además resulta la formación de un compuesto de hierro-estaño (FeSn₂) íntimamente unido a la superficie del acero, esta capa es totalmente delgada y juega un importante rol en la resistencia a la corrosión y las características de sueldeo del material. El producto es entonces pasivado por inmersión en una solución de dicromato, la cual deposita una película muy delgada de cromo en la superficie. Después de la pasivación, una capa delgada de aceite es aplicada para preservar la superficie de un ataque y además para aumentar las propiedades de lubricación en operaciones subsecuentes⁹.

Procesos de Fabricación de Latas:

Para la fabricación de latas se emplean tres procesos:

Manufactura de latas de tres piezas:

Las latas de tres piezas consisten de un cuerpo cilíndrico soldado y dos extremos, uno de los cuales (la base) debe de ser adherida al cuerpo de la lata por el fabricante de la lata y la otra debe

de ser aplicada después del llenado; el cuerpo cilíndrico, está hecho con lámina rectangular con pre-laca y los dos filos son unidos con soldadura eléctrica, después de la soldadura, es aplicado un recubrimiento de laca.

Los extremos de la lata son colocados por medio de presión, en una operación que requiere un alto grado de precisión. Los extremos son contorneados con una serie de anillos en expansión, con el fin de que ellos soporten la presión interna. Latas de este tipo son usadas para alimentos, pinturas, aceites; y químicos.

Proceso de Estampado y Planchado de Pared (Drawing and Wall Ironing-DWI):

El proceso DWI, es más moderno que el de tres piezas, el DWI elimina la necesidad de soldar y se utiliza presión sobre un disco cilíndrico. Durante el planchado de la pared, la lata reduce sustancialmente el espesor de la pared y complementariamente incrementa la altura del cuerpo. Posteriormente, la decoración es aplicada en el exterior y la aplicación de laca en el interior. Estas latas son utilizadas para cerveza y bebidas suaves, así también para alimentos para humanos y mascotas.

Proceso de Estampado y Re-estampado (Draw and Redraw-DRD):

El proceso DRD, es semejante al proceso DWI, pero la razón máxima altura/diámetro es menor que la alcanzada por el DWI; no obstante, el DRD tiene una mayor ventaja sobre el DWI, en que hojalata con pre-laca puede ser usada, eliminando así costosas operaciones de limpieza. Las latas DRD son usadas para alimento para mascotas y para humanos incluyendo alimentos para niños⁹.

Acero Libre de Estaño (Tin Free Steel):

El acero libre de estaño (tin free steel), puede ser descrito como el terminado de la lámina negra (producto del método de reducción en frío) adicionalmente procesado y "chapeado" con cromo electrolítico de aproximadamente 0.3 micropulgadas más una película de óxido de cromo

trivalente generalmente dentro de un peso de 0.3 a 2.0 mg. por pie cuadrado; aunque tiene una resistencia a la oxidación superior a la lámina negra, debe ser cubierto con laca en ambas superficies para ser usado para contenedores. El acero libre de estaño (tin free steel), tiene una excelente adhesión con los recubrimientos orgánicos, lo cual hace de este producto conveniente para el empaque de ciertos alimentos y bebidas (cerveza y bebidas suaves)⁸. El acero libre de estaño (tin free steel), fue desarrollado debido a la extrema variación del precio del estaño y fue introducido al mercado en 1966. El acero libre de estaño no tiene problemas de reciclado debido a que el cromo mejora las propiedades del acero; este tipo de acero está tendiendo a incrementarse.

Algunas latas de acero están hechas con acero libre de estaño (tin free steel), mientras otras tienen una tapa de aluminio y un cuerpo de acero y son comúnmente llamadas latas de bimetálico.

C.- Estaño en el Acero:

En la Industria de la Fundición de Hierro fueron tolerados altos niveles de estaño, en donde este era utilizado como un estabilizador de perfito; sin embargo, un contenido de estaño tan alto como el 1% del peso total daba una gran indisponibilidad para la fabricación de acero, en donde la presencia de estaño generaba considerables problemas metalúrgicos.

El incremento del uso de latas bimetálicas en 1970 y 1980 agregó una complicación, en que ciertos niveles de contaminación de aluminio en la fabricación de acero, causaba considerables problemas en la manufactura del hierro, en donde el aluminio solo podía ser disminuido por dilución⁵.

El estaño es un fuerte agente fragilizante en los procesos de temple y revenido, así como durante el temple de aceros aleados, en donde en cada caso el estaño se segrega *a priori* en las fronteras del grano austenítico y promueve la falla intergranular.

Aunque un revenido fragilizante es menos marcado en aceros al carbón, se ha demostrado que el estaño se segrega en las fronteras del grano ferrítico del hierro¹⁰; consecuentemente uno puede esperar que el estaño decrezca la tenacidad de aceros comunes al carbón y baja aleación.

Las pruebas Charpy (para determinar la tenacidad) realizadas por E.T. Stephenson¹¹; muestran que, en general, el estaño incrementa la temperatura de transición dúctil-frágil, incrementa el rango de transición y decrece la energía interna. La tenacidad de un acero grado A514J (Apéndice A) que tiene aplicaciones en placa y láminas, al igual que un grado X60Cb (Apéndice A) utilizado para tuberías, fueron mínimamente afectados por el estaño (hasta 0.25% Sn que fue el contenido máximo investigado); de igual forma la tenacidad (aunque considerablemente menor) de un grado A514J templado y revenido, mostró una insensibilidad al contenido de estaño similar; por otra parte el máximo efecto del estaño se dió en el acero grado A36 (Apéndice A) que se utiliza para estructuras y placas.

Los análisis establecieron que el efecto del estaño en la temperatura de transición y la energía interna dependen del grado del acero o la combinación del grado y el tratamiento térmico.

E.J. Duckett sugiere¹² que, para minimizar el decremento en tenacidad atendiendo a un incremento de estaño, hay que disminuir el contenido de carbono o azufre o bien incrementar el contenido de manganeso.

Por otra parte, el estaño incrementa la resistencia a la fluencia y la resistencia a la tracción 1.08MPa y 1.29MPa respectivamente por 0.01%Sn en los grados A514J, X60Cb y A36; estos efectos no están influenciados por el grado del acero, tratamiento térmico, una combinación del grado-tratamiento o el nivel del carbono; del mismo modo el estaño decrece la elongación y la reducción de área presentando el mismo comportamiento de no estar influidos por el grado del acero, tratamiento térmico, una combinación del grado-tratamiento o el nivel del carbono¹¹.

El principal efecto de un "alto" contenido de estaño es que no se puede laminar a altas temperaturas; este efecto perjudicial del estaño en el acero fue reconocido durante la Segunda Guerra Mundial cuando en la necesidad de utilizar chatarra en grandes cantidades, se presentaban casos de agrietamiento en caliente (hot shortness) así también que la resistencia del producto se incrementaba y perdía vida de fatiga.

El otro problema reconocido en el pasado fue que la combinación de estaño, azufre y cobre generaban un eutéctico de bajo punto de fusión el cual, por las características de tensión superficial, penetraba en el acero generando graves daños; este fenómeno probablemente ocurría

por los altos contenidos de azufre que prevalecían en el pasado; actualmente los productos de acero tienen niveles de azufre (excepto para grados libres de maquinado) típicamente entre 0.010 a 0.001, por lo que la probabilidad de encontrar este tipo de falla es menor.

Se han realizado trabajos de investigación del efecto del estaño, en donde se han considerado contenidos de estaño altos como 0.04% a 0.30% en donde los efectos son lineales y contenidos de estaño bajos de 0.005% a 0.020%, en donde los efectos no son lineales¹³.

El coeficiente de segregación para el estaño, es decir, el enriquecimiento de la fase líquida con respecto al sólido durante la solidificación, fue estimado por John Elliott y David Robertson; este coeficiente está en el rango de 0.3 a 0.4, esto hace al estaño ser más propenso a segregarse que el Cu, Ni o Si en una aleación. Aparentemente la segregación del estaño es cerca de la mitad que la del azufre, por lo tanto, sustancialmente mayor que para los demás elementos; como el azufre y el estaño segregan juntos durante la solidificación del acero efervescente, esta combinación puede guiarnos a una exageración del efecto perjudicial del estaño en las propiedades del acero; lingotes de acero con un contenido crítico de 0.020 a 0.035%Sn y $\leq 0.012\%S$, pueden ser laminados en frío para obtener hojas de acero¹³.

La ductilidad en caliente de aceros con bajos contenidos de residuales decrece conforme el carbón se incrementa de 0.40 a 1.0% de carbón, y en estos mismos aceros, la ductilidad en caliente decrece marcadamente con las adiciones de estaño. Estadísticamente se ha encontrado que por cada 0.01%Sn, la resistencia a la tracción se incrementa 1.3 MPa, la resistencia a la fluencia se incrementa 1.1 MPa, la elongación decrece 0.07%, la reducción de área decrece 0.13% y la dureza se incrementa 0.4 puntos HRB; no afectando el contenido de carbono o el tratamiento térmico. El estaño decrece la tenacidad a temperatura ambiente en aceros al carbón y aceros aleados, excepto en aquellos que contienen 0.2-0.5% Mo; por otra parte, el estaño decrece la energía interna e incrementa la temperatura de transición, no obstante, la temperatura de transición se incrementa significativamente en contenidos de estaño superiores al 0.4%.

Menos del 0.5% el estaño no tiene efecto en la microestructura, aunque la solubilidad del estaño en la cementita es limitada, no forma en sí carburos o nitruros¹⁴.

Aunque los elementos como impurezas son frecuentemente eliminados durante una operación de fusión y refinación, permanece un contenido suficiente para presentar problemas de agrietamiento en caliente (hot shortness) durante un proceso de forjado para una forma deseada.

Cuando un lingote deformado es calentado para reducir su energía interna, las impurezas se segregan en las fronteras del grano, difundiéndose hacia fuera del interior del grano; es decir, durante operaciones de trabajado en caliente, una ductilidad pobre puede ser el resultado de la segregación en las fronteras del grano o indirectamente una fragilización causada por los fenómenos de recuperación y recristalización.

N. Sarafianos en investigaciones realizadas en un acero con una composición de 0.12%C, 0.45%Si, 0.5%Mn, 0.008%S y 0.3%Sn, encontró que la pérdida de ductilidad en caliente (temperaturas superiores a 723°C) es el resultado de una fragilización causada directamente por la segregación del estaño en las fronteras del grano. No obstante, un incremento del nivel de estaño a 1.6% no causa fragilización a una temperatura de 900°C; la razón de no perder la ductilidad a esta temperatura, está atribuida a la alta fuerza motriz de la difusión en volumen en comparación con la difusión en las fronteras de grano¹⁵.

Estaño y Elementos Residuales

Los elementos residuales son aquellos que no son eficientemente removidos del metal líquido durante la fabricación de acero y pueden por lo tanto concentrarse a niveles relativamente altos con un continuo reciclado; estos elementos son difíciles de remover durante la fabricación de acero; al Sn, Cu, Ni, Cr, Mo (y elementos que no se encontraron en los aceros de este trabajo como: As, Co, Sb y W) se les consideran residuales; por otro lado, está generalmente aceptado que la chatarra es la mayor fuente de elementos residuales.

Los límites máximos de residuales en aceros colados son:

0.30% para Cu

0.50% para Ni

0.40% para Cr

0.20% para Mo

Duckett¹¹ consideró un modelo iterativo de reciclado; asumiendo que los productos de acero son repetidamente recuperados y reciclados con una cantidad constante de adiciones a la aleación y de contaminación de la chatarra, él mostró por un modelo de progresión geométrica que el estaño por ejemplo, se aproxima a valores límites después de cuatro o cinco ciclos. En el límite (reciclamiento infinito), R , la concentración residual promedio en porcentaje de un elemento, puede ser calculado por la ecuación:

$$R = \frac{(r)(c)}{(1-r)}$$

donde c es el porcentaje promedio del residual en la chatarra y r es la razón de chatarra consumida a acero producido y tiene un valor proximado de 0.5.

Altos niveles de Cu residual causan agrietamiento en caliente en la superficie; este tipo de agrietamiento en la superficie, se presenta cuando el acero es trabajado en caliente por encima o cerca de los 1065°C en una atmósfera oxidante. El mecanismo básico del agrietamiento en caliente en la superficie es, el hierro se oxida pero el cobre con su bajo potencial de oxidación no; el cobre es entonces rechazado de la capa oxidada y se concentra en la interfase escama-acero; bajo combinaciones no favorables de Cu residual, el Cu puede alcanzar el límite de saturación en el Fe, entonces se forma Cu fundido en la interfase rodeando las fronteras del grano, fragilizando de este modo al acero y así iniciando el agrietamiento.

Otros elementos residuales con potenciales de oxidación bajos, que se van concentrando en el acero con el Cu, pueden incrementar o decrecer la tendencia de este último causando

agrietamiento en caliente, el Sn es especialmente perjudicial, mientras que el Ni es benéfico; estos elementos afectan la solubilidad límite del Cu en austenita, el punto de fusión y la tensión superficial del Cu en la aleación.

Existen varias aproximaciones disponibles para minimizar el agrietamiento en caliente, la solución más directa es evitando altos contenidos de Cu mediante un control cuidadoso de la carga de chatarra, ó removiendo el Cu con escorias de sulfato que es técnicamente posible pero no económico¹⁸.

El agrietamiento en caliente llega a ser un problema cuando¹⁸:



donde Cu/Sn es tan grande como 4 y A está típicamente de 0.4 a 1.0.

Aleando es otra aproximación para minimizar el agrietamiento en caliente, el Ni es conocido por ser efectivo en razones Ni/Cu cercanos a la unidad. El Si en pequeñas cantidades evita la formación de Cu fundido en la intercara escama-acero; en muchos casos, las especificaciones o los costos excluyen la adición de Ni, Si, ambos elementos o cualquier otro elemento aleante.

Otra aproximación es el recalentamiento a altas temperaturas; dependiendo del contenido de oxígeno en el horno, el recalentamiento a altas temperaturas puede (a) eliminar el Cu del interior de la escama, donde es inocuo o (b) permitir al Cu difundir lejos de la interfase y así prevenir la saturación; no obstante, las altas temperaturas desgastan al refractario.

La escama es un problema reconocido y ha sido asociado con altos niveles residuales de Ni en aceros no aleados; el Cu y el Sn son además sospechosos de contribuir al problema, no obstante, el Sn, Cu y Ni son completamente solubles en Fe y no forman una segunda fase en la interfase.

Aunque el Cr y el Mo son conocidos por formar carburos y nitruros, no han sido reportados con otros residuales en aceros¹⁸.

Los residuales Sn, Cu, Ni y Mo incrementan la resistencia a la fluencia y la resistencia a la

tracción 6.895MPa por 0.1% de elemento, teniendo un efecto fuerte con el Sn y débil con el Mo. Se ha mostrado que el efecto del Sn es independiente de la composición base y del tratamiento térmico. Por otra parte, gran parte de la literatura indica que los residuales Sn, Cu, Ni y Mo decrecen la ductilidad 1% absoluto por 0.1% de elemento, aunque hay pocas instancias que indican que el Ni y el Cr mejoran esa propiedad¹⁸.

La formabilidad, es una propiedad crítica en hojas de acero de bajo carbón y está totalmente reconocido que el Sn incrementa la dureza, la formabilidad es usualmente evaluada por la dureza.

Respecto a la resistencia al impacto el Cu residual puede ser ligeramente benéfico para la tenacidad de los aceros ferríticos-perlíticos. Al igual que el Ni mejora ligeramente la tenacidad del acero, también se ha encontrado que el Cr no tiene efecto en la tenacidad de normalizado en aceros de 0.1 a 0.3%C a temperatura ambiente y el Mo es particularmente perjudicial en la tenacidad de normalizado en aceros con 0.3%C.

El Sn tiende a segregarse en las fronteras del grano teniendo un efecto muy perjudicial en la tenacidad, dependiendo de la composición y el tratamiento térmico.

Los residuales han sido conocidos por incrementar la templabilidad de aceros al carbón y baja aleación; la templabilidad es una medida de la habilidad para formar martensita en un enfriamiento en agua o aceite. El Mo y el Cr son los más efectivos en incrementar la templabilidad, mientras el Sn es la mitad de efectivo y el Ni y el Cu hacen solo una ligera contribución. Investigaciones realizadas por Seibert *et al*¹⁶ encontraron que el Sn no contribuye a la templabilidad en aceros de baja aleación o al manganeso, estos resultados fueron confirmados por Llewellyn *et al*¹⁷. En la tabla 3, se presentan los efectos de los residuales en las propiedades del acero¹⁸.

TABLA 3
EFFECTOS DE ELEMENTOS RESIDUALES EN VARIAS PROPIEDADES DEL ACERO

Propiedad	Sn	Cu	Ni	Cr	Mo
Esfuerzo y Dureza	+	+	+	+,-	+
Ductilidad	-	-	+,-	+,-	-
Endurecimiento por deformación, n	-	-	-	0,-	-
Razón de deformación, r	0	+,-	0	0,-	
Resistencia al impacto	0,-	+	+	0	-
Templabilidad	+0	+	+	+	+
Soldabilidad		-	-	-	-
Resistencia a la corrosión	+	+	+	+	+
Fragilización de revenido	+				

*Un signo + ó - indica respectivamente, un efecto creciente o decreciente con un incremento en la concentración, un cero indica que no fue detectado un efecto, y un blanco significa que no ha sido estudiado.

La calidad de la chatarra está usualmente definida por la concentración de residuales tradicionales como el Sn, Cu, Ni, Cr y Mo, y sus concentraciones en el acero están regularmente monitoreados, una chatarra de baja calidad tiene relativamente altos niveles de residuales y viceversa¹⁸.

La susceptibilidad de grietas depende de la presencia de compuestos de bajo punto de fusión formados por la microsegregación durante la solidificación. Una muy baja razón Mn/S puede causar agrietamiento, y esta se ve seriamente afectada por la calidad de la chatarra¹⁹.

El Cr y el Mo son elementos formadores de ferrita y por lo tanto formadores de carburos cuando hay grandes cantidades de carbono; el carbono y el Ni son elementos formadores de austenita.

Efecto de Otros Elementos en Pequeñas Cantidades:

Los elementos considerados aquí tienen efectos benéficos cuando son usados apropiadamente, aunque bajo ciertas condiciones, su presencia puede ser perjudicial.

Azufre (S): El azufre se combina con el hierro para formar FeS, este sulfuro fragiliza y reduce las propiedades de trabajado en caliente del acero debido a su bajo punto de fusión. El contenido de azufre en los aceros es mantenido a menos del 0.05%; pero si el azufre se encuentra de 0.075 a 0.15% contribuye a la maquinabilidad como resultado de la presencia de sulfuros.

Fósforo (P): El fósforo en pequeñas cantidades (<0.05%) se disuelve en la ferrita incrementando la resistencia mecánica y la dureza; un gran porcentaje de fósforo incrementa la resistencia mecánica con un decremento en la ductilidad ocasionando un agrietamiento en la superficie cuando es trabajado en frío.

Silicio (Si): Cuando el silicio está en el acero en cantidades menores del 0.2%, todo el silicio se encuentra disuelto en la ferrita teniendo un efecto muy pequeño; cuando las cantidades son superiores al 0.2% y no sobre aproximadamente el 0.4%, se obtiene una alta resistencia a la fluencia y a la tracción sin reducir mucho la ductilidad; si el silicio es superior al 0.4%, se observa un marcado decremento en la ductilidad -hablando únicamente de aceros al carbón. Es utilizado como agente desoxidante y refinador en el acero; además de ser un elemento formador de ferrita.

Manganeso (Mn): Es un elemento que está presente en los aceros al carbón; se combina con el azufre y forma MnS (partículas suaves), esto previene la formación de sulfuros de hierro a lo largo de las fronteras de grano, los cuales fragilizan al metal, agrietándolo cuando es laminado en caliente (hot shortness). Si los sulfuros de manganeso no están en grandes cantidades y están bien dispersados, pueden proporcionar propiedades de maquinabilidad deseables; es recomendable que la razón Mn:S esté en el rango 3:1 a 8:1. Es un elemento formador de austenita.

Aluminio (Al): Los aceros desoxidados con aluminio, tienden a tener características de grano refinado debido a las pequeñas partículas de Al_2O_3 que se comportan como núcleos durante la solidificación. Es un elemento ferritizante²⁰.

Remoción de Estaño:

Las técnicas de desestañado fueron parcialmente exitosas de 1920 a 1960, y fue encontrado un mercado estable: la precipitación de cobre. La disponibilidad de otras fuentes de chatarra ferrosa fue incrementándose y la práctica de desestañado de latas usadas fue descontinuada.

La hojalata es algunas veces desestañada, pero el muy bajo porcentaje de estaño en el material, hace el proceso menos rentable que en años anteriores cuando la hojalata era producida con una alta fracción de estaño.

El método más comunmente usado involucra la disolución del estaño (también la capa de aleación hierro/estaño) en sosa cáustica (6-8% a una $T= 70-90^{\circ}\text{C}$), obteniéndose estanato de sodio, de donde se puede recuperar fácilmente estaño metálico con una pureza mínima del 99.95% por medio de electrowinning convencional⁵.

Los procesos de desestañado como la cloración, el fluoborato y el alcalino en caliente no son procesos ambientalmente limpios, producen lodos de óxido de estaño, o simultáneamente disuelven el acero con el estaño, además en estos procesos se tienen problemas para controlar iones de elementos tales como el Pb y el Cr que están presentes en las latas de acero.

Actualmente existe un método electroquímico que resuelve esos problemas de contaminación, mediante la remoción selectiva del Sn apartir del acero de la lata, en donde los ánodos utilizados están hechos de hojalata y el Sn recuperado se deposita sobre un cátodo, reduciendo cualquier lodo que pueda ser formado a partir de la precipitación del óxido de estaño; virtualmente no se generan flujos de desecho. Este proceso de desestañado es muy similar al proceso alcalino de deposición de Sn en acero²¹.

Las capas de esmalte son removidas en soluciones concentradas de KOH (2.5N) a temperaturas superiores a los 82°C ; la remoción del esmalte y la recuperación del Sn son procesos separados, pero para propósitos de simplificación del proceso pueden ocurrir simultáneamente²¹.

III. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Introducción:

Para el desarrollo experimental de esta tesis, se partió de un acero tipo 1524 cuya composición es:

C= 0.286%

Mn= 1.683%

Si=0.183%

P=0.026%

S=0.019%

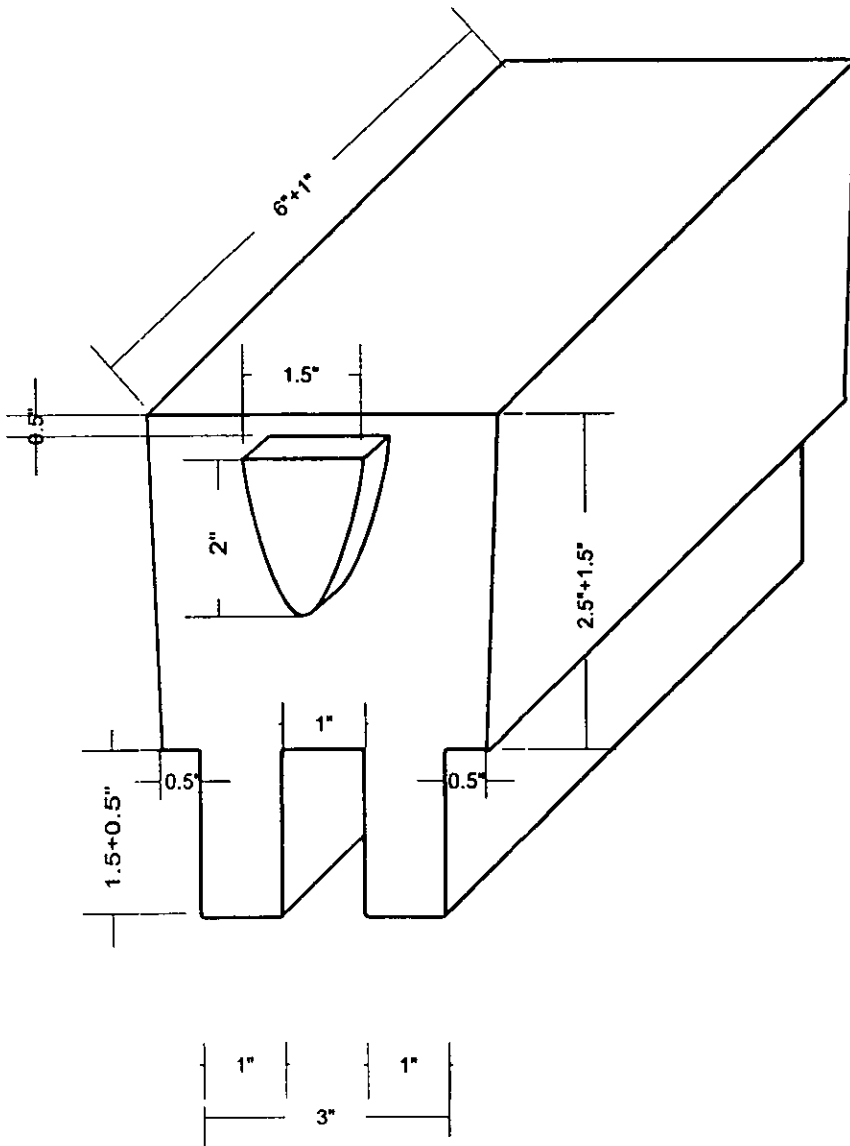
este acero fue escogido para simular experimentalmente el acero base de la hojalata, al cual se le agregaron diferentes cantidades de estaño; todo esto con el fin de analizar como afecta el diferente contenido de estaño a las propiedades del acero; esto se llevó a cabo realizando análisis químicos, análisis metalográficos, pruebas de dureza, pruebas mecánicas (resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, elongación y reducción de área), análisis de microsonda, así como un tratamiento térmico de recocido y normalizado, siguiendo los cambios microestructurales de las probetas de colada, recocido y normalizado; además, se realizaron tres fusiones con recortes de hojalata de acero con la finalidad de hacer una comparación entre el acero que se le adicionó estaño y la hojalata; así también analizar la pérdida-rendimiento del estaño.

Las fusiones de acero que se realizaron, se enlistan en la siguiente tabla:

Muestra	%Sn agregado	Observaciones
BL ₁	0.000	Acero 1524
BL ₂	0.000	" "
A ₁	0.25	" "
A ₂	0.25	" "
B ₁	0.50	" "
B ₂	0.50	" "
C ₁	1.00	" "
C ₂	1.00	" "
X	0.000	Pacas de hojalata
P ₁	0.000	Pacas de hojalata
P ₂	0.000	Pacas de hojalata

MODELO:

El modelo que se utilizó en esta tesis fue un modelo para moldes abiertos para uso a temperaturas elevadas, tiene dimensiones mayores a las especificadas en la designación A395-56T de la ASTM²⁹, pero empíricamente²⁹⁻¹ han demostrado ser las idóneas para obtener probetas para análisis metalúrgicos de aceros de colada. Las dimensiones del molde (incluyendo las especificaciones dadas por la ASTM y las utilizadas en esta tesis) son:



Las longitudes que se presentan como una suma, señalan que el primer valor corresponde al propuesto por la ASTM, y el segundo al incremento que tiene esa longitud.

La función de la parte superior es la de atrapar toda serie de impurezas, segregaciones y rechupe(s); el corazón es el que se va a encargar de “guiar” al rechupe, para que se forme horizontalmente y no verticalmente, evitando de esta forma un posible daño a las probetas.

La parte inferior es la que se utiliza para obtener las probetas y muestras que se van a estudiar.

Preparación de los moldes de arena:

La arena que se utilizó, se le conoce como arena “gruesa”, y tiene una granulometría AFS de 50- 55. Para determinar la composición idónea (basándose en lo recomendado por la literatura de arenas de moldeo), se realizó una serie de pruebas a la arena de careo. Los datos obtenidos para una mezcla arena-agua con 4% de humedad son:

Resistencia a la compresión: 16.00 psi

Densidad: 92.75 lb/ft³

Dureza: 86 Unidades Dieter (UD)

Permeabilidad: 75.67 UD

Resistencia al corte en verde: 4.78 psi

Resistencia al impacto: 57.32 Indice Shatter

La composición de la arena de careo que se utilizó para fabricar los moldes es:

79% Arena gruesa

6% Bentonita sódica

6% Bentonita cálcica

2% Carbón marino

2% Mogúl

1% Harina de madera

4% H₂O (agua)

Material:	Equipo:
Arena gruesa	Molino chileno
Agua	Criba metálica
Aglutinantes: bentonitas de Na y Ca	Báscula
Carbón marino	Equipo de moldeo
Mogul	Equipo de ensayos para mezclas
Harina de madera	Modelo de madera
Arena de relleno	Apisonador
Probeta graduada	Soplete
Recipiente hermético	Pintura de Zirconio
	Alcohol

Para preparar 3000g. de arena de careo, se siguió la siguiente técnica:

Se pesan las cantidades correspondientes a los porcentajes:

- 2379g. Arena
- 180g. Bentonita sódica
- 180g. Bentonita cálcica
- 60g. Carbón marino
- 60g. Mogúl
- 30g. Harina de madera
- 120ml H₂O

El tiempo de mezclado para 3000g. de arena es de 5 minutos, los cuales se hacen de la siguiente manera:

- Se mezcla la arena y el total de agua durante dos minutos, terminado este mezclado, se adicionan los aglutinantes, mogúl, harina de madera y el carbón marino, dejándose mezclar durante tres minutos; posteriormente, la mezcla se pasa a través de una criba metálica (0.63 cm. de abertura) y se conserva en un recipiente hermético hasta ser utilizada. Posteriormente, se procede a realizar el molde.

Debido a las características del modelo (ya presentadas anteriormente) no se utilizaron alimentadores.

El modelo se cubrió con talco y posteriormente con arena de careo (que se hace pasar nuevamente a través de la malla metálica) y se compacta, una vez hecho esto, se coloca la arena de relleno que también se compacta, pero con la ayuda del apisonador.

Después de esto, el modelo se retira con el fin de obtener la cavidad deseada; esta cavidad se sopletea, con el fin de eliminar humedad en el molde; esto debido, a que al vaciar metal líquido, el agua se evapora, produciéndonos grandes poros de tal modo que nuestra pieza se torna inservible.

El siguiente paso para obtener el molde de arena es, pintar la cavidad con pintura de Zirconio (previamente disuelta con alcohol), para obtener un acabado liso y evitar que se pegue la arena a la pieza metálica.

Cuando el molde es terminado de pintar, se elimina el alcohol con la ayuda de un soplete; esto, para dar consistencia a la pintura y también para evitar accidentes.

Técnica de Fusión:

Debido a que el único horno de inducción con el que se cuenta en el Departamento de Ingeniería Metalúrgica es ácido; se tuvo que acondicionarlo a básico para poder fundir acero; el refractario utilizado fué el Magnejar 15-S apisonable en seco (97% MgO); para sinterizar el refractario, se utilizó una preforma hecha con acero laminado, que se puso en el interior del horno (que ya tenía una tela de asbesto y un piso de refractario apisonado); la cavidad entre las paredes

horno-preforma se rellenó con refractario que posteriormente se apisonaba. Para comenzar el proceso de sinterización y lograr una homogeneidad del sinterizado, el interior de la preforma se llenó con trozos de varilla (lo más compacto que se pudo, con el fin de que se obtuviera un calentamiento uniforme); al refractario se le dió un periodo de sinterización de 12 horas.

Esta carga de varilla que se fundió junto con la preforma se desechó, posteriormente se fundió una carga de paca de acero para eliminar posibles residuos.

Material	Equipo
Barra de acero Cold Roll tipo 1524	Horno de inducción
Pacas de hojalata	Recubrimiento básico
FeMn	Moldes
FeSi	Pirómetro
Aluminio	Graficador
CaO	Descorificadores
CaF ₂	Equipo de seguridad
Grafito	

Preparación de la Carga y Fusión:

Las fusiones A₁, A₂, B₁, B₂, C₁ y C₂, se realizaron con barra de acero tipo 1524 Cold Roll de 3/4" de diámetro y aproximadamente 35cm de largo; y las fusiones X, P₁ y P₂ se realizaron con recortes de hojalata de acero (recorte donado por la casa Nestle). Para la fusión de estos recortes fue necesario hacerlos pacas, estas pacas fueron hechas con la ayuda de una prensa hidráulica; todo esto con la finalidad de lograr una mejor fusión al cargar lo más compacto posible el horno (el calentamiento se realiza mediante la inducción).

Para realizar las fusiones, se cargó el horno con algunas barras de acero para comenzar el calentamiento; una vez obtenido acero fundido, se agregaron 50g de grafito y se agregó más barra de acero, hasta llegar a un peso aproximado de 70kg. Seguido de esto, se agregaron 50g de CaO para formar escoria.

Los dos tipos de acero utilizado funden dentro de un intervalo de 1520°C - 1540°C, y el acero fundido se manejó dentro de un intervalo de 1730°C - 1760°C en el horno.

Para obtener una escoria con más fluidez, se agregaron aproximadamente 10g de espato fluor (CaF_2), como el acero líquido está en constante movimiento debido a la inducción que genera el horno utilizado, la escoria se mezcló con el acero líquido favoreciendo la limpieza de nuestro baño líquido. Una vez obtenido todo nuestro acero fundido, se agregaron aproximadamente:

100g de FeSi

100g de FeMn

40g de Aluminio

Las ferroaleaciones se adicionaron para compensar las pérdidas de Silicio y Manganeso en el baño metálico, y el Aluminio para la desoxidación del baño.

Cabe recordar que todo este tratamiento se llevó a cabo para cada 70kg de acero fundido en el horno; cuando las fusiones se realizaban una tras otra, se dejaba un poco de metal líquido en el horno para facilitar la fusión de la siguiente carga.

Adición del Estaño:

Realizando mediciones indirectas, aproximadamente 20kg de metal fundido se vaciaba en la olla (previamente precalentada con un quemador de gas). El intervalo de temperaturas del acero

fundido en la olla era de 1637°C a 1687°C. En la olla se realizó la incorporación del estaño al acero; el estaño fue empaquetado en delgadas láminas de acero (12cm x 12cm) para disminuir la oxidación; esta incorporación se llevó a cabo introduciendo el estaño empaquetado (previamente precalentado para disminuir el choque térmico) en el seno del metal líquido y agitandolo con el fin de obtener una mezcla homogénea, seguido de esto se descorificó el metal líquido para vaciarlo a los moldes dentro de un intervalo de 1600°C a 1646°C.

Para la fusión de las pacas, se siguió el mismo procedimiento y se siguieron las mismas temperaturas (que son las más bajas de los intervalos señalados anteriormente), a excepción que no se agregó estaño, debido a que el recorte de la hojalata contenía una delgada capa de estaño.

Cálculos de la cantidad de estaño agregado:

Cada cálculo se basó en 20kg de acero y suponiendo un rendimiento del estaño del 80% tenemos:

Para 0.25% de Sn:

$$\text{Cantidad de Sn} = \frac{20000\text{g}(0.25\%)}{100\%(0.8)} = 62.5\text{g}$$

Para 0.50% de Sn:

$$\text{Cantidad de Sn} = \frac{20000\text{g}(0.50\%)}{100\%(0.8)} = 125\text{g}$$

Para 1.00% de Sn:

$$\text{Cantidad de Sn} = \frac{20000\text{g}(1.00\%)}{100\%(0.8)} = 250\text{g}$$

Desarrollo de los Análisis

Análisis Químicos:

Para realizar los análisis químicos, se hizo rebaba -muestreada- de cada una de las muestras obtenidas para que fueran analizadas químicamente; los elementos que se analizaron fueron el C, Sn, Cu, Ni, Cr, Al, Mo, Mn, Si, S, P, W y V. Los análisis fueron en parte hechos en el edificio "D" de la Facultad de Química y en parte en un laboratorio metalúrgico exterior.

Análisis Metalográficos:

Se realizó un análisis metalográfico de cada muestra, con el fin de observar la microestructura presente, el grano y otros aspectos importantes de las muestras -inclusiones, sulfuros, posibles segregaciones, etc. Para realizar el análisis metalográfico, todas las muestras fueron montadas, desbastadas (en grueso y fino), pulidas (en grueso y fino), atacadas químicamente en la superficie con Nital 3 y finalmente observadas en un microscopio metalúrgico.

Pruebas de Dureza:

Las pruebas de dureza se realizaron con el durómetro *Macromet 3 Buehler*; el tipo de dureza que se usó fue la dureza Rockwell B (HRB: 100 kg e indentador de 1/16" de diámetro). Para tomar la dureza de cada muestra, se tomaron cinco mediciones de dureza, el valor reportado es el promedio de las durezas tomadas anteriormente. Las pruebas de dureza se realizaron a muestras de colada, recocido y normalizado.

Pruebas Mecánicas:

Las pruebas mecánicas que se realizaron fueron: resistencia a la tracción, resistencia a la fluencia, porciento de elongación y porciento de reducción de área. Las pruebas mecánicas fueron realizadas exclusivamente en el material de colada ya que no había material suficiente para probetas de recocido o normalizado. Estas pruebas se realizaron con una máquina de ensayos mecánicos tipo MTS 810.

Análisis con microsonda:

Los análisis con microsonda, se realizaron para determinar las concentraciones de estaño en el grano y en las fronteras y otros elementos presentes, así también como la distribución de estos en las muestras obtenidas; a todas las muestras de colada y recocido se les mapeó principalmente el Sn; además se mapeó al Mn, Si, S, P, Al y los residuales Cu, Ni, Cr, Mo.

Tratamientos Térmico de Recocido y Normalizado:

El recocido se realizó para observar las muestras de colada al equilibrio así como el normalizado; el tratamiento de austenización se llevó a cabo (en ambos casos) y para los diferentes aceros dentro de un intervalo de temperaturas de 850 a 930°C; para el recocido, el enfriamiento se llevó a cabo en el horno, mientras que para el normalizado el enfriamiento fue a temperatura ambiente. El recocido y el normalizado se realizaron en el laboratorio de tratamientos térmicos.

IV. RESULTADOS

Los resultados de los análisis químicos de las muestras obtenidas, se dan a continuación en las tablas I y I-H:

TABLA I
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE ACERO CON ESTAÑO

	%Sn	%C	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%Al	%Mn	%Si	%S	%P
BL ₁	0.00	0.169	0.1818	0.0704	0.0241	0.0083	0.0712	0.3528	0.2987	0.018	0.011
BL ₂	0.00	0.196	0.1500	0.0722	0.0263	0.0207	0.0338	0.3564	0.2215	0.019	0.013
A ₁	0.30	0.167	0.1849	0.0708	0.0235	0.0113	0.1858	0.3701	0.3815	0.017	0.019
A ₂	0.31	0.184	0.1796	0.0693	0.0200	0.0088	0.0019	0.2874	0.0759	0.018	0.020
B ₂	0.51	0.180	0.1862	0.0750	0.0212	0.0135	0.0000	0.3362	0.2620	0.019	0.016
B ₁	0.58	0.126	0.1850	0.0712	0.0275	0.0221	0.2538	0.3787	0.7731	0.017	0.015
C ₂	1.01	0.289	0.1796	0.0701	0.0348	0.0102	0.0059	0.3253	0.2130	0.018	0.015
C ₁	1.09	0.223	0.1865	0.0712	0.0294	0.0165	0.1947	0.3930	0.6989	0.020	0.020

TABLA I-H
**COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LAS MUESTRAS DE ACERO
OBTENIDAS A PARTIR DE HOJALATA**

	%Sn	%C	%Cu	%Ni	%Cr	%Mo	%Al	%Mn	%Si	%S	%P
P ₁	0.37	0.110	0.0323	0.0188	0.0075	0.0101	0.0058	0.3221	0.2108	0.020	0.045
P ₂	0.30	0.062	0.063	0.034	0.0128	0.0085	0.0017	0.40	0.30	0.017	0.018
X	0.28	0.060	0.040	0.021	0.0029	0.0032	0.0010	0.51	0.21	0.014	0.060

La tabla I corresponde al acero que se le agregó diferente cantidad de estaño, mientras que la tabla I-H corresponde a las muestras de acero que se obtuvieron a partir de hojalata.

En todos los análisis químicos, no se encontró W y V.

El comportamiento de la dureza de las muestras de colada, recocido y normalizado en función del contenido de estaño se observa en la tabla II y en la gráfica 1, en donde se encuentran trazadas las líneas rectas de tendencia de datos. Se ve claramente que los valores de colada tienen un mejor ajuste que los datos de recocido y normalizado.

TABLA II
DUREZA DE LAS MUESTRAS DE ACERO CON ESTAÑO

	%Sn	HRB(C)	HRB(Rec.)	HRB(Norm.)
BL ₁	0.00	69.00	59.26	74.23
BL ₂	0.00	68.60	61.32	67.58
A ₁	0.30	78.50	71.18	80.7
A ₂	0.31	78.60	66.87	81.8
B ₂	0.51	90.50	86.76	94.46
B ₁	0.58	90.10	77.23	92.15
C ₂	1.01	99.10	86.97	101.3
C ₁	1.09	98.90	89.52	102.13

C₂=19.86 HRC; C₁=21.13 HRC

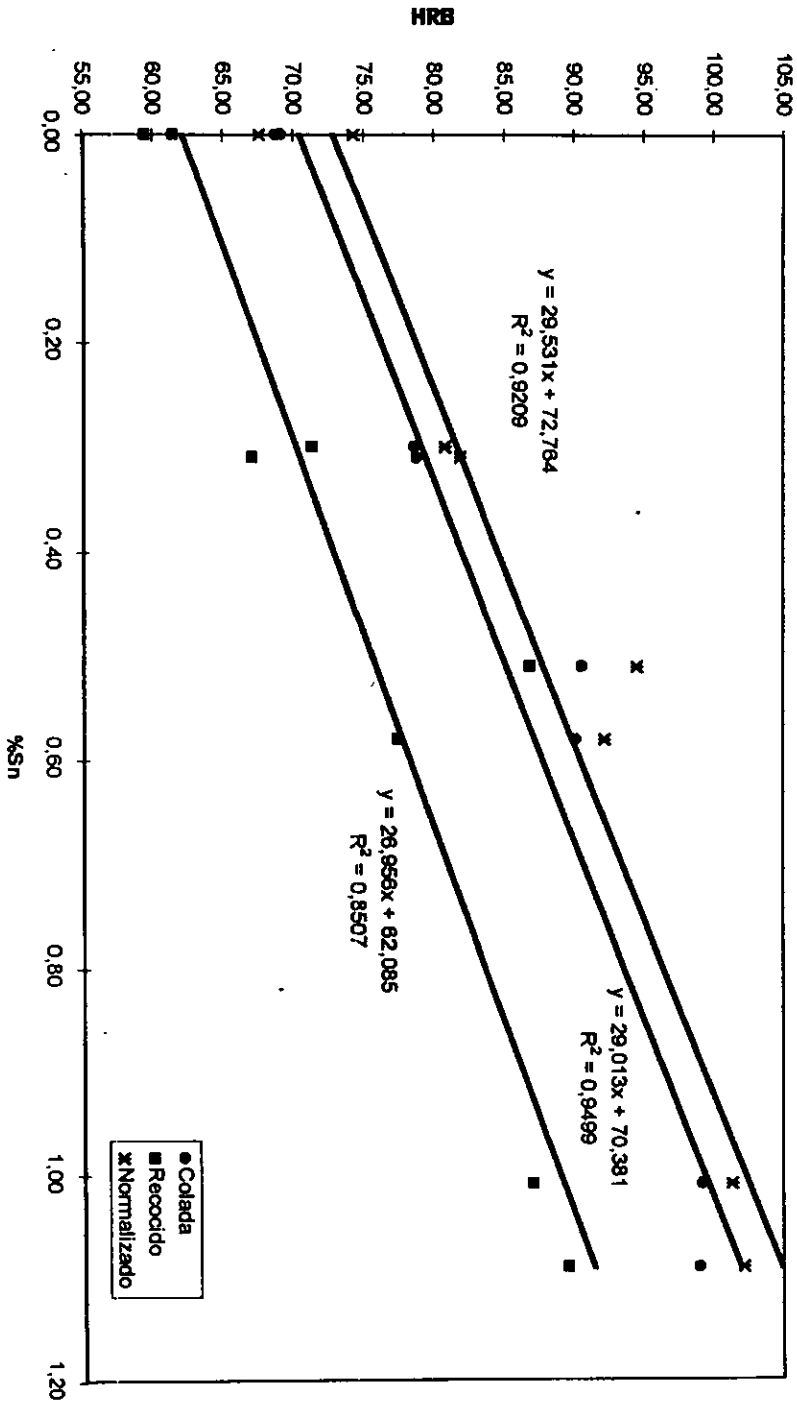
La tabla II-H, muestra el comportamiento de la dureza en función del contenido de estaño de las muestras de hojalata.

TABLA II-H
DUREZA DE LAS MUESTRAS DE ACERO OBTENIDAS
A PARTIR DE HOJALATA

	%Sn	HRB(C)	HRB(Rec.)	HRB(Norm.)
P ₁	0.37	63.95	52.73	68.33
P ₂	0.30	62.43	43.43	72.43
X	0.28	55.66	43.78	61.5

Grafica 1

DUREZA vs %Sn



Los valores que se obtuvieron de las propiedades mecánicas de cada una de las muestras de colada están en la tabla III:

TABLA III
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MUESTRAS DE ACERO CON ESTAÑO

	%Sn	R.Tracción(MPa)	R.Fluencia (MPa)	%Elongación	%Red.Área
BL ₁	0,00	420,3	232	40	56,2
BL ₂	0,00	421,4	226,5	38,8	57,4
A ₁	0,30	470,3	264,1	9,9	7,6
A ₂	0,31	460,9	261,4	9,3	6,5
B ₂	0,51	446,8	374,2	4,6	2,1
B ₁	0,58	356	351,8	2,9	0,8
C ₂	1,01	-	-	-	-
C ₁	1,09	-	-	-	-

-: indica que no hay valor debido a que rompieron fuera de los límites

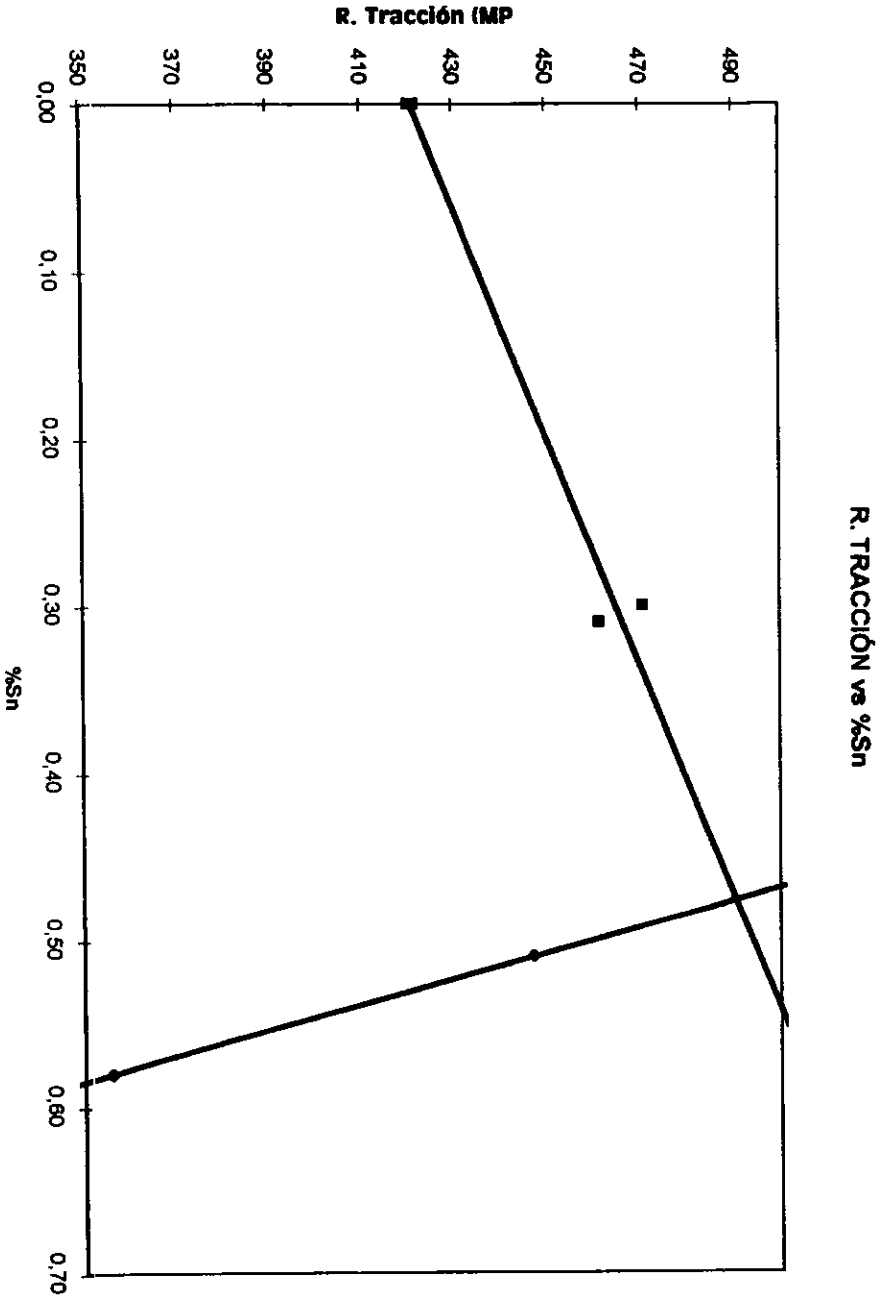
los gráficos de este comportamiento están en las gráficas 2, 3, 4 y 5.

Los valores de las propiedades mecánicas de la hojalata de colada, se muestran en la tabla III-H.

TABLA III-H
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LAS MUESTRAS DE ACERO OBTENIDAS A PARTIR DE HOJALATA

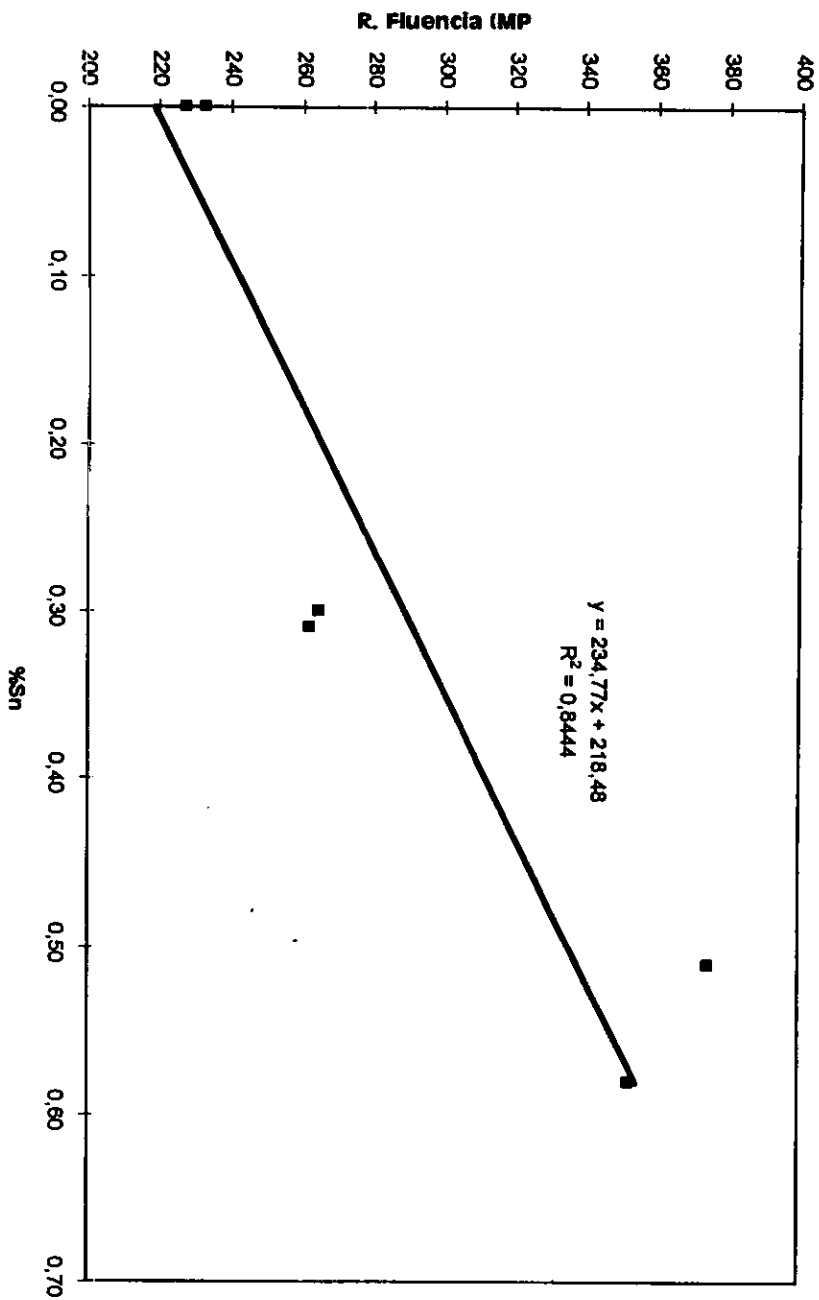
	%Sn	R.Tracción(MPa)	R.Fluencia (MPa)	%Elongación	%Red.Área
P ₁	0,37	373	208,9	44	45,4
P ₂	0,30	378,4	266,5	39,6	37,7
X	0,28	352,7	175,2	34,4	32,6

Gráfica 2



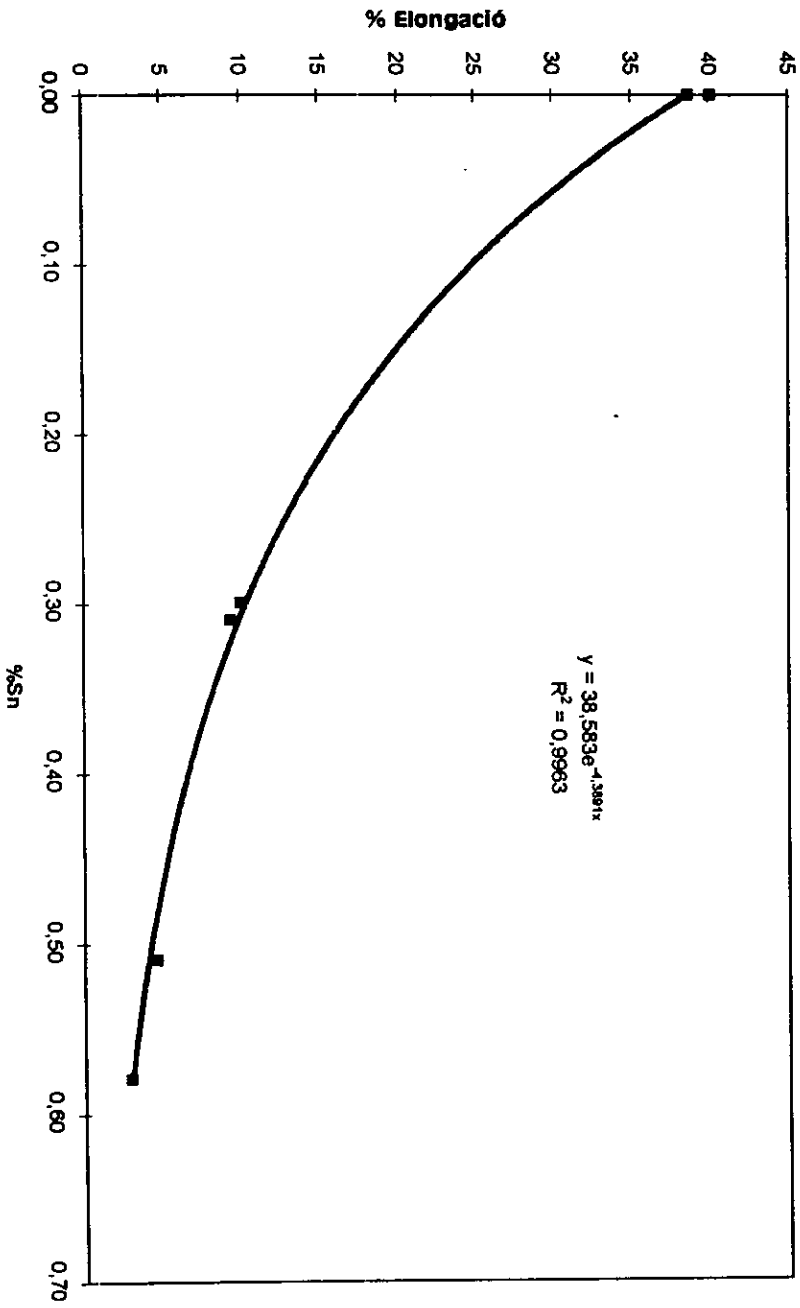
Gráfica 3

R. FLUENCIA vs %Sn



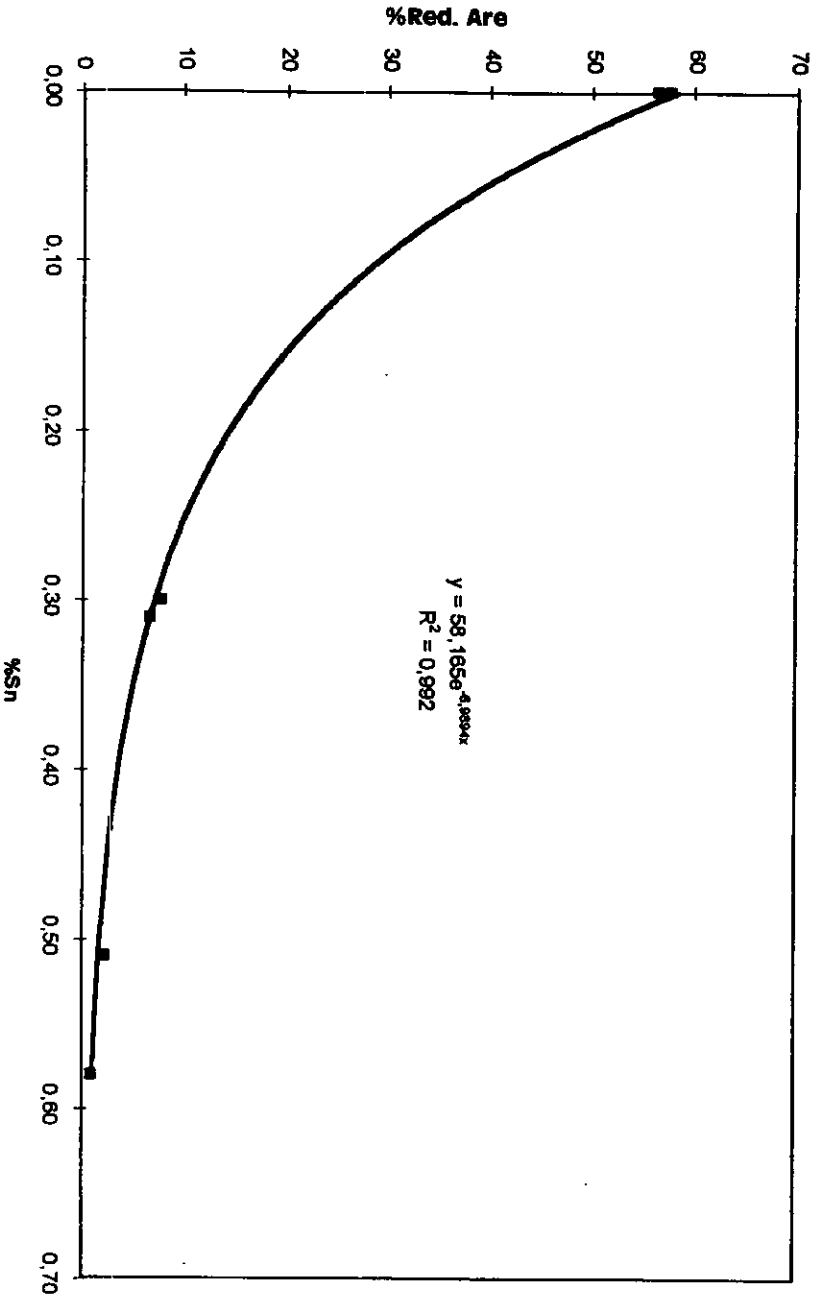
Gráfica 4

% ELONGACIÓN vs %Sn



Gráfica 5

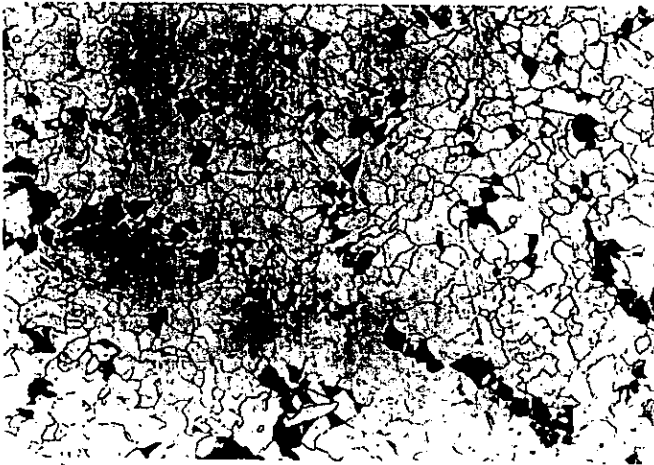
%RED. AREA vs %Sn



Las figuras de las microestructuras representativas de las muestras de acero de colada y recocido se muestran a continuación:



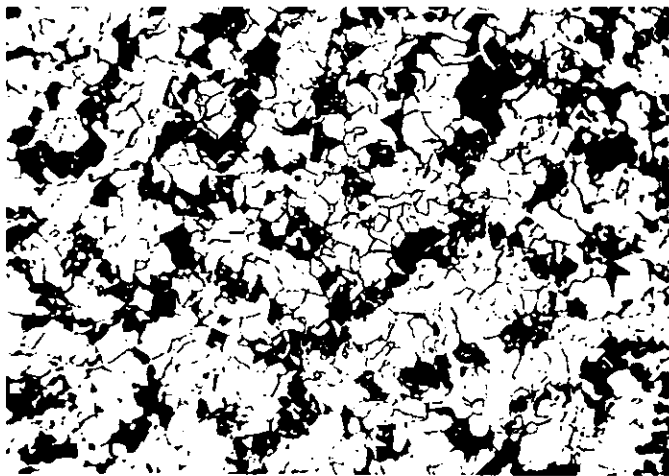
BL (Colada) 100x
Fig. 1



BL (Recocido) 100x
Fig. 2



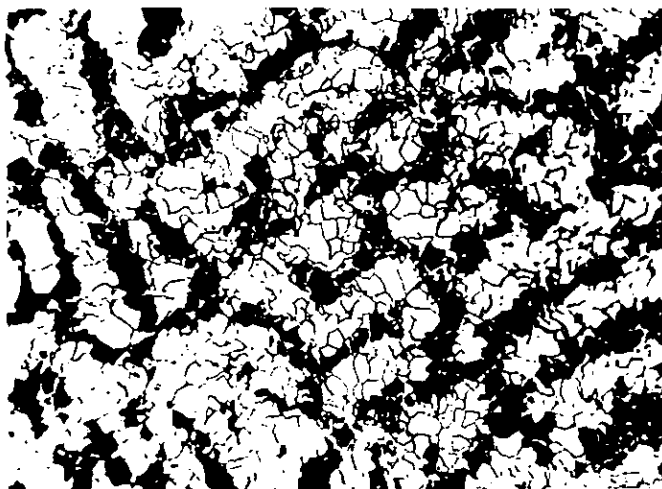
A (Colada) 100x
Fig. 3



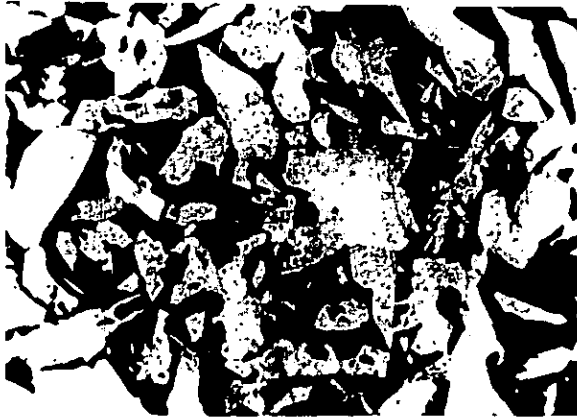
A (Recocido) 100x
Fig. 4



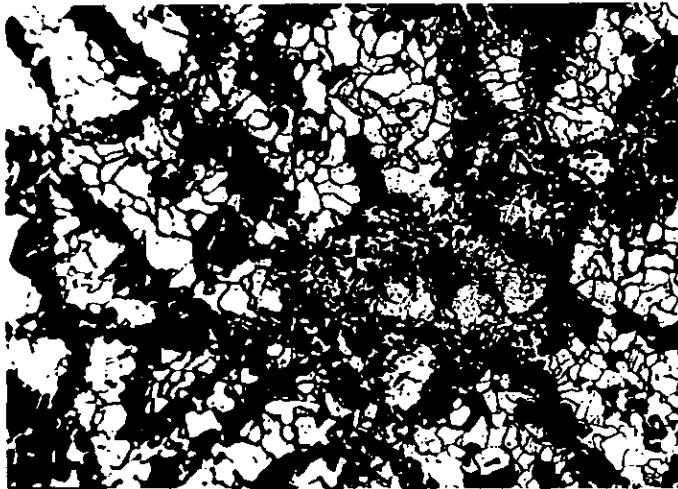
B₁ (Colada) 100x
Fig. 5



B₁ (Recocido) 100x
Fig. 6



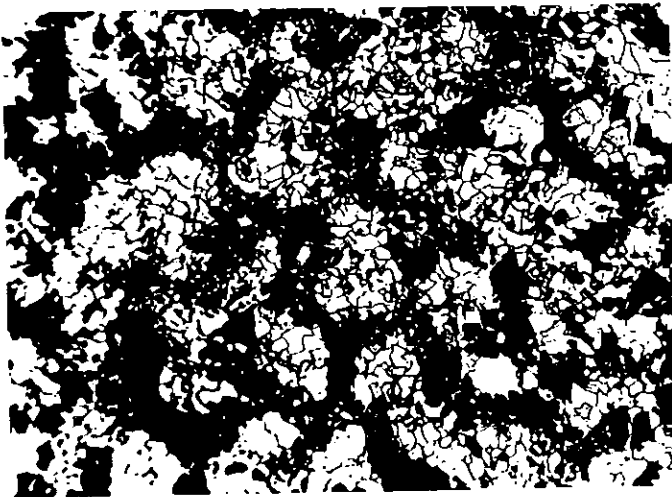
B₂ (Colada) 100x
Fig. 7



B₂ (Recocido) 100x
Fig. 8



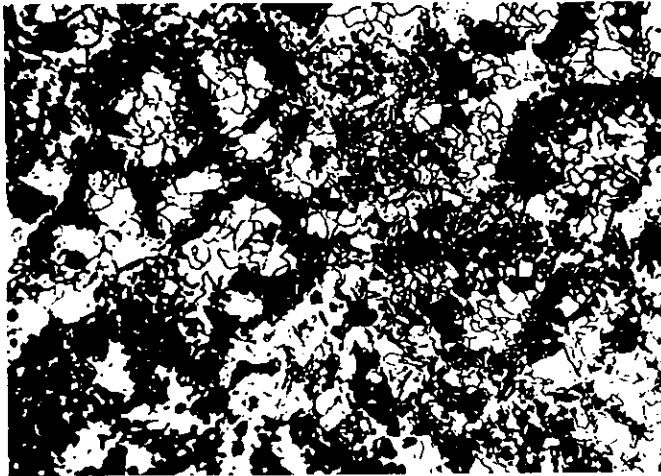
C₁ (Colada) 100x
Fig. 9



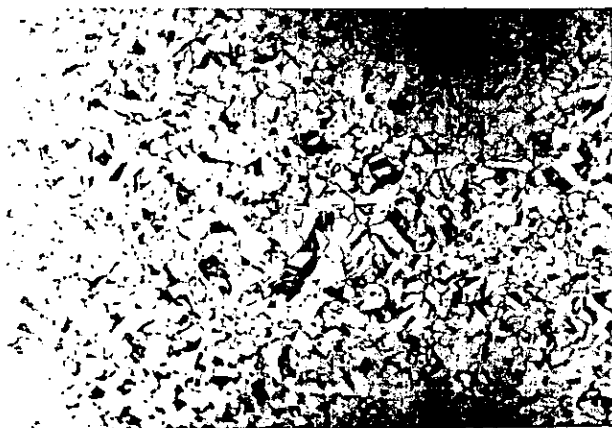
C₁ (Recocido) 100x
Fig. 10



C₂ (Colada) 100x
Fig. 11



C₂ (Recocido) 100x
Fig. 12



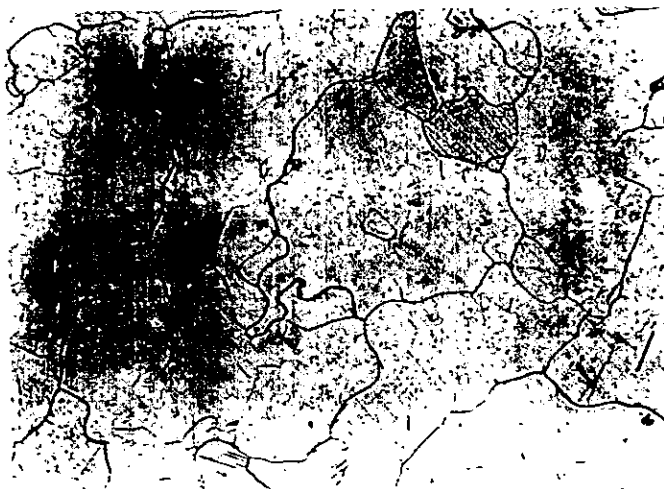
B (Normalizado) 100x

Fig. 13

Las figuras de las microestructuras representativas de colada y recocido del acero obtenido a partir de hojalata se muestran a continuación:

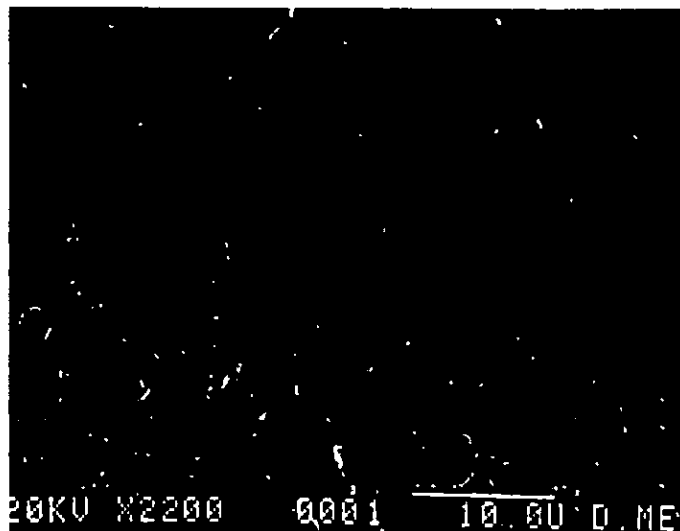


P (Colada) 100x
Fig. 14

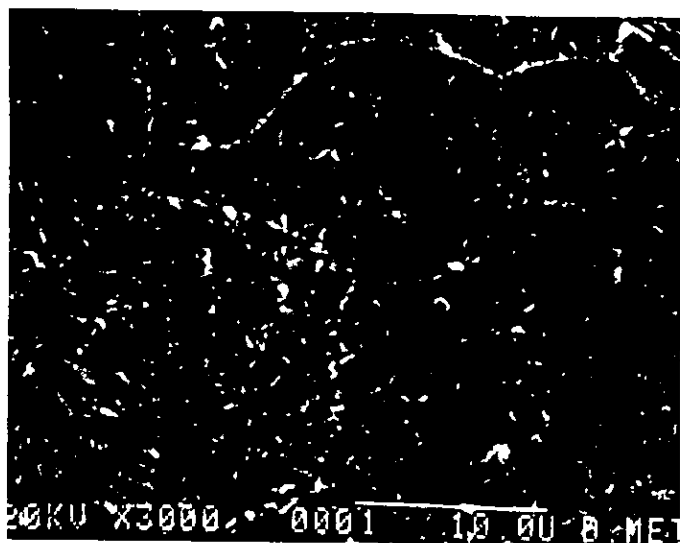


P (Recocido) 100x
Fig. 15

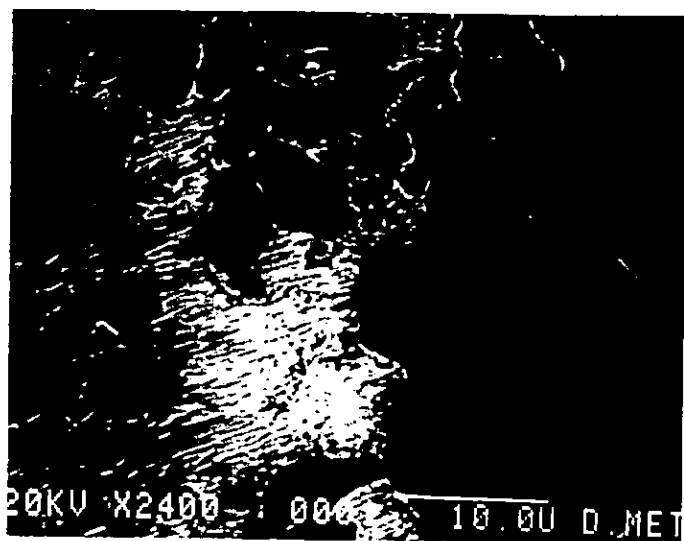
La mayoría de las fotografías tomadas en la microsonda tienen mapeado la distribución del estaño, como se muestran a continuación:



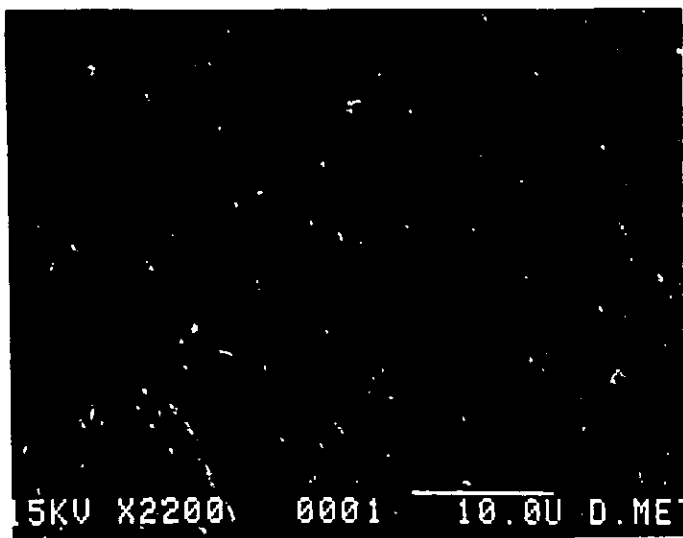
Muestra A (Colada)
con mapeo de Sn
Fig. 16



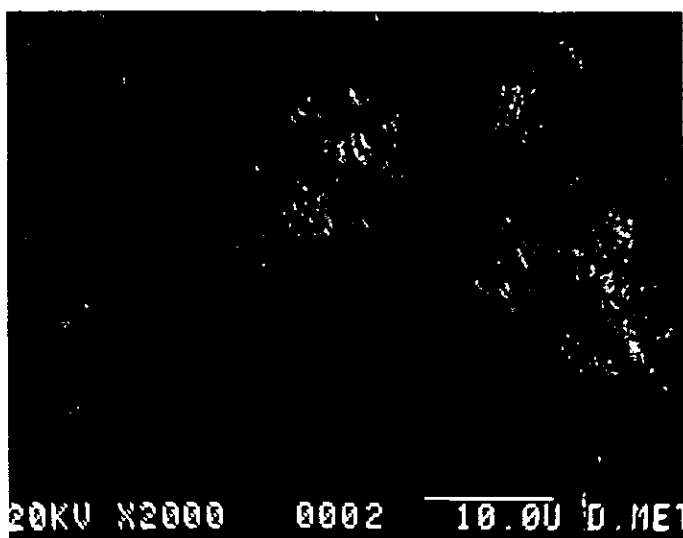
Muestra B (Colada)
con mapeo de Sn
Fig. 17



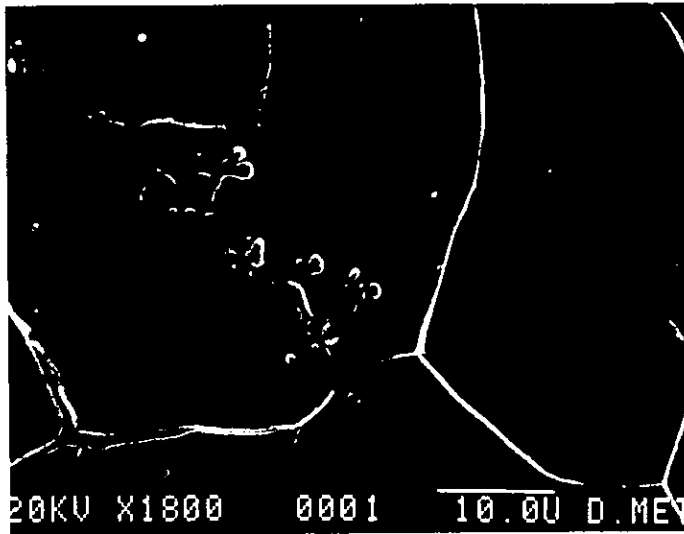
Muestra C (Colada)
sin mapeo de Sn
Fig. 18



Muestra C (Colada)
con mapeo de Sn
Fig. 19



Muestra C (Recocido)
con mapeo de Sn
Fig. 20



Muestra X (Colada)
Fig. 21

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En los análisis químicos mostrados en la tabla I, vemos que la cantidad de estaño va desde 0.00 (que corresponden a las muestras blancas BL₁ y BL₂) hasta 1.09%; estos valores son muy cercanos a los que se habían calculado para obtener probetas para estudiar el efecto del estaño en el acero; el estaño presentó una eficiencia promedio del 89.6%.

El contenido de carbono de cada muestra, está comprendido de 0.126 hasta 0.289%; todas las muestras a excepción de las muestras C₁ y C₂ están dentro de la clasificación de los aceros bajo carbono (<0.20%C). Las muestras C₁ y C₂ están dentro de la clasificación de los aceros de mediano carbono (0.20-0.50%C).

Los elementos residuales como el Cu, está comprendido desde 0.15 hasta 0.1865%; mientras que el Ni va de 0.0693 hasta 0.075%.

El Mn, es uno de los elementos que no tienen mucha diferencia, las cantidades se encuentran entre 0.2874 y 0.3930%. El S no tiene mucha variación, está comprendido entre 0.017 y 0.020%;

En los análisis químicos se observa que hay altos contenidos de Sn, Cu y contenidos de S superiores a 0.010%, los tres elementos que pueden generar un eutéctico de bajo punto de fusión; sin embargo, no se espera gran efecto perjudicial del S debido a los altos contenidos de Mn que prevalecen; aproximadamente la relación Mn:S es de 19:1.

A partir de la relación $Cu + 6Sn > A$, el agrietamiento es un problema cuando A es mayor de 0.4 a 1.0 (18); podemos decir que todas estas muestras a excepción de las muestras blancas, van a presentar un agrietamiento si se trabajan en caliente; además las razones Ni/Cu están dentro del intervalo 0.3817-0.481; estos valores están muy lejanos de la unidad, valor que permite minimizar el agrietamiento (18).

Los contenidos de Cr en las muestras, están dentro de un intervalo de 0.02 a 0.0348%; en lo referente al Mo, los contenidos son muy bajos y algo variables, las cantidades de este en las muestras se encuentra entre 0.0083 y 0.0221%; como elemento residual, puede incrementar

ligeramente la resistencia a la fluencia y a la tracción -dentro de estos contenidos- aproximadamente 0.9MPa. Un contenido de 0.2 a 0.5%Mo, evitaría un decremento de la tenacidad en presencia de Sn a temperatura ambiente si este fuera el caso.

El Aluminio, cuyos contenidos van desde 0.00 (que corresponde a la muestra B₂) hasta 0.2538%, muestran que es uno de los elementos más variables en todas las muestras, posiblemente esto se debió a la variación de la adición del aluminio durante la desoxidación del baño.

El fósforo de todas las muestras, se encuentra en pequeñas cantidades (<0.05%) desde 0.011 hasta 0.020%, en estas cantidades el P se encuentra disuelto en la ferrita, incrementando la resistencia mecánica y la dureza.

Por otra parte, el Si tiene una variación en la composición de las muestras entre 0.0759 y 0.7731%, presentando el máximo valor en la muestra B₁; esta variación también pudo haber sido generada por la variación de la adición de FeSi. Las muestras A₁ y B₂ tienen sus contenidos de Si comprendidos entre 0.2 y 0.4%; estas muestras pueden presentar una resistencia a la fluencia un poco mayor que las muestras A₂ y B₁. De las muestras blancas, la muestra BL₁ (0.2987%Si) también puede presentar una resistencia a la fluencia ligeramente mayor que la muestra BL₂ (0.2215%Si); comportamiento que sí sucede revisando la tabla III.

Los análisis químicos de las tres fusiones que se realizaron con hojalata, muestran que es un acero diferente en comparación al que se le agregó estaño; el acero obtenido a partir de hojalata, tiene al C, Mn, Si, S y P dentro de los contenidos de los aceros bajo carbono (Ver el apéndice D), esto sin tomar en cuenta los altos contenidos de estaño. Considerando los contenidos de los elementos mencionados anteriormente y los elementos residuales, tenemos que la relación Mn:S aproximadamente es de 24:1 (tiene contenidos de Mn ligeramente mayores al acero que se le incorporó estaño, pero mantiene los contenidos de S); con los contenidos de Sn (0.31%) y Cu (0.45%) que contienen estas muestras, se puede esperar un agrietamiento si se trabajan en caliente, ya que la relación $Cu + 6Sn$ es mayor que 0.4-1.0, señalando también que la relación promedio Ni/Cu es igual a 0.538.

En los datos de las pruebas de dureza de colada que se muestran en la tabla II y en la gráfica 1, se ve claramente que conforme se va incrementando la cantidad de Sn, la dureza se va incrementando; este mismo comportamiento se ve en las muestras que se recocieron y se normalizaron; el efecto del estaño en la dureza de los aceros al carbón ya ha sido reportado (14 y 18). Sobresale el punto (0.51%Sn, 86.76HRB) correspondiente a la muestra B₂ recocida, que se sale de la tendencia de los demás puntos, pero podría no ser significativo en comparación con los demás datos.

Analizando los valores de los contenidos de estaño y la dureza obtenida, tenemos que en las muestras de colada, se incrementan 3 puntos de dureza HRB por cada 0.1%Sn; en las muestras recocidas, se incrementan 2.66 puntos de dureza HRB por cada 0.1%Sn; y en las muestras de normalizado, la dureza HRB se incrementa 2.9531 puntos por cada 0.1%Sn. El valor reportado en la literatura (14) es un incremento de 4 puntos de dureza HRB por cada 0.1%Sn.

La dureza del acero obtenido a partir de hojalata es máxima para las muestras que se normalizaron (61.5-72.43HRB) y es mínima para las muestras que se recocieron (43.43-52.73HRB); las muestras de colada presentan una dureza intermedia entre las durezas de los tratamientos térmicos anteriores.

Las pruebas mecánicas fueron realizadas a las muestras que tienen desde 0.00 hasta 0.58%Sn; las muestras C₂ y C₁ que tienen un contenido de Sn de 1.01 y 1.09% respectivamente, no tienen valores de propiedades mecánicas debido a que se rompieron fuera de la zona; esto tal vez pudo haber sido generado por el efecto fragilizante de altos contenidos de estaño.

Analizando los valores que corresponden a la resistencia a la tracción vs %Sn y la gráfica 2, se puede observar que la resistencia a la tracción se incrementa y posteriormente disminuye conforme el contenido de Sn se incrementa. La resistencia a la tracción se incrementa aproximadamente 14.7MPa por cada 0.1%Sn; la referencia (11) señala que hay un incremento en la resistencia a la tracción de 12.9MPa por cada 0.1%Sn, además de que señala que la resistencia a la tracción y la resistencia a la fluencia no están influenciados por el nivel de carbono, el tratamiento térmico o la combinación de ambos, solo por el contenido de estaño principalmente.

También la referencia (14) señala que cada 0.1%Sn incrementa 13MPa la resistencia a la tracción y la referencia (18), que cada 0.1% de residual (Sn, Cu, Ni, Cr y Mo) incrementa 6.895MPa la resistencia a la tracción, teniendo un mayor efecto con el Sn; el valor aquí reportado tiene mucha validez para los aceros actuales, porque no se aleja de los valores reportados en la literatura (investigaciones realizadas a finales de los 70's) y porque pertenece a aceros actuales que no tienen las composiciones que se manejaban anteriormente. Este comportamiento proporcional entre la resistencia a la tracción y el %Sn se observa en los valores que van de 0.00 hasta 0.31%Sn, pero en valores entre 0.51 y 0.58%Sn, la resistencia a la tracción disminuye, aquí no se consideró una relación entre el decremento de la resistencia a la tracción y la cantidad de estaño debido a que la línea recta de tendencia de datos está muy vertical; esta disminución de la resistencia a la tracción no está reportado en la literatura. Para encontrar el punto de la resistencia máxima a la tracción, se trazaron dos líneas rectas de tendencia de datos, una ascendente ($m > 0$) y otra descendente ($m < 0$), el valor se determinó en el punto donde ambas rectas se cruzaron. El valor máximo aproximado es 0.477%Sn correspondiéndole una resistencia a la tracción de 491.3 MPa, esta resistencia es comparable a los aceros de mediano carbón.

La resistencia a la tracción de las muestras de acero obtenidas a partir de hojalata están dentro de los rangos de los aceros de bajo carbón.

En los datos de fluencia y la gráfica 3, se puede observar que la resistencia a la fluencia se incrementa conforme el contenido de Sn se incrementa, esto en comparación con las probetas que tienen 0.00%Sn; la resistencia a la fluencia se incrementa aproximadamente 12.707MPa por cada 0.1%Sn. Trazando una línea recta de tendencia de datos, tenemos un coeficiente de correlación de 0.9189. Los valores de fluencia de las muestras de acero obtenidas a partir de hojalata, son inferiores (al igual que la resistencia a la tracción), en comparación con los datos mostrados anteriormente del acero con estaño.

En todos los casos anteriores los coeficientes de correlación son superiores a 0.91, esto quiere decir que tienen una fuerte asociación lineal.

En la gráfica 4, podemos observar como la elongación vs %Sn tiene una tendencia exponencial,

de la gráfica 4 se tiene que con 0.15%Sn, la elongación decrece aproximadamente la mitad (19.95% de elongación) en comparación con las muestras sin estaño que tienen una elongación promedio de 39.3%. A partir de la ecuación $\%elongación = 38.583e^{-4.3891(\%Sn)}$ se deduce que una adición de 1.0%Sn fragilizaría completamente al material, ya que se obtendría una elongación de 0.478%. Por otra parte, la elongación del acero obtenido a partir de hojalata (aproximadamente del 39%), no se vio muy afectada con los contenidos de estaño (aprox. 0.30%); la elongación que posee el acero obtenido a partir de hojalata es superior al de los aceros bajo carbón laminados en frío y a los valores de elongación que poseen los aceros 1025, 1030 y 1035 de colada (Ver apéndices B y C); el acero obtenido a partir de hojalata tiene una elongación similar a las muestras BL₁ y BL₂.

La gráfica 5 correspondiente al %reducción de área vs %Sn, también tiene una tendencia exponencial; tomando los valores de esta gráfica, se tiene que, con 0.1%Sn la reducción de área decrece aproximadamente la mitad (28.91%), en comparación con los valores de las muestras sin estaño que tienen una reducción de área aproximadamente de 57%; la deformación en el trabajo mecánico de los metales frecuentemente está expresada por la reducción de área y en este caso un acero con 1%Sn tiene una reducción de área de 0.053%, lo que significa que con 1.0%Sn el acero es completamente frágil. La reducción de área de las muestras de acero obtenidas a partir de hojalata es aproximadamente del 38%, este valor es mayor al que poseen los aceros de colada 1025, 1030 y 1035 (Ver apéndices B y C), pero menor en comparación con los diferentes aceros bajo carbón laminados en caliente y en frío, que tienen valores entre el 35 y 55%.

En las gráficas 4 y 5, el coeficiente de determinación r^2 es superior a 0.99, lo que quiere decir que los valores que se obtienen a partir de sus ecuaciones son confiables.

En las figuras 1, 3, 5, 7, 9 y 11, se muestran las microestructuras de colada, pero las muestras con un contenido cercano al 1%Sn además de presentar una microestructura de colada presentan

también una estructura Widmannstätten, que posiblemente se originó por un enfriamiento demasiado rápido e irregular desde temperaturas excesivamente altas, originando ferrita proeutectoide (estructura Widmannstätten que se observa en forma de placas y lanzas) que en este caso reprime la formación ordenada de la perlita; como en los aceros bajo carbón, en la microestructura hay más ferrita (α) que perlita. Las figuras 2, 4, 6, 8, 10 y 12 corresponden a las muestras recocidas, presentando una microestructura más al equilibrio, pero además siguiendo un patrón de segregación. En la figura 12 que corresponde a la muestra C₂ recocida, se observa una desintegración de la perlita que podría ser ocasionado por el alto contenido de estaño.

La figura 13 muestra una microestructura de normalizado de una muestra B, en la que se ve un tamaño de grano más pequeño y también que el patrón de segregación desapareció; únicamente se muestra una sola figura debido a que todas las muestras presentan las mismas características.

Las figuras 14 y 15 corresponden al acero obtenido a partir de hojalata; como las microestructuras P₁, P₂ y X son similares, las figuras se señalan como muestra P. Todas las microestructuras están a cien aumentos.

Los análisis con microsonda nos permitieron ver la distribución del estaño en las muestras de colada y recocido; los resultados de la microsonda, muestran que el Sn se distribuyó uniformemente en todas las piezas obtenidas, es decir, no se encontraron concentraciones de estaño en lugares preferenciales; además del estaño, también se mapeó a todas las muestras de colada y recocido al Mn, Si, S, P, Al y los residuales Cu, Ni, Cr y Mo, encontrando una distribución uniforme.

En las muestras C (principalmente las de recocido), se observa una descomposición de la perlita, en el mapeo del estaño y los demás elementos en estas muestras, no se encontró ningún elemento concentrado en los bordes de grano ni en otros rasgos de la estructura.

También a todas las muestras tanto de colada como de recocido se les realizaron análisis puntuales con la microsonda, encontrando valores un poco alejados de las cantidades que se reportaron en los análisis químicos, esta variación puede explicarse por las microsegregaciones.

VI. CONCLUSIONES

- La dureza de las muestras de colada, recocido y normalizado, se incrementa conforme aumenta el contenido de estaño; este incremento es aproximadamente de 3 puntos de dureza HRB por cada 0.1%Sn.
- La resistencia a la tracción se incrementa aproximadamente 14.7MPa por cada 0.1%Sn y disminuye después de 0.48%Sn; la resistencia máxima a la tracción es de 491.3 MPa (0.477%Sn). La resistencia a la fluencia se incrementa aproximadamente 12.707MPa por cada 0.1%Sn. La elongación se reduce con una tendencia exponencial, decrece aproximadamente la mitad (19.95%) con 0.15%Sn, en comparación con las muestra sin estaño que tienen una elongación promedio de 39.3%. La reducción de área también tiene un decremento en la tendencia exponencial; con 0.1%Sn, la reducción de área decrece aproximadamente la mitad (28.91%), en comparación con las muestras sin estaño que tienen una reducción de área aproximadamente de 57%.
- El acero con 1%Sn es completamente frágil.
- La microestructura no mostró efectos comprobables debido al estaño.
- Los análisis con microsonda no aportaron ninguna información sobre la segregación del estaño.
- Los altos contenidos de estaño y cobre pueden provocar un agrietamiento en el acero si se trabaja a temperaturas cercanas a los 1065°C (18).

- El acero obtenido a partir de hojalata puede utilizarse normalmente como un acero bajo carbón, pero debido a los altos contenidos de estaño, podría presentar un agrietamiento si se trabaja en caliente (13).

VII. APÉNDICES

APÉNDICE A

COMPOSICIONES QUÍMICAS DE LOS ACEROS MENCIONADOS EN LOS ANTECEDENTES

	ASTM A36	API X60Cb	ASTM A514J
C	0.22-0.20	0.20-0.25	0.15-0.19
Mn	0.89-1.05	1.14-1.25	0.56-0.64
P	0.009-0.030	0.005-0.007	0.021-0.032
S	0.012-0.026	0.013-0.016	0.014-0.025
Si	0.19-0.25	0.03-0.04	0.024-0.32
Sn	0.003-0.23	0.003-0.24	0.002-0.21
Otros		0.012-0.019 Nb	0.55-0.66Mo, 0.05-0.09Al, 0.02Ti, 0.004B.

Las composiciones de estos aceros están dadas en la referencia 11

COMPOSICIÓN DE LA HOJALATA QUE SE UTILIZÓ PARA LAS PACAS

Elemento	Porcentaje (%)
C	0.150
Mn	0.413
Si	0.113
P	0.016
S	0.019
Sn	0.4-0.501

APÉNDICE B

PROPIEDADES MECÁNICAS DE ACEROS DE COLADA

Grado	R. Tensil min. MPa (ksi)	R.Fluencia min. Mpa (ksi)	Elong. min. %	Red.Area min. %
1025	415 (60)	205 (30)	22	30
1030	450 (65)	240 (35)	24	35
1035	485 (70)	250 (36)	22	30

%C ; %Mn	R. Tensil min. MPa (ksi)	R.Fluencia min. Mpa (ksi)	Elong. min. %	Red.Area min. %
0.40-0.50,0.50- 0.90	586 (85)	310 (45)	16	24

Los datos aquí presentados fueron tomados de la Referencia 31.

APÉNDICE C

ESTIMADOS DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE BARRA DE ACERO AL CARBÓN

	Tipo de proc.	R. Tensión (MPa)	R. Fluencia (MPa)	%Elong. (2")	%Red. Area	HRB
1006	Hot rolled	295	165	30	55	
	Cold rolled	330	285	20	45	
1008	Hot rolled	305	170	30	55	
	Cold rolled	340	285	20	45	
1010	Hot rolled	325	180	28	50	
	Cold rolled	365	305	20	40	
1012	Hot rolled	330	185	28	50	
	Cold rolled	370	310	19	40	
1015	Hot rolled	345	190	28	50	
	Cold rolled	385	325	18	40	66
1016	Hot rolled	380	205	25	50	66
	Cold rolled	420	350	18	40	70
1017	Hot rolled	365	200	26	50	
	Cold rolled	405	340	18	40	68
1018	Hot rolled	400	220	25	50	68
	Cold rolled	440	370	15	40	72
1019	Hot rolled	405	225	25	50	68
	Cold rolled	455	380	15	40	74
1020	Hot rolled	380	205	25	50	66
	Cold rolled	420	350	15	40	70
1021	Hot rolled	420	230	24	48	68
	Cold rolled	470	395	15	40	74
1022	Hot rolled	425	235	23	47	70
	Cold rolled	475	400	15	40	76
1023	Hot rolled	385	215	25	50	66
	Cold rolled	425	360	15	40	70
1025	Hot rolled	400	220	25	50	68
	Cold rolled	440	370	15	40	72
1026	Hot rolled	440	240	24	49	72
	Cold rolled	490	415	15	40	78
1030	Hot rolled	470	260	20	42	76
	Cold rolled	525	440	12	35	80
1035	Hot rolled	495	270	18	40	78
	Cold rolled	550	460	12	35	85

APÉNDICE D

CLASIFICACIÓN DE ACEROS AL CARBÓN

Acero	%C	%Mn	%Si	%S	%P	R.T.(MPa)
Bajo Carbono	0.05-0.26	0.5-1.00	0.25-0.80	0.060máx	0.050máx	300-440
Mediano Carbón	0.29-0.53	0.5-1.00	0.25-0.80	0.060máx	0.050máx	470-620
Alto carbono	0.55-0.95	0.5-1.00	0.25-0.80	0.060máx	0.050máx	650-830

APLICACIONES DE LOS ACEROS AL CARBÓN SEGÚN SU CLASIFICACIÓN

Aceros Bajo Carbono	Poseen alta formabilidad relacionada directamente con la dureza; de los aceros al carbón, es el más dúctil, ideales para operaciones que involucran algún grado de formado en frío, estampado, dobles, embutidos. Son relativamente baratos y son una gran elección cuando no es necesaria una gran resistencia mecánica.
Aceros Mediano Carbono	Son utilizados en donde es requerida una alta resistencia mecánica, pueden ser tratados térmicamente, son ampliamente usados para componentes a maquinar.
Aceros Alto Carbono	Por su superior dureza en la superficie, proveen una mejor resistencia al desgaste que los demás aceros al carbón; pueden ser tratados térmicamente y responder al máximo al tratamiento térmico; tienen gran vida. Poseen la ductilidad más baja de los aceros al carbón; la formabilidad en frío puede ser mejorada con un tratamiento térmico, no obstante, este tratamiento reduce la resistencia mecánica y la dureza.

Referencia 32. pp. 1 y 2

APÉNDICE E

TABLA DE CONVERSIÓN DE DUREZAS

Número Brinell	Número Vickers	Rockwell C	Rockwell B
370	392	40	
350	370	38	110
341	350	36	109
321	327	34	108
302	305	32	107
285	287	30	105
277	279	28	104
262	263	26	103
248	248	24	102
228	240	20	98
210	222	17	96
202	213	14	94
192	202	12	92
183	192	9	90
174	182	7	88
166	175	4	86
159	167	2	84
153	162		82
148	156		80
140	148		78
135	142		76
131	137		74
126	132		72
121	121		70
112	114		66

Referencia 33

VIII. BIBLIOGRAFIA

1. Fusión: **Publicación del Grupo Acerero del Norte. # 7, Mayo-Junio, 1994.**
2. **Empaque Performance. Año 5, # 53, México 1996.**
3. **Gregory L. Crawford "Methods and Benefits of Steel Can Recycling" -Chapter 4. Steel Can Recycling Institute. Pittsburgh, USA. pp.53- 65.**
4. **Metals Handbook Vol.2. "Properties and Selection: Non Ferrous Alloys and Special Purpose Materials". ASM International -The Materials Information Society. USA October 1990; Tenth Edition. pp.1218-1220.**
5. **Patrick A. Neenan: "Challenges and Opportunities in Steel Can Recycling". AMG Resources, Ltd., Harborne, Birmingham, England. pp.167-172.**
6. **Elizabeth Olenbush: "The Growing Supply and Demand for Recycled Steel Cans". JOM, October 1990; Vol.42, No.10. pp.30-31.**
7. **William C. Leslie "The Physical Metallurgy of Steels". McGraw-Hill. Tokio Japan, 1982. pp.142-147.**
8. **United States Steel Corporation: "The Making, Shaping and Treating of Steel". Edited by Harold E. McGannon. Pittsburg, Pensilvania, 1971. pp.996-1021.**
9. **D.T. Llewellyn "Steels: Metallurgy and Applications". Ed. Butterworth-Heinemann. London, Great Britain, 1992. pp.44-49.**
10. **M. P. Seah and E. D. Hondros: Proc.Roy.Soc. (Lond.), 1973, Vol. A335, pp.191-212.**
11. **E.T.Stephenson: "The Effect of Tin on the Toughness of Some Common Steels". Metallurgical Transactions A, March 1980; Vol.11A. pp.517-524.**
12. **E. J. Duckett: Resource Recovery and Conservation, 1976/1977, Vol. 2, pp. 301-328.**
13. **P.J. Koros "Tin as a Residual Alloy in Steel". LTV Steel Company, prepared for circulation by The AISI Committee on Technology. January 1990.**
14. **E.T.Stephenson: "Tin and Properties of Steel". Journal of Metals, March 1974; pp.48-51.**
15. **N. Sarafianos: "Influence of the Combined Effect of Grain Size and Tin Grain Boundary Segregation on the Ductility of Carbon Steel During Hot-Rolling". Journal of Materials Science Letters 12 (1993). pp.1522-1525.**

16. G. A. Seibert, D. V. Doane and D. H. Breen: The Hardenability of Steel, ASM, Metals Park , OH, 1977, 218 pp.

17. D. T. Llewellyn, J. B. Marriott, D. J. Naylor and G. Thewlis: Phil. Trans. R. Soc. Lond., 1980, ser. A, Vol. 295, pp. 69-85.

18. E. T. Stephenson: "Effect of Recycling on Residuals, Processing, and Properties of Carbon and Low-Alloy Steels". Metallurgical Transactions A, March 1983; Vol.14A. pp.343-353.

19. M.M. Wolf: "Effects of Tramp Elements in Continuous Casting". Ironmaking and Steelmaking, Vol.12, No.6, 1985. pp.299-301.

20. Donald S. Clark and Wilbur R. Varney "Physical Metallurgy for Engineers". D. Van Nostrand Company, Second Edition., New York, 1962.

21. Rick Bodensteimer, James M. Fenton and John Dresty: "Selective Dissolution of Tin for Recycling Tin Cans". Proceedings of the Symposium on High Rate Metal Dissolution Processes; Electrochemical Society Proceedings, Vol. 95-19, pp. 324-332.

22. Steel Recycling Institute: A Few Facts About Steel-America's Most Recycled Material. May 1994.

23. Kurt Smalberg: "The Steel Can Recycling Institute". JOM, October 1990. p.8.

24. A.C.Myers B.A., D.M.S: "Steel Can Recycling". British Steel Timplate, Velindre, Swansea, West Glamorgan, Wales. p.163-165.

25. Extraction and Processing: Steel Packaging Recycling Receives Attention -News & Update. JOM, October 1990. p.5.

26. F. B. Pickering "Physical Metallurgy and the Design of Steels". Applied Science Publisher's LTD. London, 1978.

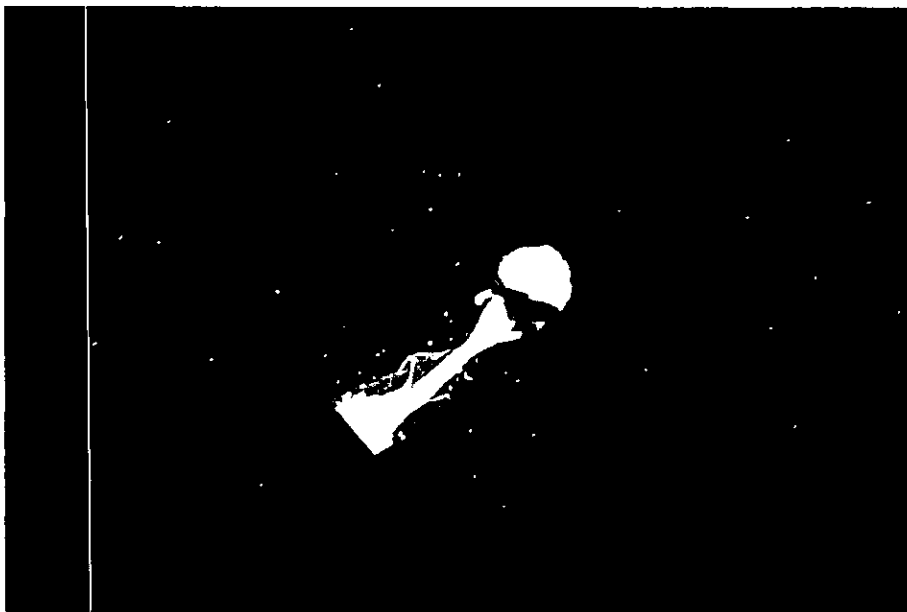
27. Howard E. Boyer "Atlas of Stress-Strain Curves". ASM-International, Metals Park; Ohio, US (1987).

28. A. Cavić, Lj. Nedeljković, and Dj. Simović: "Methodology of Quantitative Estimate of Irons and Steel Scrap Arisings". Iron and Steelmaking, 1991, Vol. 18, No.1. pp.59-67.

29. American Society for Testing Materials: ASTM-STANDARDS (1955-1956) A395-56T. pp.1464-1465.

29-1. Recomendación verbal del Ing. Horacio Escamilla Castro.

30. **Steel Castings Handbook**: Steel Founders' Society of America; Cleveland, Ohio, 1970.
31. **Metals Handbook Desk Edition**. ASM International. USA 1985, Edition. p.4-47.
32. Philip D. Harvey "Engineering Properties of Steel"; American Society for Metal Metals Park, Ohio 44073; USA, 1982.
33. E. Paul DeGarmo, P.E "Materials and Processes in Manufacturing" MacMillan Publishers; New York, 1979, p.45.



Vaciado de acero en molde de arena para obtener probetas