



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**Influencia del Cobre en el comportamiento a Altas
Temperaturas y como Estabilizador de Perlita
en Hierros Grises y Hierros Nodulares**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO METALURGISTA

PRESENTAN

GUILLERMO F. SALAS BANUET

Y

HECTOR A. CARDENAS LARA

MEXICO, D. F., 1977



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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 esta 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.

Tesis 1977
CLAS _____
ABO ~~M-26~~ 77
FECHA _____
PROC _____
S _____



JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. en C. Fernando Maldonado Mendoza
Vocal: M. en C. Alejandro Espriú Manrique
Secretario: M. en C. Ma. Eugenia Noguez Amaya
1er. Suplente: Ing. Francisco Herrera Castañeda
2o. Suplente: Ing. Humberto Malagón Romero

Sitio donde se desarrolló el tema:

C E N E T I

Laboratorio de Metalurgia Facultad de Química

ASESOR DEL TEMA: M. en C. Ma. Eugenia Noguez Amaya. *Ma Eugenia Noguez Amaya*

SUSTENTANTES: Guillermo F. Salas Banuet.
y
Héctor Cárdenas Lara .

Guillermo Salas Banuet
Héctor Cárdenas Lara

I N D I C E

- I.- RESUMEN
- II.- INTRODUCCION
- III.- FABRICACION DE LOS MATERIALES
- IV.- DESARROLLO EXPERIMENTAL
- V.- CONCLUSIONES
- VI.- FIGURAS
- VII.- TABLAS
- VIII.- FOTOGRAFIAS DE LAS MICROESTRUCTURAS
- IX.- REFERENCIAS

I.- RESUMEN

En la presente tesis se investigó la resistencia a la fatiga térmica de fundiciones nodulares, grises y una vermicular de matriz perlítica estabilizada con cobre, con el objeto de evaluar la conveniencia de utilizarlas para la fabricación de lingoteras, ya que la incidencia de la vida de las mismas en el costo de fabricación de acero es apreciable.

La cantidad de cobre aleado en cada caso fue:

en la fundición nodular 2.0 y 2.5%

en la fundición gris 1.5, 2.0 y 2.5%

en la fundición vermicular 1.5%

Se les comparó entre sí y con una aleación de fundición gris con 0.6% de cromo (según norma ASTM 319A clase II tipo B), usualmente recomendada para trabajar a altas temperaturas y sometida a choque térmico.

Se realizaron los siguientes ensayos :

- i) Choque térmico repetitivo.- Tuvo por objeto determinar la resistencia a la fatiga térmica de los materiales.
- ii) Resistencia a la tracción desde temperatura ambiente, hasta 850°C.- fue para caracterizar las propiedades mecánicas en caliente.

iii) Tratamientos térmicos de ferritización y de simulación del servicio de las lingoteras.- Se hicieron para medir cuantitativamente el poder estabilizante del cobre sobre la estructura perlítica.

Se concluye que la fundición nodular con 2.5% de cobre presenta propiedades marcadamente superiores en todos los ensayos.

II. - INTRODUCCION .

1. Consideraciones económicas .

La incidencia de la vida media de las lingoteras en el costo de producción del acero es de considerable importancia. Una idea de las cifras involucradas puede obtenerse de lo siguiente:

La vida media de las lingoteras en México es de 40 a 50 coladas mientras que en los países desarrollados es de 80 a 100. Dado que para producir una tonelada de acero se requieren 1.1 toneladas de lingotera - por colada, se tiene que se requieren en México $1100/40 = 30$ Kg. de fundición por cada tonelada de acero. Teniendo en cuenta que México produce 5.5 millones de toneladas de acero por año, se obtiene que se necesitan 165000 toneladas de fundición para fabricar lingoteras, lo que representa aproximadamente un 30% del total de las fundiciones de hierros grises, nodulares y maleables (525 000 toneladas por año) que produce México, mientras que en los Estados Unidos de Norteamérica se destina un 20% de la producción total de fundiciones para fabricar lingoteras.

Para fijar ideas, si la vida de las lingoteras se aumentara en un 50% manteniendo constante el costo de producción de las mismas, se necesitarían solo $1100/60 = 18$ Kg. de fundición por tonelada de acero, o sea un total de 100 000 toneladas, ahorrándose 65 000 toneladas.

Tomando como cifra representativa de la productividad en México 50 toneladas/hombre-año se ahorrarán $65\ 000/50 = 1300$ hombres -

año, que a un salario mensual de \$3,000.00/hombre (agosto de 1976) re presenta un ahorro de 50 millones de pesos mexicanos (agosto de 1976) por año, además de que quedaría libre para otros fines un 12% de la pro ducción anual de fundiciones de México.

Puede objetarse que el fabricar lingoteras en hierro nodular - con 2.5% de cobre, que es lo que esencialmente proponemos, puede en- carecer demasiado los costos de producción de las mismas. La objeción es pertinente y no obstante, debe tenerse en cuenta que hay evidencias en la literatura (Ref. 1) de que puede obtenerse una vida media de hasta 136 coladas con lingoteras de hierro nodular de 1.5% de cobre y del presente trabajo puede razonablemente suponerse que se obtendrían resultados ra- zonablemente mejores con 2.% de cobre.

Un análisis de costos no puede ser llevado a cabo en general ya - que este dependerá, entre otras cosas, de si la acería posee o no una fun- dición propia. Además, la vida de las lingoteras depende mucho del trato que se les de en la planta. Los costos deberán ser estimados según las - condiciones de cada planta. No obstante, los autores de la Ref. 1 una re- ducción neta de costos en su planta del 25% usando lingoteras de fundición nodular perlítica con 1.5% de cobre.

2. Efecto general del cobre en las fundiciones.

A.L. de Sy (Ref. 2 y 3) ha estudiado extensamente el efecto del - cobre en las fundiciones. En la figura 1 se da el diagrama de equilibrio -

Fe-Cu. La solubilidad del cobre en el Fe es limitada, a 835°C es aproximadamente 3% . En el sistema ternario Fe-C-Cu se tiene también una solubilidad del orden del 3% a la temperatura del eutectoide ternario que es algo menor que los 723°C del eutectoide Fe-C . A temperatura ambiente la solubilidad desciende a 0.7% . No obstante, éste es el valor de equilibrio que se obtiene con enfriamientos muy lentos (10°C/hr); con enfriamientos normales en la práctica de fundición, se obtiene una solubilidad "aparente" o "efectiva" de algo más del 3%, comportándose el cobre como si efectivamente estuviera en solución estable. Eventualmente, con tratamientos térmicos adecuados, este exceso puede precipitar en forma de partículas submicroscópicas, del llamado "cobre secundario" con el consiguiente efecto de endurecimiento.

En un breve resumen, los efectos del cobre disuelto en la fase ferrita de hierro puro son, según de Sy:

- a) Un efecto de endurecimiento por disolución muy pronunciado. La ferrita con 3% de cobre alcanza una dureza de 200 Brinell (Ref. 4).
- b) Un efecto de endurecimiento por precipitación. La dureza máxima se consigue con los siguientes tratamientos:
 - i) 5 a 15 minutos a 600°C
 - ii) 1 a 4 horas a 500°C
 - iii) más de 50 horas a 400°C
- c) Proporciona una elevada resistencia a la corrosión.
- d) El cobre es un fuerte formador de perlita, con la ventaja sobre el manganeso de que no tiende a producir carburos libres. Usualmente -

un 1.5% de cobre asegura una matriz 100% perlítica en secciones gruesas sin carburos libres.

e) Aumenta notablemente la templabilidad:

Por ejemplo, en ensayos Jominy de fundiciones con 2% de cobre, llevados a cabo con templado al aire a 2 atm. de presión, en barras de 0.01 m de diámetro, se obtienen durezas de 25Rc a 2.5 pulgadas (31 mm) del extremo frío (Ref. 5). El efecto mejora apreciablemente (en unas 10 unidades de dureza Rc) con adiciones de cromo de aproximadamente 1/4 del contenido de cobre.

En base a lo anterior se puede comprender el efecto beneficioso del cobre en las propiedades mecánicas de las fundiciones grises y nodulares, hasta un contenido del 3%. El efecto no es lineal con el contenido de cobre; el máximo de resistencia a la tracción y dureza se alcanza entre 2.5 y 3.0% de cobre, adiciones mayores tienden a empobrecer dichas propiedades.

El efecto se mantiene con contenidos de Si de 2% o más y en fundiciones de gran sección (Ref. 2 y 6).

Además el cobre no interfiere en la nodularización, de hecho la primer producción en gran escala de fundición nodular, los famosos cigueñales de Ford, se fabrican con una aleación nodulizante de Cu-Mg (Ref. 3).

3. Efecto del cobre en la resistencia a la fatiga térmica en las fundiciones.

a) Antecedentes.

En la revisión bibliográfica llevada a cabo, la cuestión de la conveniencia de utilizar fundición nodular para fabricar lingoteras no está aclarada (Ref. 1,7,8,9, y 10). Por ejemplo en la referencia 7, se concluye que en general la fundición nodular no presenta propiedades esencialmente superiores en este aspecto, mientras que en la referencia 8 se opina lo contrario, por lo menos para lingoteras pequeñas de hasta 5 toneladas. Sin embargo Lambert et . al. (Ref. 1) realizaron un trabajo sistemático y concienzudo que incluye tanto experimentación a nivel de laboratorio como lingoteras en servicio. Estos autores establecen en forma categórica la conveniencia de utilizar lingoteras de fundición nodular perlítica con 1.5% de cobre. Obtienen vidas medias de hasta 136 coladas por lingotera, lo que representa una mejora del 60% sobre lo que se obtenía previamente en la misma planta con lingoteras tradicionales de fundición gris, con una reducción de costos neta de 25%, en las condiciones de operación de la planta en que llevaron a cabo su estudio.

b) Algunos fundamentos.

Definiremos fatiga térmica, referida a las condiciones de servicio normales de lingoteras, como "la propiedad que tienen los hierros fundidos a deteriorarse progresivamente y de perder propiedades por la acción de cambios bruscos repetitivos de temperatura (y fenómenos concomitantes como oxidación, grafitización, tensiones por cambios de fase, etc.) y la aplicación de cargas externas estáticas o dinámicas".

Intentamos en el presente trabajo establecer una medida cuantitativa de la resistencia a la fatiga térmica de los materiales estudiados.

Es posible distinguir de entre los muchos factores que influyen en la fatiga térmica (haciendo abstracción de otros específicos de las lingoteras, como por ejemplo el tratamiento a que se las somete) dos de especial importancia en este caso.

i) La conductividad térmica; cuanto mayor sea ésta, mejor será la resistencia al choque térmico. Así podemos clasificar los hierros fundidos (a 100°C) en el siguiente orden (Ref. 1):

<u>Material</u>	<u>Conductividad térmica</u>
Fe gris	55 Joule / m °C
Fe nodular ferrítico	35 Joule / m °C
Fe nodular perlítico	30 Joule / m °C

En los datos anteriores debe considerarse un rango de $\pm 10\%$ según las variaciones usuales de composición.

ii) Resistencia a la tracción a alta temperatura; las lingoteras se encuentran sometidas a cargas tanto estática (peso del lingote), como dinámicas (desmoldeo), generalmente se practica alrededor de 500°C, y es la sollicitación más fuerte a que se somete la lingotera).

En este sentido podemos clasificar, según nuestros resultados (tabla 4), los hierros fundidos como sigue:

<u>Material</u>	<u>Rt promedio (a 450° C)</u>
Fe nodular perlítico	450 MPa *
Fe nodular ferrítico	240 MPa
Fe gris perlítico	200 MPa

* 1 MPa = 0.102 Kg/mm² = 145 psi.

Se ve que ambos valores son conflictivos. Su peso relativo dependerá de las condiciones de servicio del material.

Generalmente se recomienda una matriz ferrítica para buena resistencia choque térmico, no obstante, Lambert et. al. establecen claramente la superioridad de la estructura perlítica para el caso de hierro nodular usado para lingoteras.

Esto puede interpretarse considerando que la diferencia en las conductividades térmicas no es muy grande, mientras que la Rt de Fe nodular perlítico a 450° C es más del doble de la del ferrítico.

Parece ser que el principal papel del cobre es el de estabilizar la estructura perlítica, no obstante, en el trabajo de los autores de la Ref. 1, se comprueba que otros elementos estabilizantes de la perlita, como el estaño, confieren muy malas propiedades de resistencia a choque térmico. En el caso del cobre el fuerte efecto de endurecimiento de la ferrita puede inhibir la nucleación y propagación de fisuras; también puede eventualmente presentarse en este aspecto una contribución por endurecimiento por precipitación.

4.- Esquema del trabajo.

Lambert et. al. se han limitado a estudiar contenidos de cobre hasta 1.5%. De lo anterior es razonable suponer que contenidos mayores de cobre hasta un máximo de 3% pueden mejorar aún más las propiedades. En consecuencia, en el presente trabajo hemos investigado la resistencia a fatiga térmica de una serie de fundiciones, a saber:

- a) Fundiciones nodulares con contenidos nominales de 2.0 y 2.5% de cobre.
- b) Fundición vermicular con contenido nominal de 1.5% de cobre, en razón de que por su bajo costo y propiedades intermedias las fundiciones vermiculares están logrando ultimamente una posición en el mercado en los Estados Unidos de Norteamérica.
- c) Fundiciones grises con contenidos nominales de 1.5, 2.0 y 2.5% de cobre, debido a la fuerte resistencia a innovaciones tecnológicas que se observa en América Latina y en virtud del uso tradicional de fundiciones grises para fabricación de lingoteras.
- d) Fundición gris norma ASTM 319A Clase II Tipo B (Ref. 11) aleada con 0.65% de cromo y usualmente recomendada para uso a altas temperaturas y sometida a choque térmico, esto como referencia de comparación.
- e) Dos fundiciones "testigo", una gris y una nodular, sin cobre ni cromo, con el objeto de utilizarlas como referencia en todas las pruebas realizadas.

Pasamos a continuación a describir la fabricación de los materiales y el desarrollo experimental realizado con los mismos. Los ensayos que se realizaron fueron los siguientes:

- i) Choque térmico repetitivo.
- ii) Resistencia a la tracción desde temperatura ambiente hasta 850° C
- iii) Tratamientos térmicos de ferritización y de simulación de servicio de las lingoteras.

Finalmente se discuten los resultados obtenidos y se extraen algunas conclusiones.

III.- FABRICACION DE LOS MATERIALES.

Se utilizó un horno de inducción de 160Kg. de capacidad, cargado con aproximadamente 50% de arrabio Sarel y 50% de chatarra de acero al carbono. De estos 160 Kg. se realizaron 9 coladas parciales, 5 de fundición gris, 3 de fundición nodular y 1 de fundición vermicular. Estas coladas parciales fueron de 20 Kg. para las nodulares y la vermicular y de 10 Kg. para las grises. Los ajustes de composición y/o agregado de nodulizante - (proceso sandwich usando nodulloy 9 C *) se llevaron a cabo en las cucharas.

En todos los casos se inoculó en el chorro con ferrosilicio de 75% en una proporción de 0.5%. La granulometría, eficiencia y demás condiciones de los materiales de adición, así como también las temperaturas de trabajo, se controlaron cuidadosamente según las recomendaciones usuales (Ref. 12 y 13).

La marcha del proceso de fusión se controló mediante mediciones in situ de carbono equivalente, que coincidieron con lo esperado.

Las temperaturas se midieron con pirómetro óptico; la temperatura de colada fue de 1550°C, la de colada en los moldes fue de 1440°C para las fundiciones grises y de 1360°C para las fundiciones nodulares.

Las composiciones químicas estimadas se dan en la tabla 1. No se practicó el análisis químico por falta de facilidades, no obstante las -

* composición estimada: Mg 8.5 - 10% ; Si 44-48%; Ce 0.5 - 0.75%; Ca 1.0 - 1.5% ; Al 1% máximo.

determinaciones de carbón equivalente permiten asegurar que los valores de carbono y silicio son correctos.

Como se utilizó una proporción, elevada de arrabio Sarel de bajo contenido de fósforo y azufre, es también, probable que los valores estimados de estos elementos sean también muy aproximados a los reales. Respecto del cobre en general se estima que la eficiencia de las adiciones en cucharas es de casi el 100% (Ref. 12) si se controlan las temperaturas y granulometrías cuidadosamente, como en nuestro caso. Respecto al Mn, dada la composición de la carga del horno solo se practicaron ajustes pequeños; por lo que los valores estimados pueden también aceptarse como correctos.

Finalmente respecto a la fundición gris ASTM 319A clase II Tipo B, si bien no disponemos de elementos de juicio para evaluar el contenido real de cromo, es de hacer notar que cumple con las especificaciones de la norma, lo que puede tomarse como indicativo de que el contenido estimado de cromo, concuerde esencialmente con el real.

Se colaron barras de 13 x 13 x 140 mm de moldes de tipo Shell y además para el caso de las fundiciones nodulares, se colaron keel-blocks (según norma ASTM A 536-1972) en moldes de arena verde para fabricar las probetas de tracción.

Fotografías de las microestructuras obtenidas en bruto de colada se dan en el apéndice III. Puede apreciarse que las microestructuras

obtenidas son satisfactorias.

Una descripción de los grafitos según clasificación ASTM se da en la tabla 2. Además se observa bien la estabilización de la perlita por el cobre, el contenido de la misma es del orden de 100% en las muestras con cobre. En particular, en el caso de las fundiciones nodulares con cobre, no se observan los característicos "ojos de buey" sino que la perlita aparece rodeando los nodulos (ver tabla 7 y apendice III).

IV.- DESARROLLO EXPERIMENTAL .

El presente capítulo es la parte medular del trabajo debido a que este es netamente experimental y de los resultados obtenidos se demuestra la validez de utilizar cobre para la fabricación de lingoteras.

Los ensayos que se hicieron fueron los siguientes:

1.- Choque térmico repetitivo.

Este ensayo tuvo por objeto determinar la resistencia a la fatiga térmica de los materiales.

Debido a que no existe una norma universal para medir esta * propiedad, tuvimos que diseñar un método de ensayo alternativo que nos resultara accesible. Lambert et. al. utilizan un procedimiento desarrollado en el CTIF de Francia, que consiste en calentar por inducción anillos de 70 mm de diámetro exterior x 32 mm. de diámetro interior 20 mm de espesor. Estos anillos llevan a su vez dos pequeños orificios circulares diametralmente opuestos que actúan como concentradores de tensiones. Estos anillos se sometieron a ciclos repetitivos de calentamiento en 10 segundos hasta 850° C seguidos de un enfriamiento hasta 300° C en 3 minutos. La resistencia al choque térmico repetitivo se mide por el número de ciclos que resiste el anillo antes de fisurarse.

Dado que no disponíamos de un horno de inducción para llevar a cabo este ensayo se utilizó la fuente de poder de una máquina para inspección magnética no destructiva tipo Magnaflux.

* Las temperaturas se determinaron con una termocupla colocada a presión mediante un clip en el lugar que se indica en la figura tres.

Se diseñaron probetas especiales con un orificio y una muesca como concentradores de tensiones (Fig. 2). El dispositivo de ensayo se muestra esquemáticamente en la fig. 3. Consta esencialmente de dos mordazas conductoras de cobre accionadas por aire comprimido que sujetan la probeta, durante los ensayos se aplicó una carga de 3 Kg. como se muestra en la fig. 3, con el objeto de introducir tensiones de tracción en los concentradores. Debido a la geometría de la probeta el efecto de concentración de tensiones es muy pronunciado (Ref. 14).

Las probetas (bajo carga) se calentaron por resistencia haciendo pasar una corriente de 700 Amp. hasta 850°C en 30 seg. aproximadamente; después se enfriaron en una corriente de aire frío hasta 250°C en 20 seg. A esto le llamamos un ciclo.

Se determinó el número de estos ciclos soportados por cada probeta hasta presentar fractura en la zona del concentrador de tensiones (la fractura ocurre, en todos los casos, 2 o 3 ciclos después de que aparece la primera fisura visible, de manera que se tiene una determinación precisa del número de ciclos que resiste la probeta). Los resultados se dan en la tabla 3.

Este ensayo es más severo que el utilizado por Lambert et. al. por dos razones, que son:

a) el diseño de nuestras probetas propicia una concentración mayor en tensiones, y

b) nuestro ensayo aproxima mejor las condiciones de operación de las lingoteras, ya que estas se hallan sometidas a fuertes gradientes de

temperatura. Por inspección de la tabla 3 se ve que la fundición nodular con cobre presenta una resistencia al choque térmico repetitivo notablemente superior al resto de los materiales, siendo el efecto superior para la que contiene 2.5% de cobre.

Es de hacer notar que luego de soportar 100 ciclos la probeta permanecía prácticamente inalterada, casi no se observó la presencia de cascarilla y solamente presentaba una ligera deformación.

El efecto del cobre también es beneficioso para las fundiciones grises, aunque en grado considerablemente menor. En ambos casos el efecto beneficioso aumenta marcadamente con el contenido de cobre.

Por su parte, la fundición vermicular se comporta como su equivalente gris. Ambos testigos presentan una baja resistencia. La probeta ASTM 319A, presenta una resistencia comparable a la de la fundición gris con 2.5% de cobre, pero a lo sumo alcanza una resistencia del orden del 30% de la que presenta la fundición nodular con 2.5% de cobre.

2.- Resistencia a la tracción desde temperatura ambiente hasta 850°C

Este ensayo fue para caracterizar las propiedades mecánicas en caliente. Como ya se ha dicho, las probetas de fundición nodular se fabricaron a partir de kell-blocks, mientras que las de fundición gris se obtuvieron a partir de las barras de 13 x 13 x 140 mm. Estas probetas se muestran en la figura 4.

Se determinó la resistencia a la tracción (R_t), punto de fluencia (YP) y alargamiento (A) a temperatura ambiente, 450, 650 y 850°C. Los resultados se dan en la tabla 4 y en las figuras 5, 6 y 7.

La Rt y YP se mantienen considerablemente superiores para las fundiciones nodulares salvo a las temperaturas más altas. El efecto es otra vez marcadamente superior para la fundición nodular con 2.5% de cobre.

A la temperatura de 450-500°C a la que usualmente se lleva a cabo el desmoldeo, las Rt y los YP de las fundiciones nodulares son por lo menos el doble de la mejor de las fundiciones grises.

Los valores obtenidos para estas últimas son algo erráticos y a veces no corresponden con lo esperado. Debe tenerse en cuenta que al tratar de medir propiedades mecánicas de fundiciones con grafito laminar en probetas tan pequeñas se introduce un cierto grado de error. Cabe mencionar aquí que las probetas fueron inspeccionadas por rayos X antes de ser ensayadas para asegurar la ausencia de defectos de colada como porosidades, inclusiones, etc.

Respecto del alargamiento, este es en general superior para las fundiciones nodulares que para las grises, aunque los valores obtenidos son algo erráticos. Esto se debe al hecho de que resulta difícil determinar con precisión el alargamiento en probetas de dimensiones tan reducidas y ductilidades relativamente bajas.

3.- Tratamientos térmicos de ferritización y de simulación de servicio de las lingoteras.

Los tratamientos mencionados se hicieron para medir cuantitativamente el poder estabilizante del cobre sobre la estructura perlítica.

a) Tratamiento Térmico de Ferritización (TTF). se llevó a cabo en la forma usual (Ref. 13), en probetas de 1/2 pulgada de sección, a saber:

i) Las fundiciones nodulares y la vermicular se mantuvieron a 950°C durante 1.5 horas seguido de un enfriamiento en horno a 15°C por hora hasta 600°C .

ii) Las fundiciones grises se mantuvieron a 850°C durante 1.5 horas seguido de un enfriamiento en horno hasta 600°C a 15°C por hora.

b) Tratamiento Térmico de Simulación de servicio de lingoteras (TTS). Las probetas de 1/2 pulgada de sección se mantuvieron a 850°C durante 6 horas, seguido de un enfriamiento hasta 500°C a 300°C por hora (que es la velocidad de enfriamiento al aire de una barra cilíndrica de 250 mm de diámetro), luego al aire.

Se determinó metalográficamente el porcentaje de ferrita formado al cabo de cada tratamiento en cada una de las probetas. Los resultados se dan en las tablas 5, 6 y 7 y las metalografías pueden observarse en el Apendice III.

En bruto de colada se observa claramente la influencia estabilizadora del cobre sobre la perlita.

Frente al TTF (ver tabla 5) las fundiciones nodulares con 2 y 2.5% de cobre retienen prácticamente la estructura perlítica. En cambio la muestra testigo se ferritiza casi totalmente.

La fundición vermicular, por su parte, se ferritiza considerablemente (un 70%), lo que está en desacuerdo con resultados previos (Ref. 1) que reportan una retención de 90% de perlita con contenidos de cobre tan bajos como 0.5%. Las razones de esto pueden ser:

- a) que la temperatura de austenización seleccionada por Lambert et. al. es más baja 900°C ,
- b) nuestra velocidad de enfriamiento fue más lenta en unos cuantos $^{\circ}\text{C}$ por hora, es decir nuestras condiciones de ferritización fueron más severas y
- c) los contenidos de Mn de Lambert et. al. probablemente son más altos que los nuestros, lo que contribuye a la estabilización de la perlita.

De cualquier modo, en general, los resultados son satisfactorios y la respuesta de los materiales cae dentro de lo esperado.

Respecto a las fundiciones grises se observa (tabla 6) una baja estabilidad de la perlita. Esto es atribuible a los mismos puntos anteriores. En suma resulta que el TTF fue un tanto severo lo que enmascara algo los resultados. No obstante, puede observarse, en general, el efecto estabilizante del cobre sobre la perlita.

Respecto del TTS obtenemos mayores porcentajes de ferrita que los reportados en Ref. 1. Eso se debe a que se seleccionó una temperatura de mantenimiento (850°C) superior en 100°C a la usada en la Ref. 1 -

por parecernos un poco baja. Esta diferencia es importante en un proceso de nucleación y crecimiento controlado por difusión como es el caso de la ferritización. Estos resultados implican, a su vez, que la temperatura media de trabajo de las lingoteras puede ser un factor crítico en la vida de las mismas.

V.- CONCLUSIONES.

Podemos caracterizar al cobre como un elemento que en las proporciones y a las temperaturas estudiadas a) endurece fuertemente a la ferrita por disolución y también proporciona un endurecimiento ulterior por precipitación; b) actúa como estabilizador de perlita y c) proporciona una elevada resistencia a la corrosión y a la oxidación.

Las conclusiones que obtuvimos son las siguientes:

- 1.- La fundición nodular aleada con 2.5% de cobre presenta propiedades de resistencia a la fatiga térmica marcadamente superiores al resto de los materiales estudiados, por lo que es de esperar que su uso en la fabricación de lingoteras mejore en gran medida la vida de las mismas.
- 2.- En el aspecto económico, aunque en la presente tesis no se realizó ningún estudio de este tipo, tenemos el antecedente del reporte de Lambert et. al. en el cual reportan una reducción neta del 25% usando fundiciones nodulares con 1.5% de cobre y que esto puede mejorar apreciablemente usando 2.5% de cobre.
- 3.- Debido a que la fabricación de lingoteras en fundición nodular aleada con 2.5% de cobre puede ser una solución difícil de implementar en muchas acerías, queremos llamar la atención sobre el hecho de que la fundición gris con 2.5% de cobre lo mismo que la ASTM 319A Clase II Tipo B presentan una resistencia aceptable frente al ensayo de choque térmico repetitivo (del orden de 4 veces la de la fundición gris sin aleantes), es de esperar que una combinación de ambas, de 2% de cobre y 0.5%

de cromo, prolongue apreciablemente la vida de las mismas.

VI FIGURAS

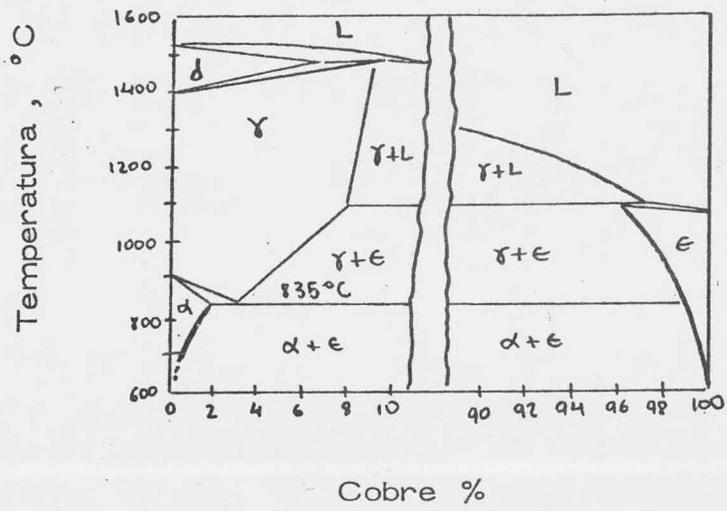


Figura 1: Diagrama de equilibrio Fe-Cu

FIGURA 2: PROBETAS PARA ENSAYOS DE CICLOS TERMICOS
(dimensiones en mm.)

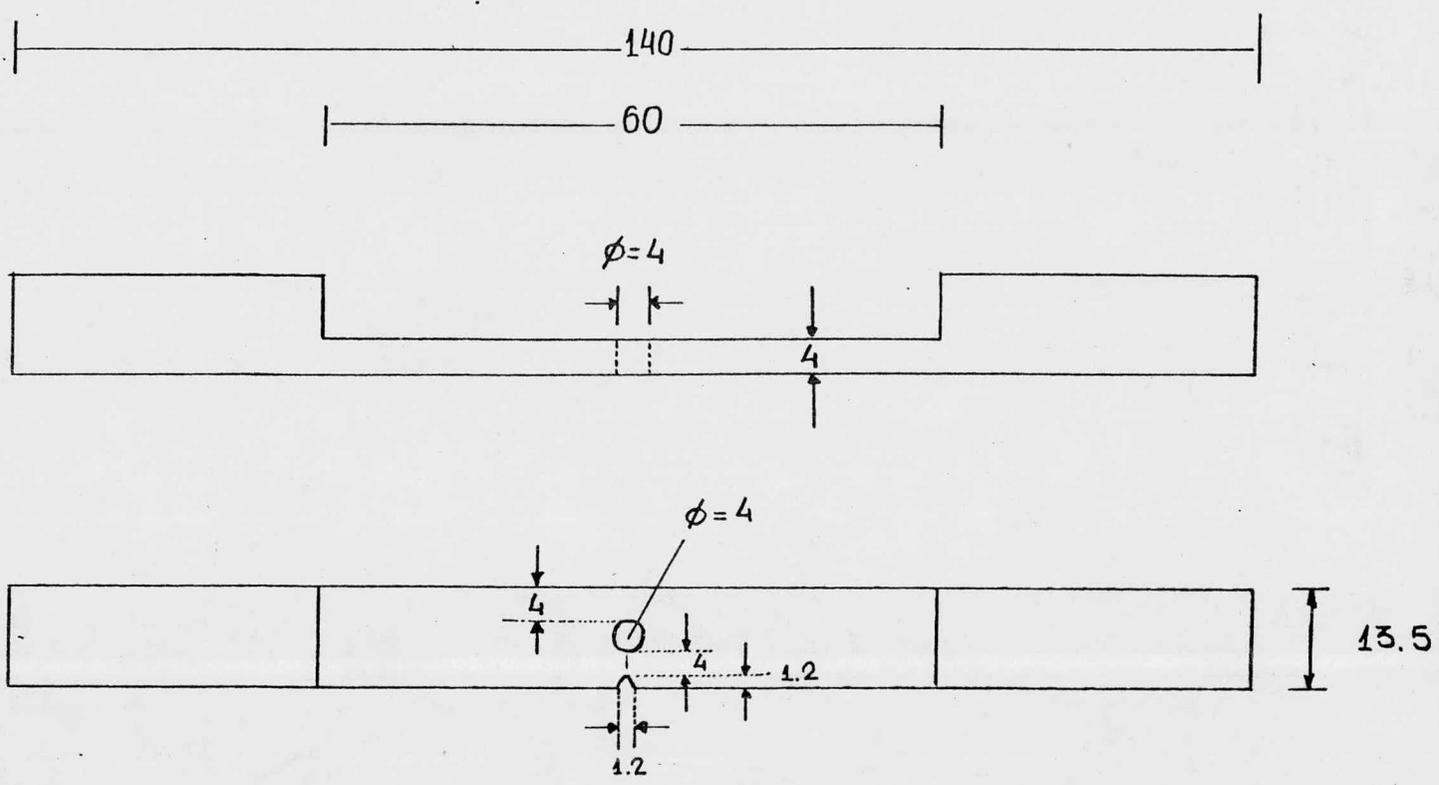


FIGURA 3: ESQUEMA DEL DISPOSITIVO PARA ENSAYO DE RESISTENCIA A CICLOS TERMICOS

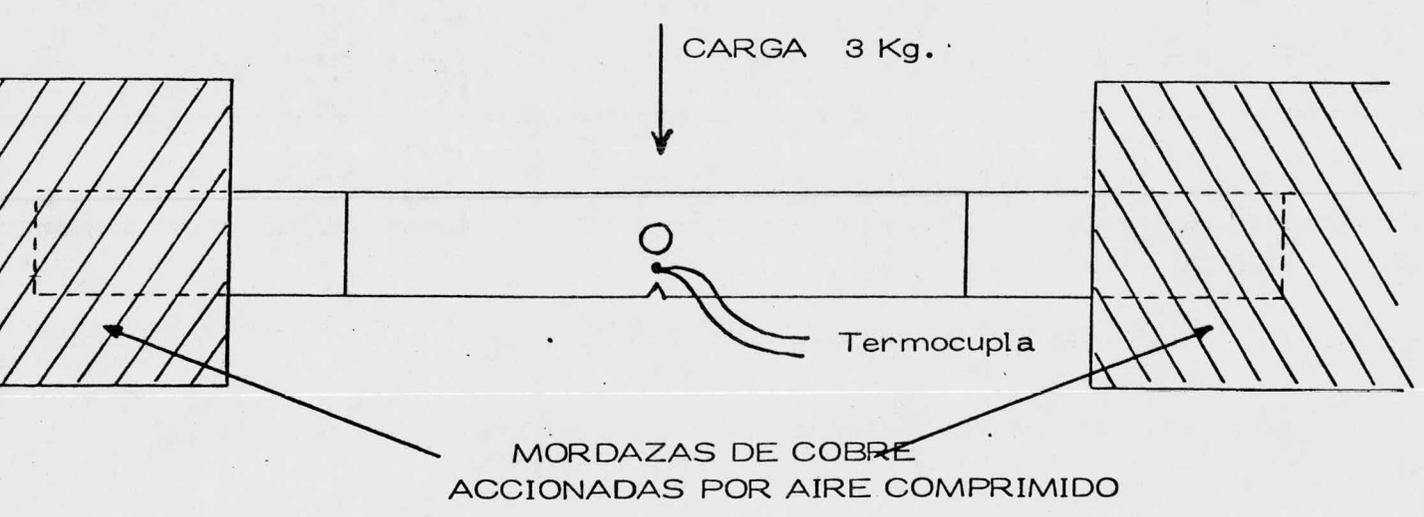


FIGURA 4: PROBETAS PARA ENSAYO DE TRACCION

(dimensiones en mm.)

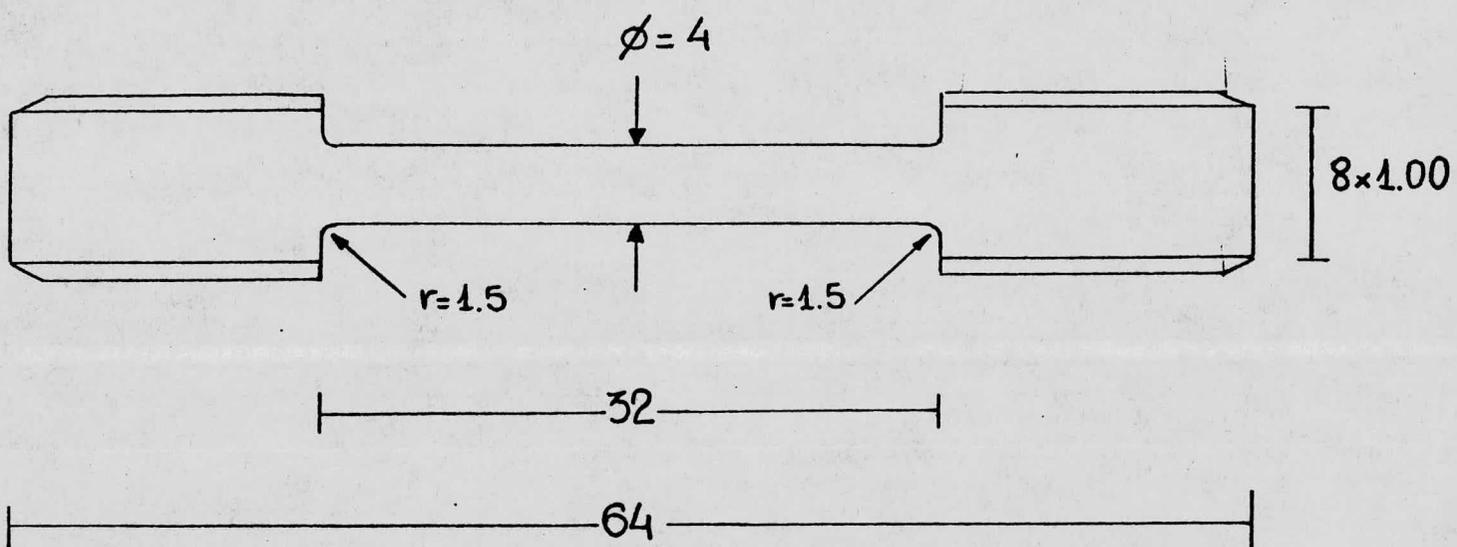


FIGURA 5 : RESISTENCIA A LA TRACCION (RT) VS. TEMPERATURA

- | | |
|---------------------------------|---------------------------------|
| ● — Fundición Nodular Testigo | ● - - - Fundición Gris Testigo |
| ○ — Fundición Vermicular 1.5%Cu | ○ - - - Fundición Gris 1.5% Cu |
| △ — Fundición Nodular 2 % Cu | △ - - - Fundición Gris 2 % Cu |
| × — Fundición Nodular 2.5 % Cu | □ - - - Fundición Gris ASTM 319 |

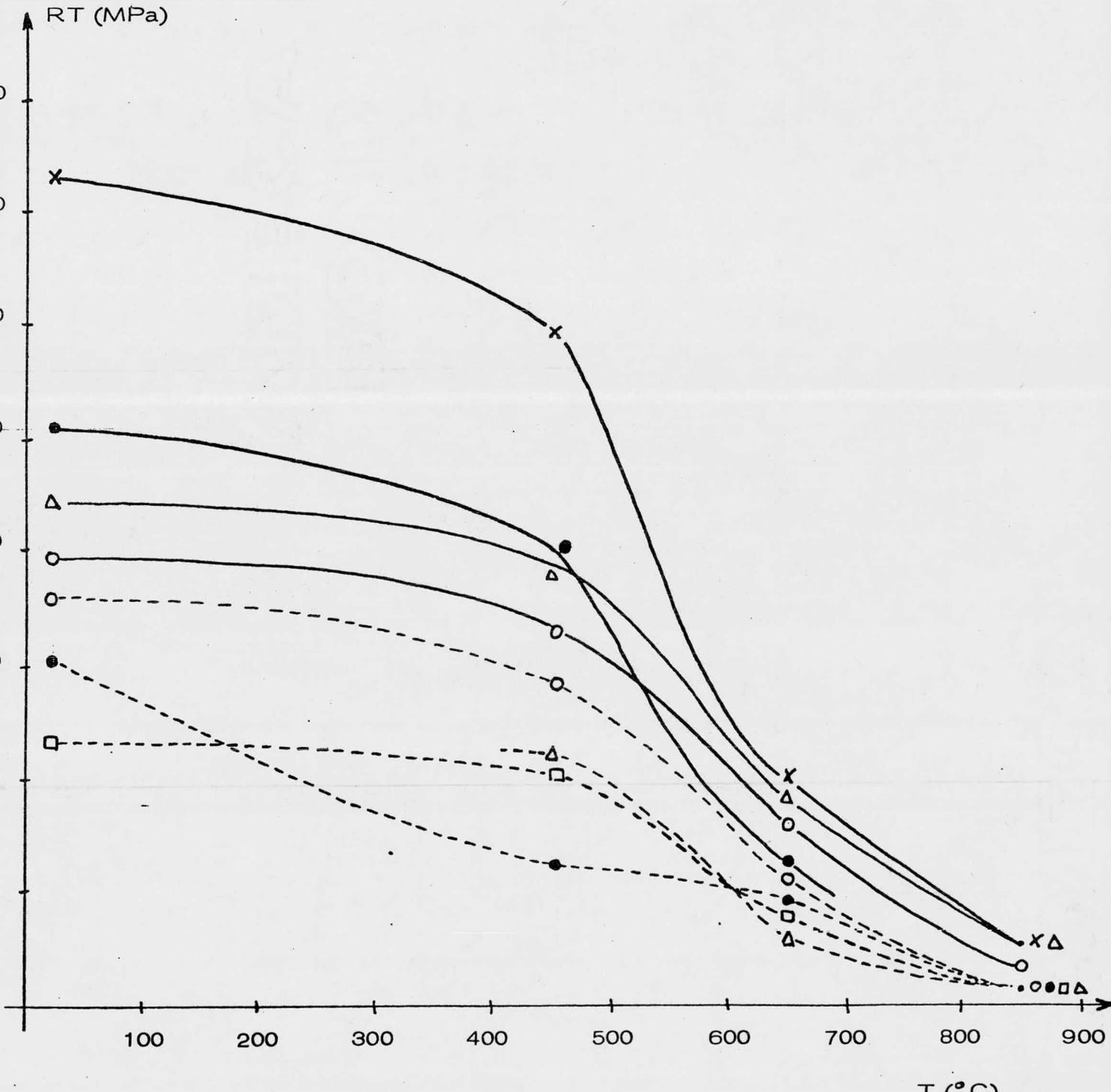


FIGURA 6 : PUNTO DE FLUENCIA (YP) VS TEMPERATURA

- | | | | |
|-----|------------------------------|--------|-------------------------|
| ●—— | Fundición Nodular Testigo | ●----- | Fundición Gris Testigo |
| ○—— | Fundición Vermicular 1.5% Cu | ○----- | Fundición Gris 1.5% Cu |
| △—— | Fundición Nodular 2 % Cu | △----- | Fundición Gris 2 % Cu |
| x—— | Fundición Nodular 2.5 % Cu | □----- | Fundición Gris ASTM 319 |

YP (MPa)

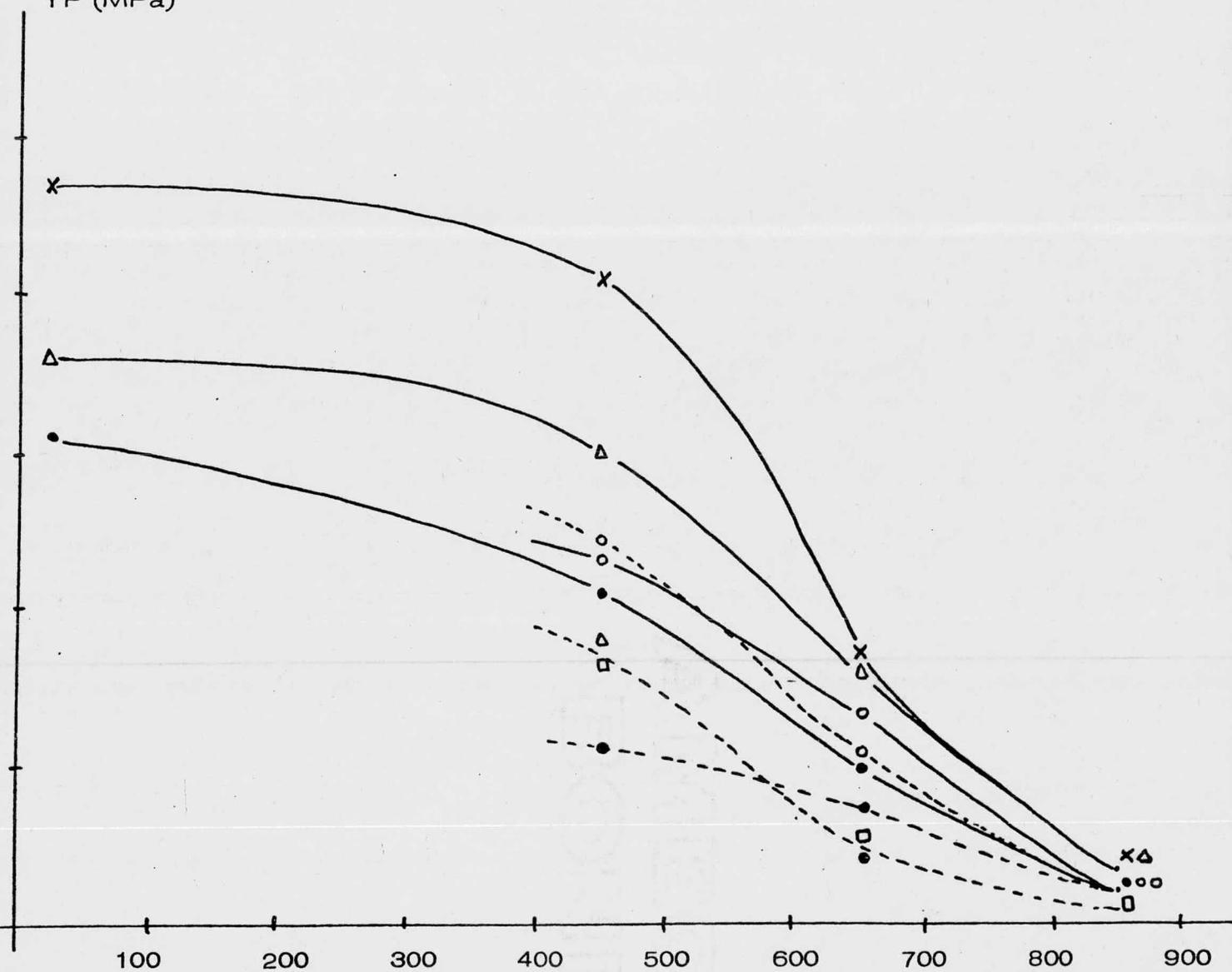
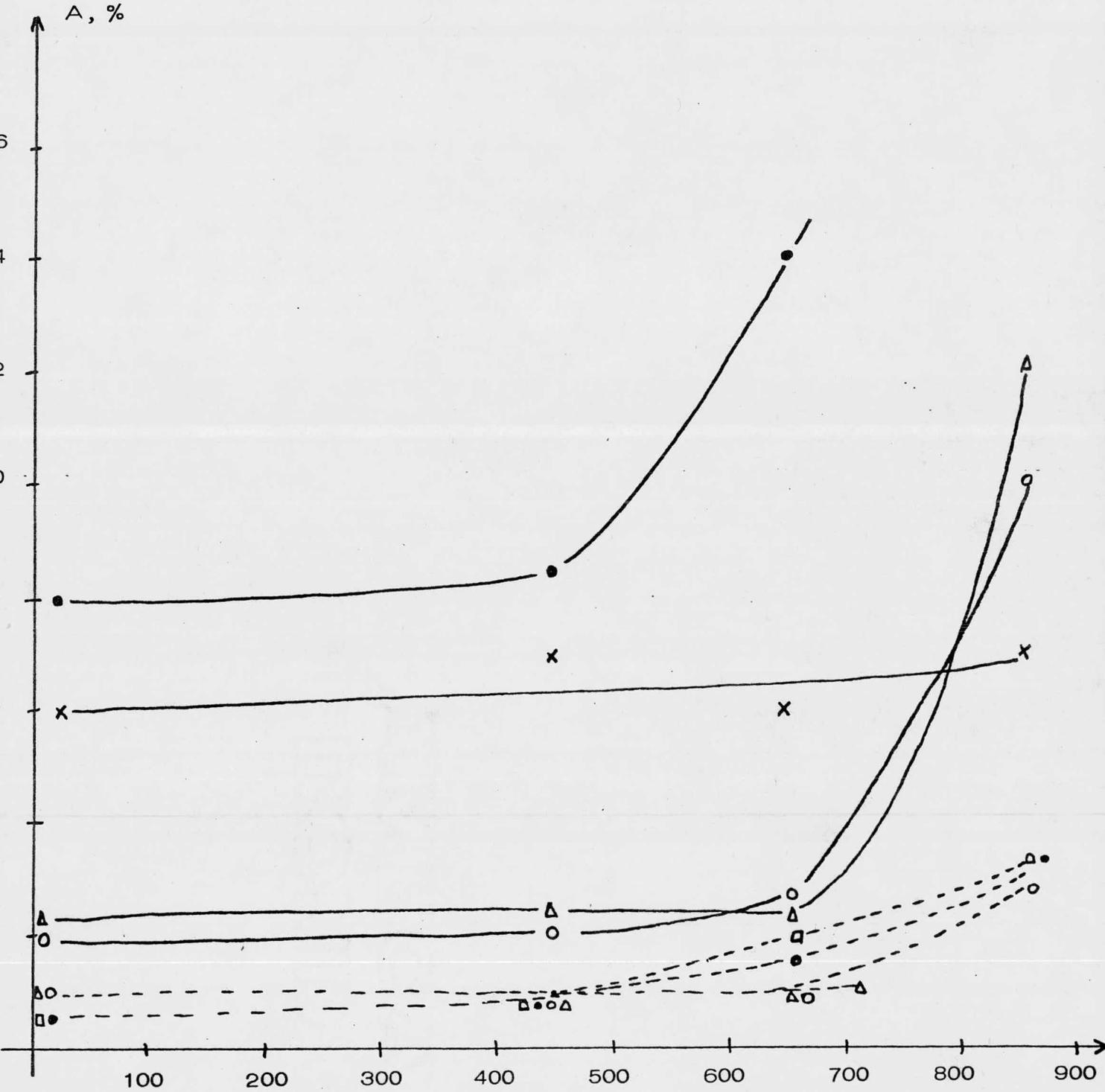


FIGURA 7 : ALARGAMIENTO (A) VS. TEMPERATURA

- | | |
|----------------------------------|-----------------------------------|
| ● — Fundición Nodular Testigo | ● - - - - Fundición Gris Testigo |
| ○ — Fundición Vermicular 1.5% Cu | ○ - - - - Fundición Gris 1.5% Cu |
| △ — Fundición Nodular 2.% Cu | △ - - - - Fundición Gris 2 % Cu |
| x — Fundición Nodular 2.5 % Cu | □ - - - - Fundición Gris ASTM 319 |



VII .TABLAS

TABLA 1 : COMPOSICION QUIMICA ESTIMADA.

COMPOSICION COLADA	C %	Si %	Mn %	S %	P %	Cu %	Cr %	Mg %(re- sidual)
1. Fe-N TESTIGO	3.80	2.00	0.67	0.04	0.04	--	--	0.04
2. Fe-V 1.5% Cu	3.80	2.00	0.68	"	"	1.50	--	0.01
3. Fe-N 2.0% Cu	3.80	2.10	0.69	"	"	2.00	--	0.04
4. Fe-N 2.5% Cu	3.80	2.20	0.67	"	"	2.50	--	0.04
5. Fe-G ASTM 319 clase II Tipo B	3.70	2.00	0.50	"	"	--	0.65	--
6. Fe-G TESTIGO	3.70	2.00	0.45	"	"	--	--	--
7. Fe-G 1.5% Cu	3.70	2.00	0.45	"	"	1.50	--	--
8. Fe-G 2.0% Cu	3.70	2.10	0.45	"	"	2.00	--	--
9. Fe-G 2.5% Cu	3.80	2.20	0.45	"	"	2.50	--	--

Fe-N : Fundición Nodular

Fe-G : Fundición Gris

Fe-V : Fundición Vermicular

TABLA 2: CLASIFICACION ASTM DE LOS GRAFITOS OBTENIDOS
EN BRUTO DE COLADA (Provisional).

Fe Nodular Testigo:	Grafito tipo I y II - No. 7 - 40 nodulos/in ²
Fe Nodular 2% Cu:	Grafito tipo I y II - No. 7 - 40 nodulos/in ²
Fe Nodular 2.5% Cu:	Grafito tipo I y II - No. 7 - 40 nodulos/in ²
Fe Vermicular 1.5% Cu:	Grafito tipo III
Fe Gris ASTM A 319:	Tipo 7 clase A + algo de C - No. 4
Fe Gris Testigo:	Tipo 7 clase A - No. 5
Fe Gris 1.5% Cu:	Tipo 7 clase E - No. 5
Fe Gris 2.0% Cu:	Tipo 7 clase A + algo de B y D - No. 5
Fe Gris 2.5% Cu:	Tipo 7 clase A + algo de C - No. 5

TABLA 3 : RESISTENCIA A CICLOS TERMICOS

PROBETA	No. CICLOS HASTA RUPTURA
1.- Fe-N TESTIGO	5
2.- Fe- V 1.5% Cu	22
3.- Fe-N 2.0 % Cu	53
4.- Fe-N 2.5% Cu	más de 100
5.- Fe-G ASTM 319 (0.65 % Cr)	28
6.- Fe-G TESTIGO	8
7.- Fe-G 1.5% Cu	22
8.- Fe-G 2.0% Cu	--
9.- Fe-G 2.5% Cu	30

Fe-N: Fundición Nodular

Fe-G: Fundición Gris

Fe-V: Fundición Vermicular

TABLA 4 : RESISTENCIA A LA TRACCION, PUNTO DE FLUENCIA Y ALARGAMIENTO EN FUNCION DE LA TEMPERATURA.

RT : Resistencia a la tracción, MPa

YP : Punto de fluencia, MPa

A : Alargamiento, %

Probeta C Temperatura	Fe-N-Test.			Fe-V-1.5%Cu			Fe-N 2% Cu			Fe-N 2.5%Cu			FeGASTM			FeG Testigo			Fe-G 1.5%Cu			Fe-G 2% Cu		
	RT	YP	A	RT	YP	A	RT	YP	A	RT	YP	A	RT	YP	A	RT	YP	A	RT	YP	A	RT	YP	A
25	510	310	8	390	240	2	440	360	2.5	730	470	6	230	-	0.5	310	-	0.5	360	-	1	170	-	1
450	400	210	8.5	330	230	2	390	300	2.5	590	410	7	210	170	1	120	110	1	280	240	1	220	180	1
650	120	95	14	150	125	2.5	180	160	2.5	190	160	6	70	50	2	90	70	1.5	110	100	1	60	-	1
850	-	-	-	30	17	10	40	30	12	40	30	7	20	10	3	20	15	3	20	15	3	20	10	1

Fe-N : Fundición Nodular; Fe-V : Fundición Vermicular ; Fe-G : Fundición Gris

TABLA 5 : ESTABILIDAD DE LA PERLITA EN FUNDICIONES NODULARES Y VERMICULARES FRENTE A TRATAMIENTO TERMICO DE FERRITIZACION (T.T.F.) (1.5 hs. a 950°C y enfriamiento en horno a - 15°C / hora, hasta 625°C, luego al aire).

PROBETA	% PERLITA ANTES T.T.F.	% PERLITA DESPUES T.T.F.
Fe-N Testigo	90	5
Fe-V-1.5% Cu	98	65
Fe-B- 2 % Cu	100	80
Fe-N- 2.5% Cu	100	95

TABLA 6 : ESTABILIDAD DE LA PERLITA EN FUNDICIONES
GRISES FRENTE A TRATAMIENTO TERMICO DE
FERRITIZACION (T.T.F.) (1.5 hs. a 850°C y -
enfriamiento en horno a 15°C / hora hasta 625°C,
luego al aire).

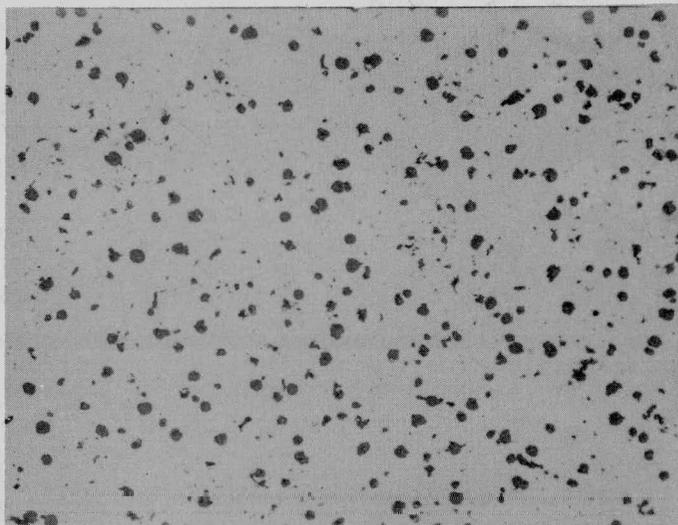
PROBETA	% PERLITA ANTES T.T.F.	% PERLITA DESPUES T.T.F.
Fe G ASTM	85	0
Fe G Testigo	60	5
Fe G 1.5% Cu	90	60
Fe G 2.0 % Cu	90	70
Fe G 2.5% Cu	100	80

TABLA 7: ESTABILIDAD DE LA PERLITA EN LAS FUNDICIONES NODALRES, VERMICULARES Y GRISES FRENTE A TRATAMIENTO TERMICO DE SIMULACION DE SERVICIO DE LINGOTERAS (T.T.S.) (6 horas a 850° C seguido de enfriamiento en horno a 300° C/hora hasta 500° C, luego al aire).

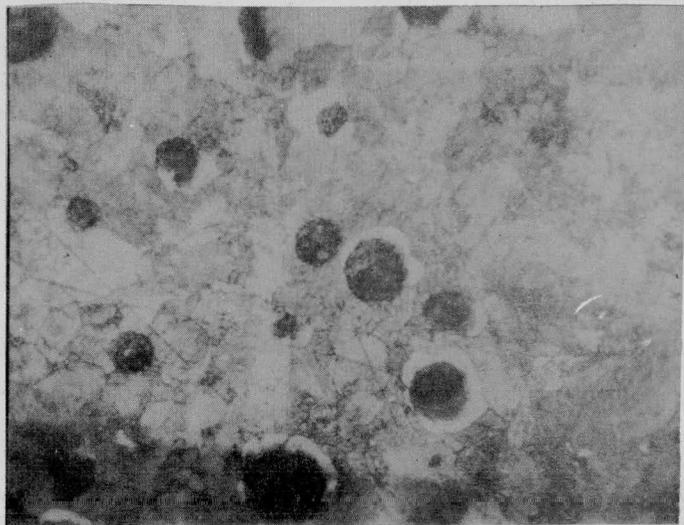
PROBETA	% PERLITA ANTES T.T.S.	% PERLITA DESPUES T.T.S.
FeN Testigo	90	10
Fe V 1.5% Cu	98	50
Fe N 2% Cu	100	75
Fe N 2.5% Cu	100	80
Fe G ASTM	85	5
Fe G Testigo	60	0
Fe G 1.5% Cu	90	10
Fe G 2 % Cu	90	75
Fe G 2.5 % Cu	100	95

VIII FOTOGRAFÍAS DE LAS MICROESTRUCTURAS

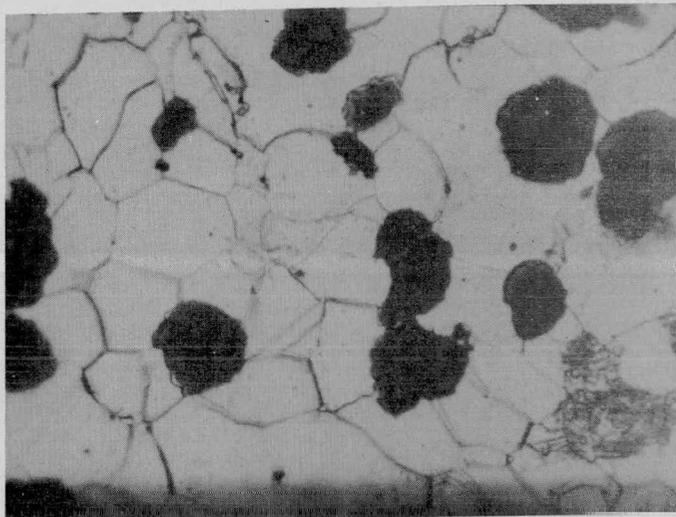
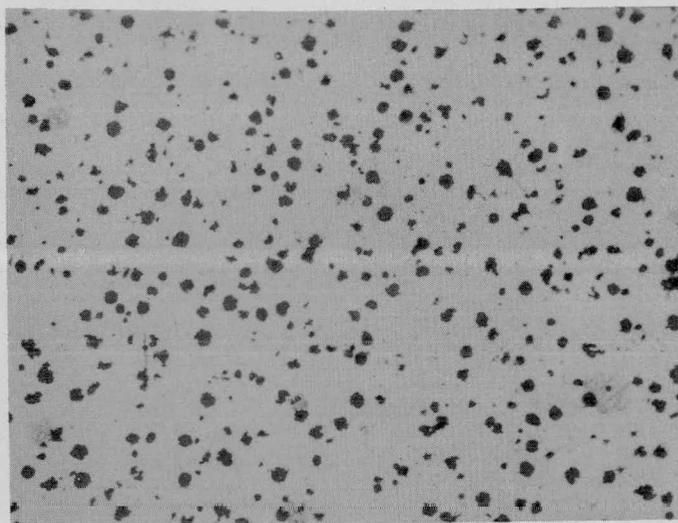
Sin ataque, 100x



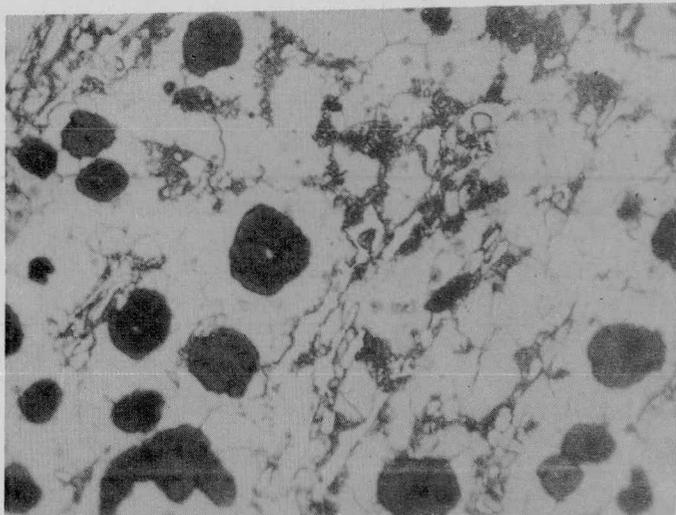
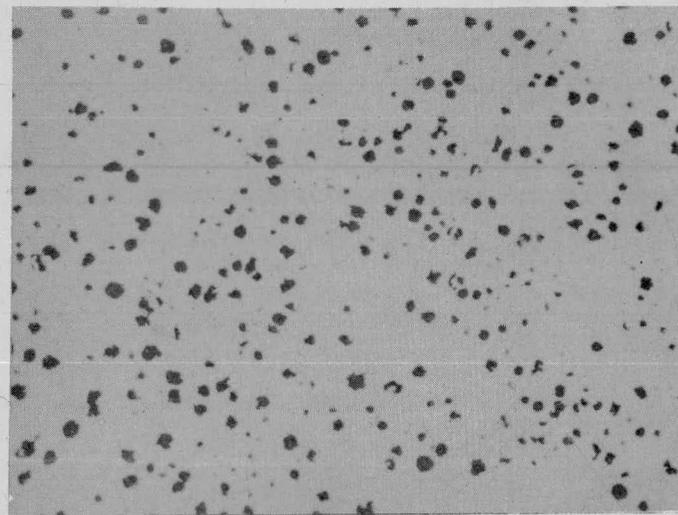
Con ataque, Nital, 500x



Bruto de Colada



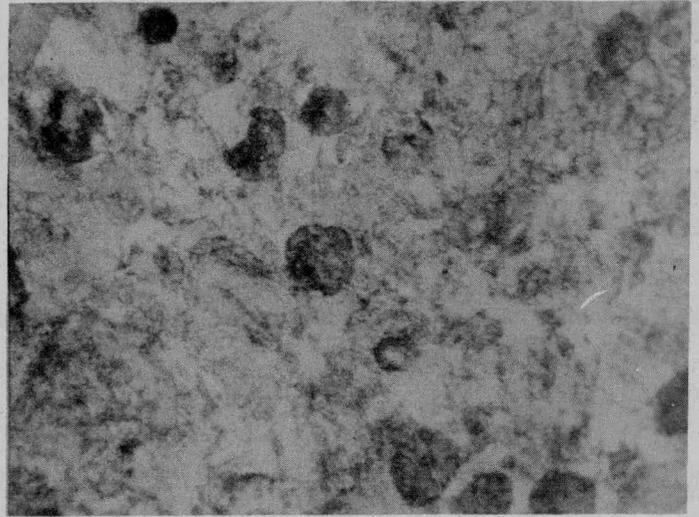
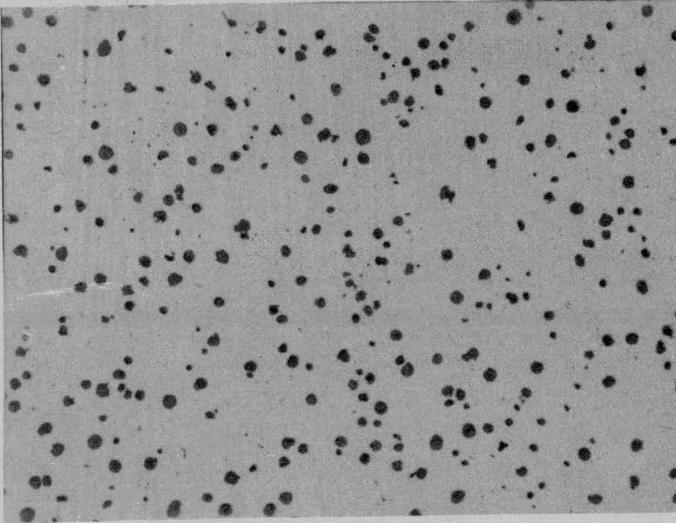
T T F



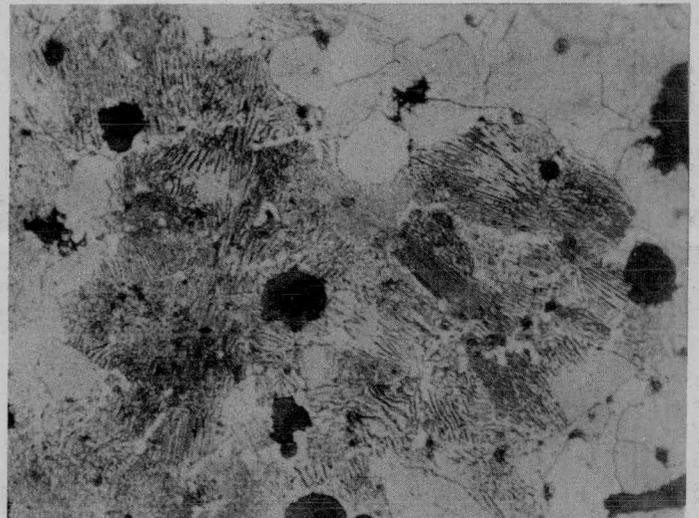
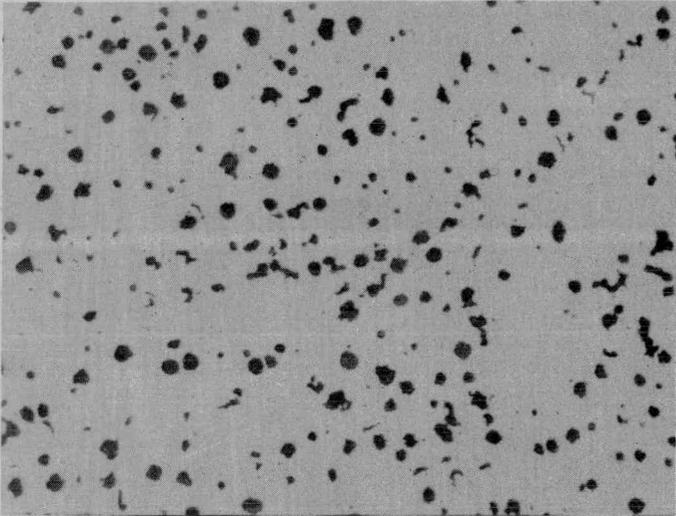
T T S

Sin ataque, 100x

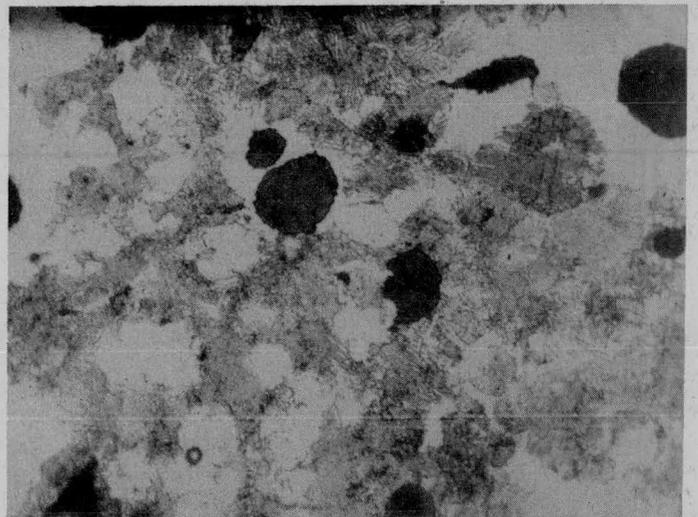
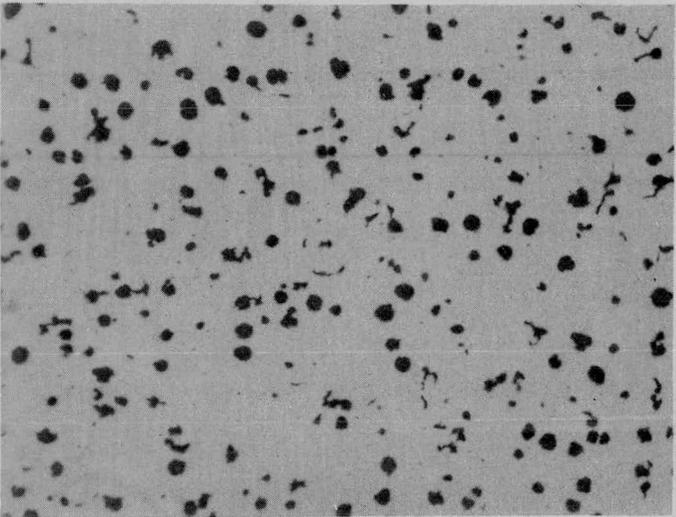
Con ataque, Nital, 500x



Bruto de Colada

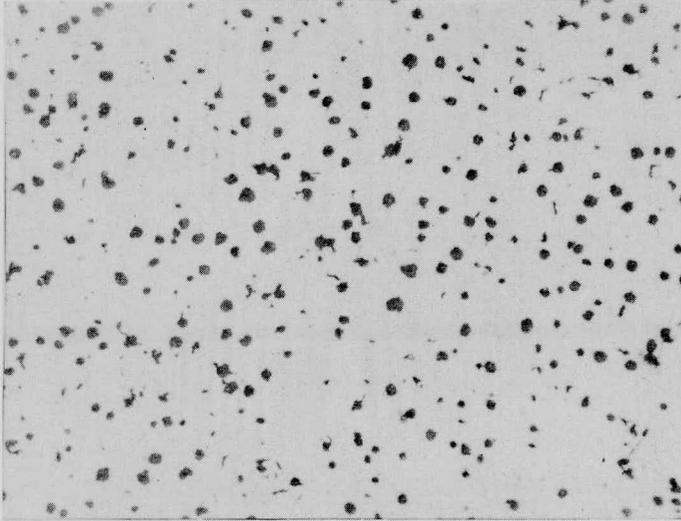


TTF

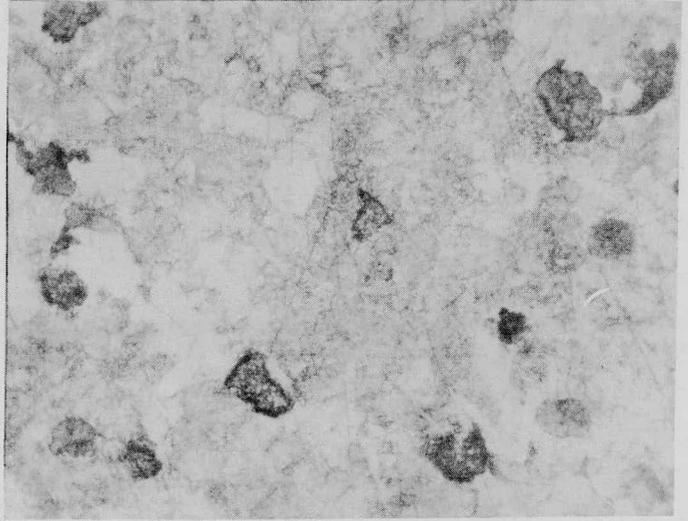


TTS

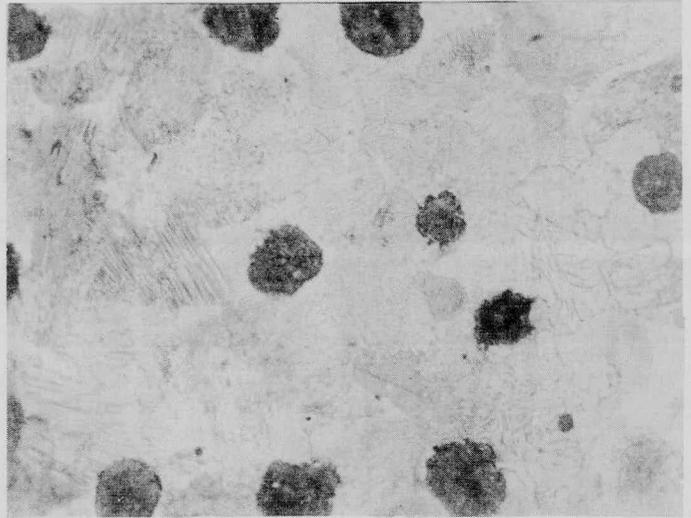
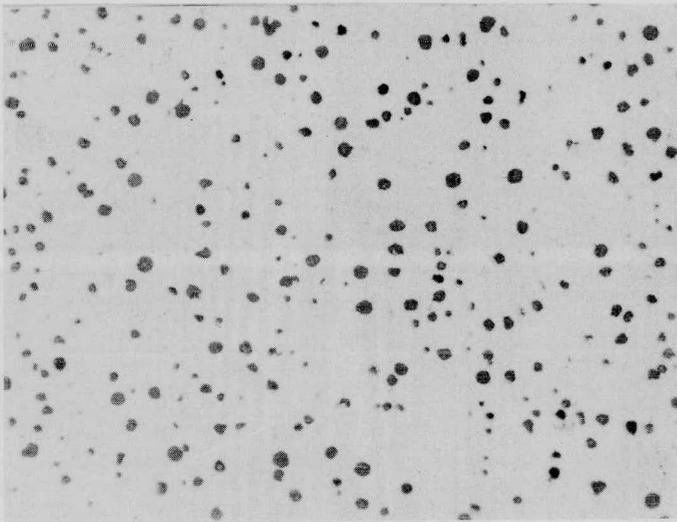
Sin ataque, 100x



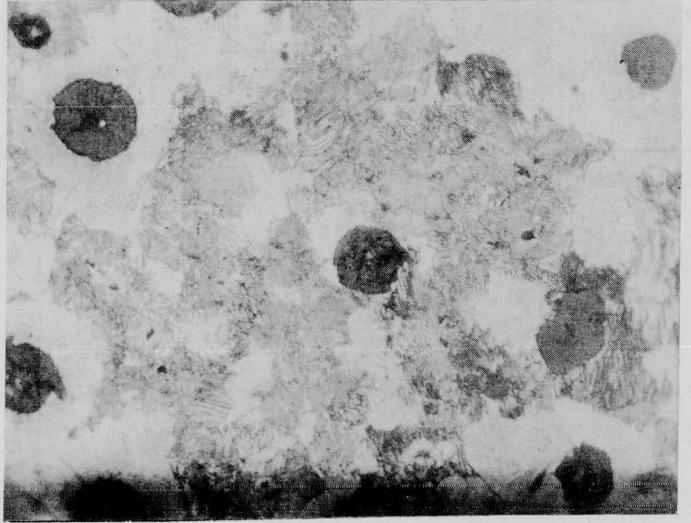
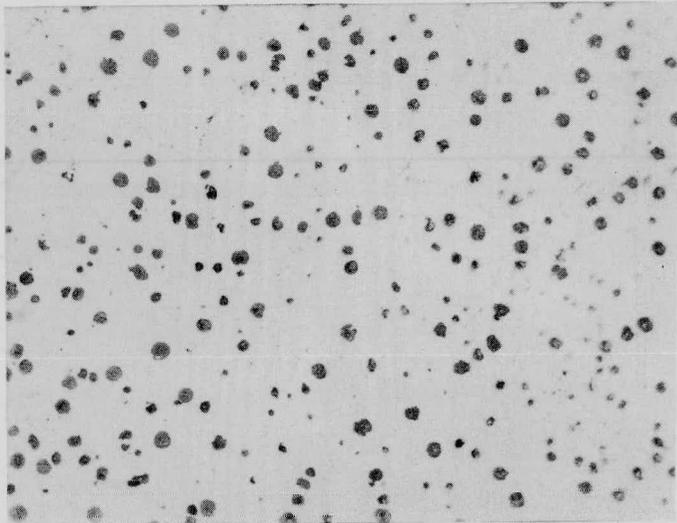
Con ataque, Nital, 500x



Bruto de Colada

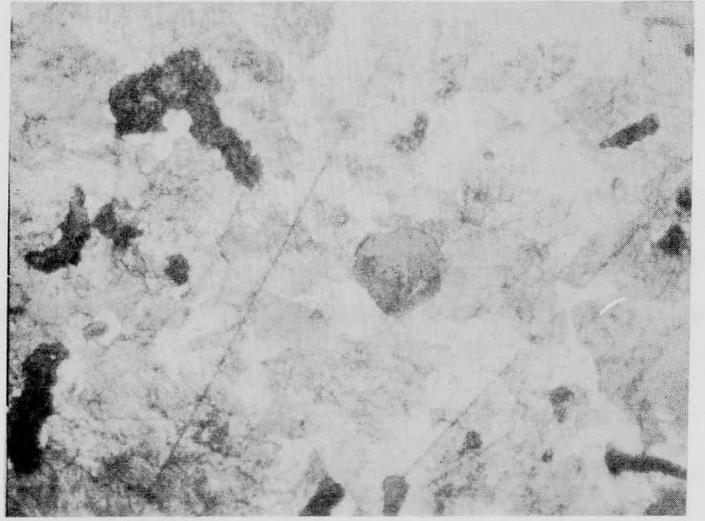
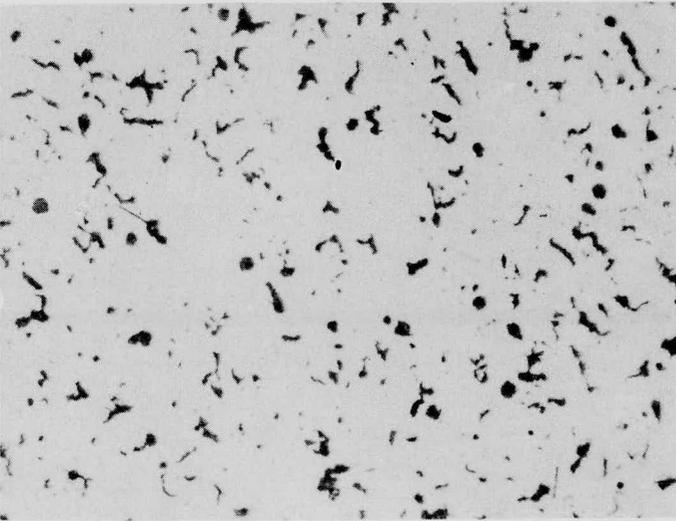


T T F

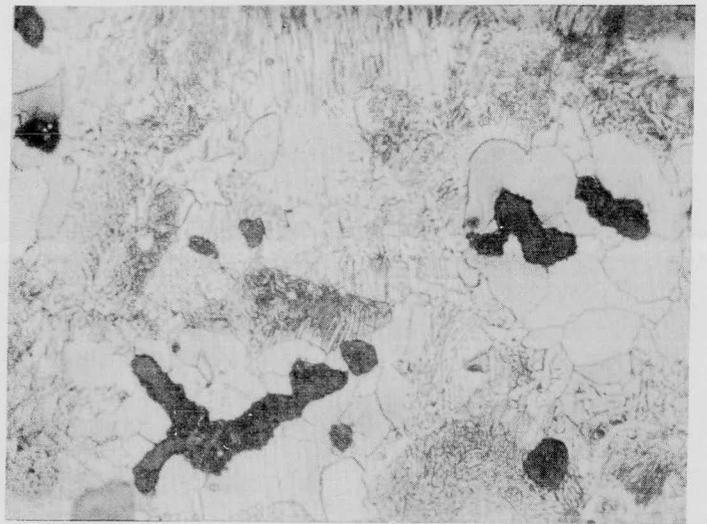
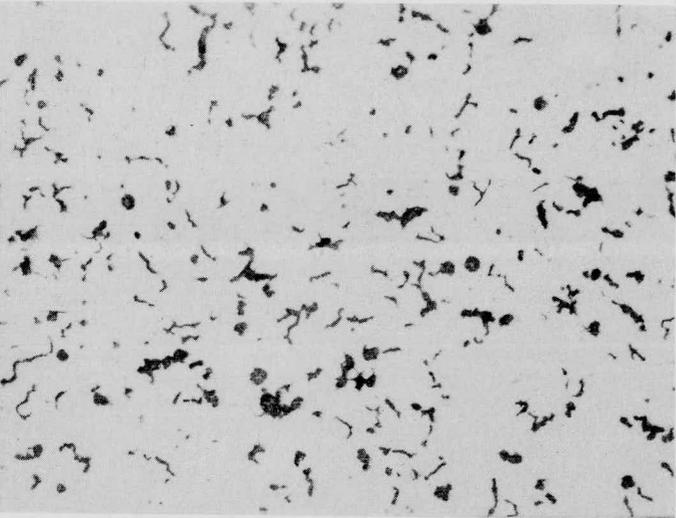


Sin ataque, 100x

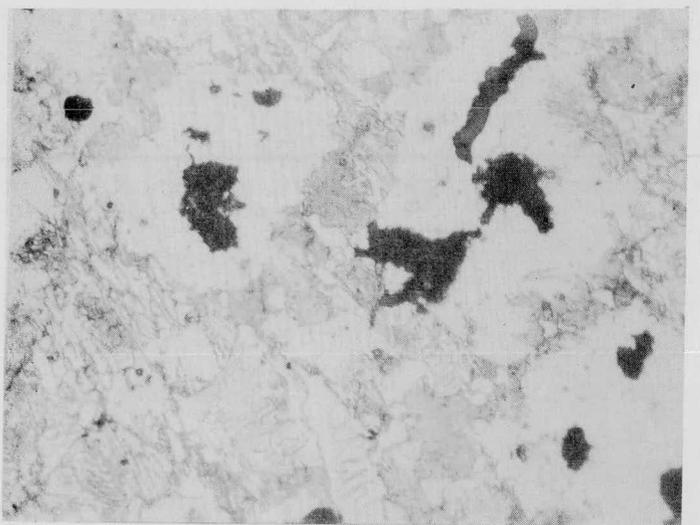
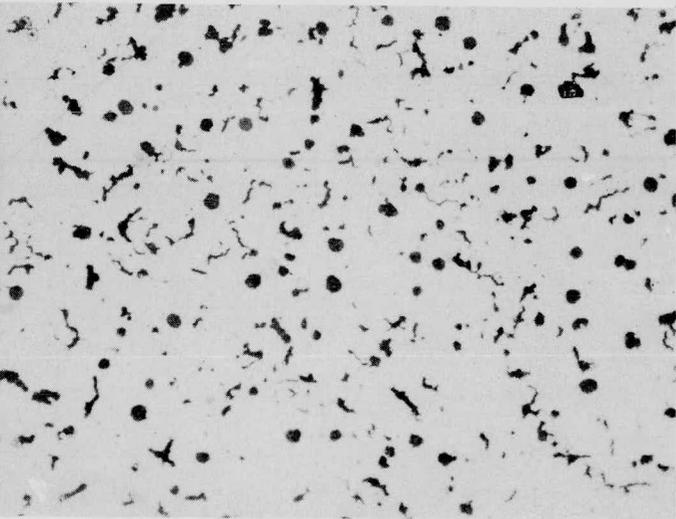
Con ataque, Nital 500x



Bruto de Colada

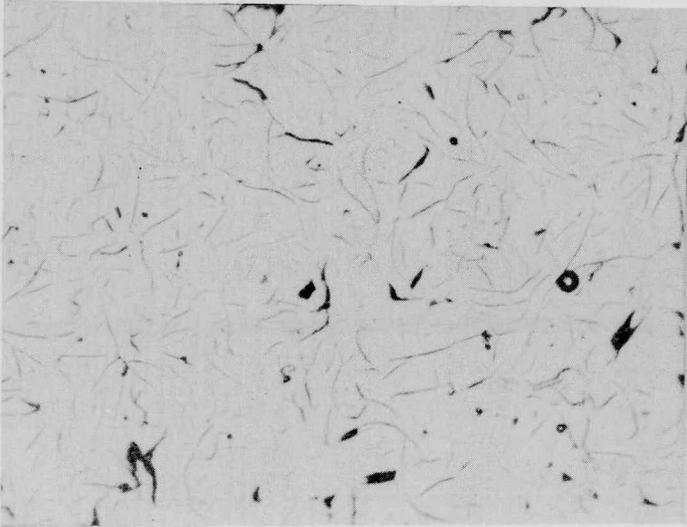


T T F



T T S

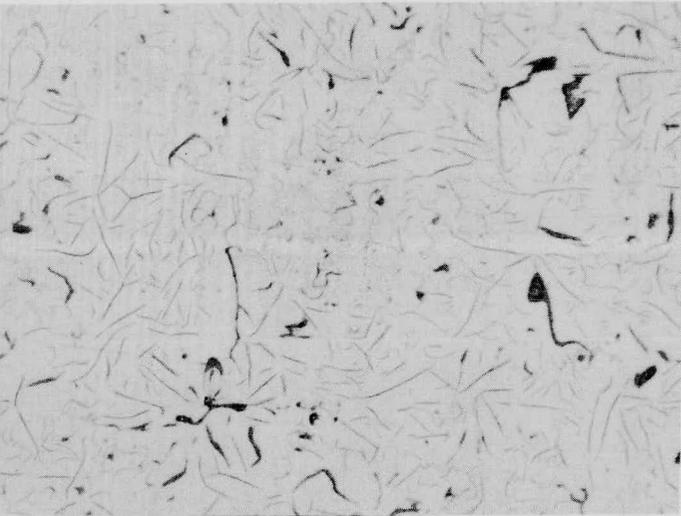
Sin ataque, 100x



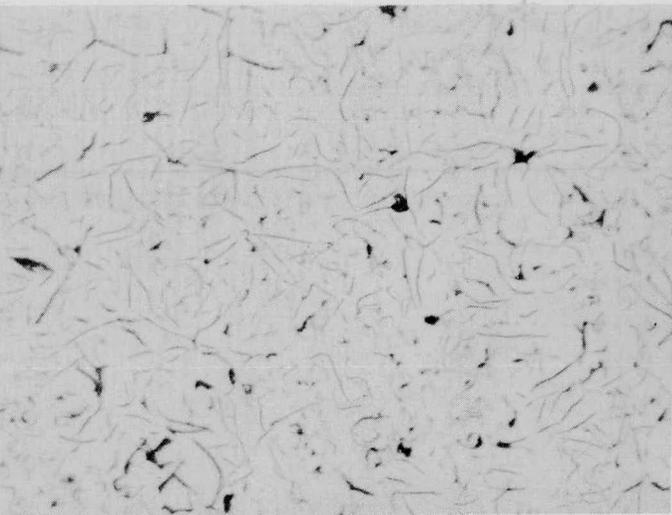
Con ataque, Nital, 500x



Bruto de Colada

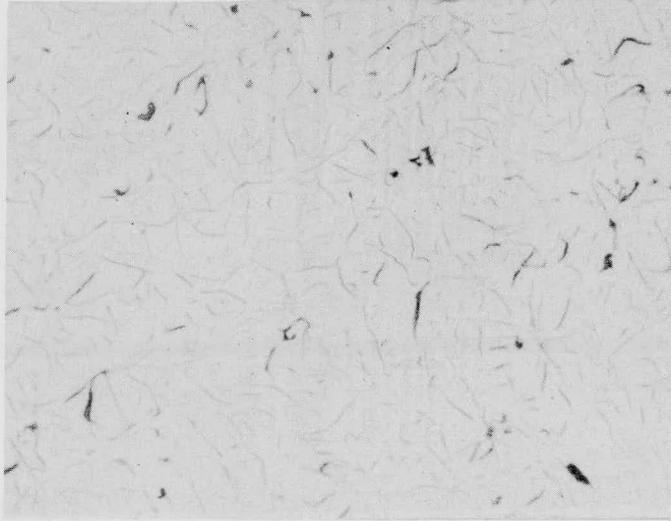


TTF



TTS

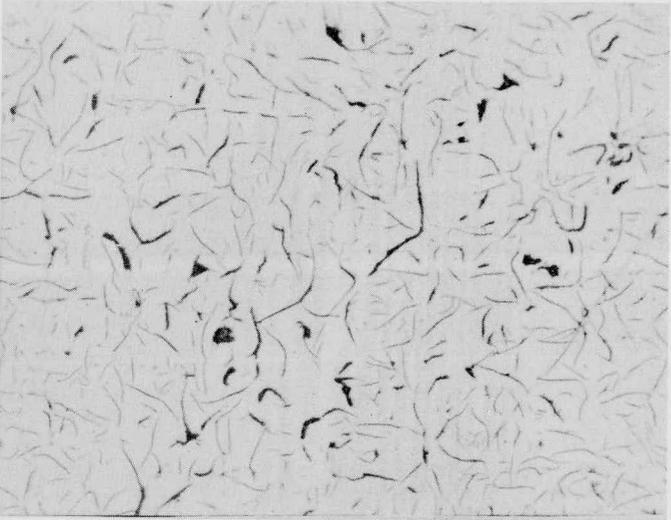
Sin ataque, 100x



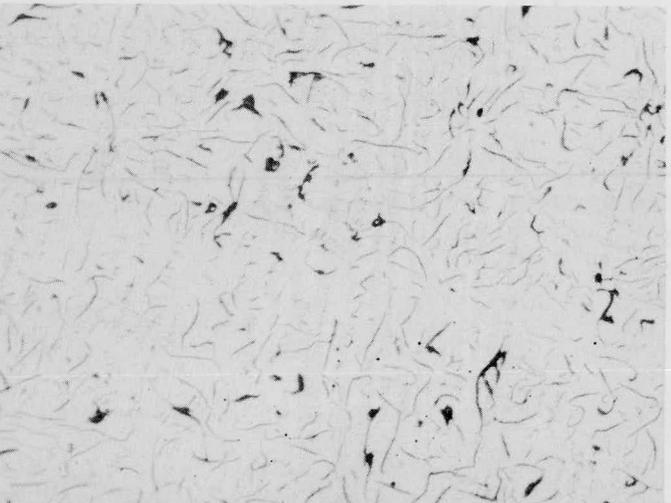
Con ataque, Nital, 500x



Bruto de Colada

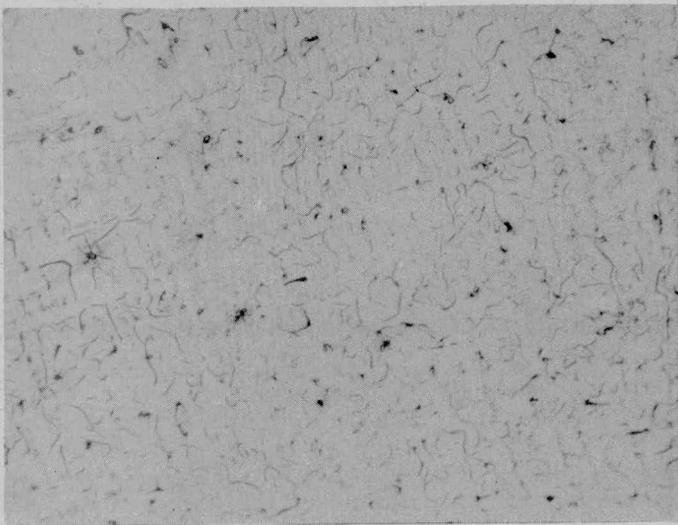


T T F



T T S

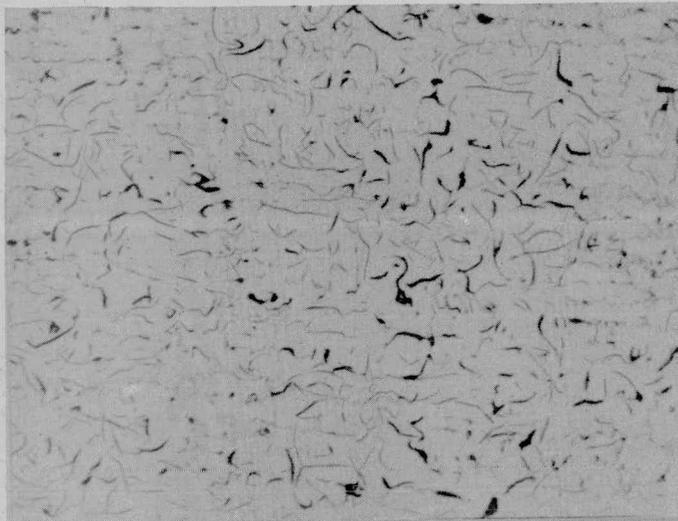
Si n ataque, 100x



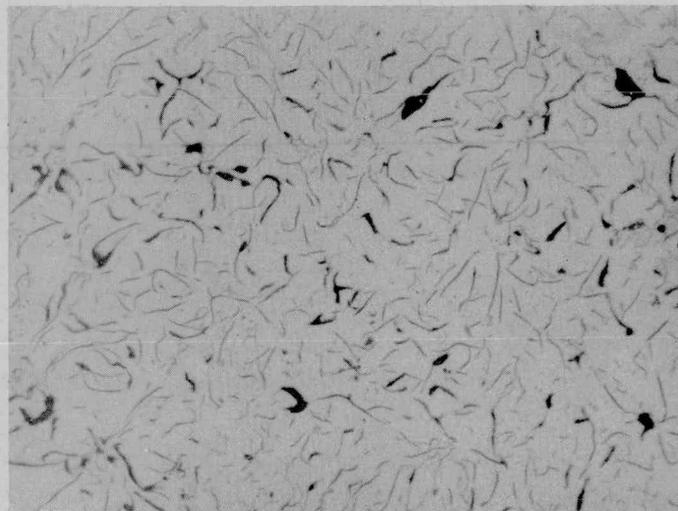
Con ataque, Nital , 500x



Bruto de Colada

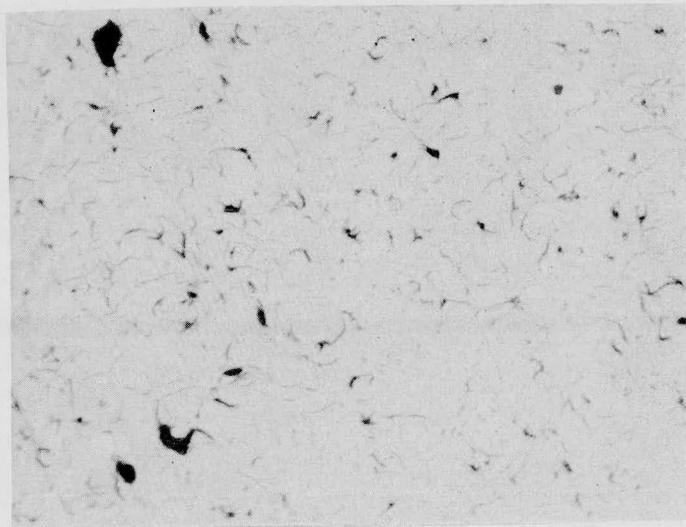


TTF

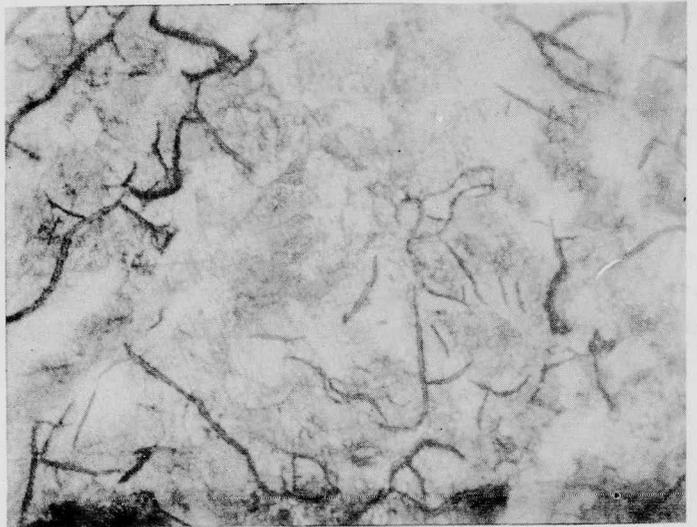


TTS

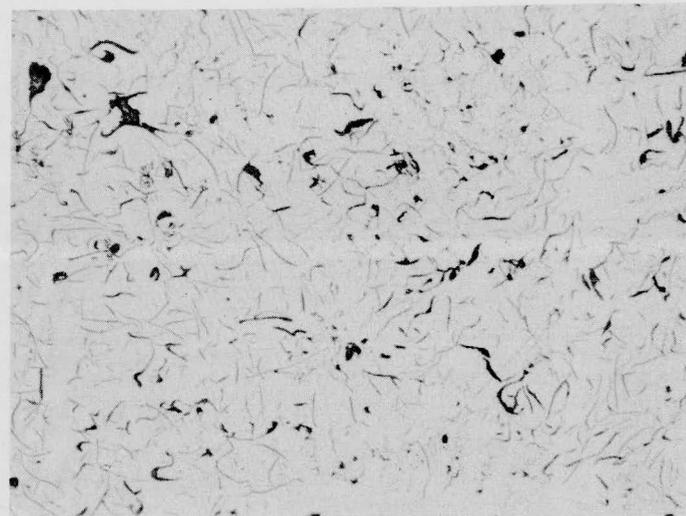
Sin ataque, 100x



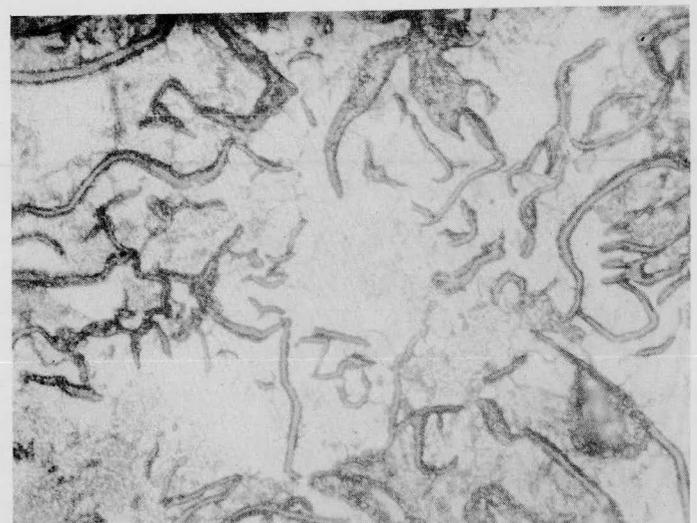
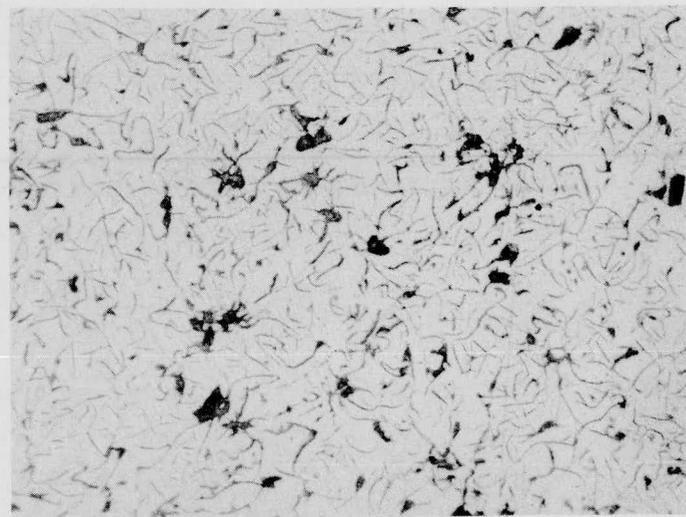
Con ataque, Nital, 500x



Bruto de Colada



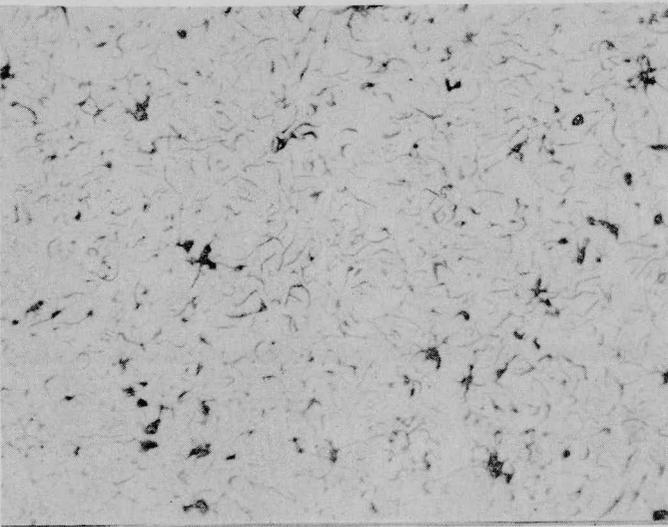
TTF



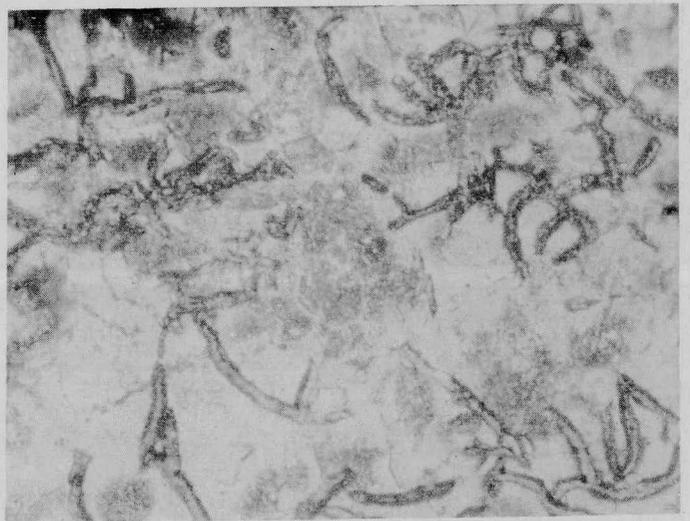
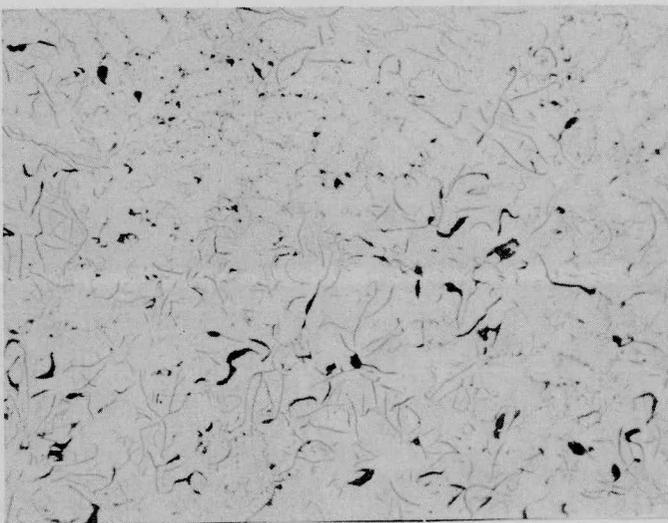
TTS

Sin ataque, 100x

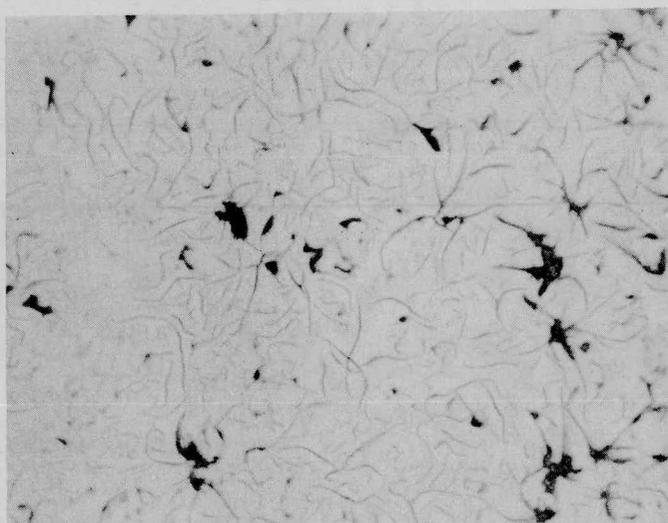
Con ataque, Nital, 500x



Bruto de Colada



T T F



T T S

REFERENCIAS

- 1.- B. Lambert, P. Poyet, A. Lajarrigue y J.C. Marguerie:
The Metallurgy of Cast Iron. Pag. 603. Edited by B. Lux, I. Minkoff y F. Molliard - Georgi Publishing Co.- St. Saphorin-Switzerland.
- 2.- A.L. de Sy- Los efectos del Cobre en las Fundiciones.- Publicación del CDEC (Consejo Internacional para el desarrollo del Cobre) y Asociación Mexicana del Cobre - 1968.
- 3.- A.L. de Sy: Aplicaciones de las fundiciones aleadas al Cobre. Idem.
- 4.- Bain y Paxton - Alloying Elements in Steel - Second Edition .-
- Third revised printing - American Society for Metals - 1966 .
- 5.- de Sy, A.L.; Dilewijns, J. "Main results of research and development carried out at Ghent University", Aston University, Birmingham 29-6-1967 - Paper No. 4 - C.D.A.
- 6.- Foulon, J.; de Sy A.L.; "L' influence de cuivre sur quelques propriétés des fontes grises", Foundrie, 1954 (96), Jan., p. 3755-3773.
- 7.- N.P. Nicolaichik y E.N. Nicolaichick, Sthal in English, Oct. 1969, pag. 889.
- 8.- L.M. Chercasov, id. id., march 1969, pag. 267.
- 9.- A.A. Maslov y N. A. Nicolaenko; Russ Cast. Prod., 1968.
- 10.- L.M. Chercasov, L.A. Kolesnik y V.K. Mogilev, id. id. 1969.
- 11.- ASTM Standards.

- 12.- El Cubilote y su operación.- A.F.S..- última edición.
- 13.- Metals Handbook, Última edición.-
- 14.- Dieter - Mechanical Metallurgy - Mc. Graw -Hill - 1961.
- 15.- Toru Namai- Trans. Nat. Res. Inst. for Met. Vol. 13
No. 4 - Pag. 202- 1971.