

PMM/C-196

COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA
DEPENDIENTE DE LA PRESIDENCIA DE LA NACION

PROGRAMA MULTINACIONAL DE METALURGIA
(Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico - OEA)

COMPORTAMIENTO MECANICO DE LAS INCLUSIONES

Ings. J.C. González, T.G. de Castillo, A. Sáenz López y A.M. Hey



Buenos Aires-Argentina

1976

COMPORTAMIENTO MECANICO DE LAS INCLUSIONES

1. INTRODUCCION

Es un hecho conocido que obtener un acero limpio, es decir, libre de inclusiones no-metálicas es un concepto relativo. Estas inclusiones deben considerarse como un componente estructural natural e inevitable del acero, que deberá tratarse como un material compuesto: acero-inclusiones. Pese a ello la disminución del contenido de inclusiones en el acero ha sido objeto del desvelo de los metalurgistas por las consecuencias generalmente nefastas que tienen éstas sobre diversas propiedades del material.

El advenimiento de los aceros estructurales soldables de alta resistencia y baja aleación ha focalizado la atención en los últimos años no solo sobre la forma de las inclusiones sino también sobre la cantidad, tamaño, distribución, etc. En efecto, las altas tensiones de servicio que estos aceros pueden resistir hacen que se incremente el efecto concentrador de tensiones de cualquier defecto o fisura y, por lo tanto, que disminuya el tamaño crítico de defecto capaz de causar una falla catastrófica. Las inclusiones constituyen fisuras naturales dentro del acero y su influencia se manifiesta especialmente sobre las características de ductilidad y tenacidad del material.

La forma final de una determinada inclusión está dada por sus características de deformación relativa a la matriz que la rodea y por el proceso de deformación que se ha llevado a cabo.

En el presente trabajo se estudian aceros resultados (Thomas), correlacionándose propiedades básicas del producto: acero-inclusiones con las variables del proceso de deformación. Se trabaja en el rango de 850°- 1150°C mediante forjado observándose diversos valores del porcentaje de reducción. Como propiedad física a analizar se selecciona la plasticidad relativa de las inclusiones.

2. METODO EXPERIMENTAL

En la primer parte, los ensayos se realizan sobre palanquillas de aceros resultados producidos, en convertidor Thomas, por la empresa "Altos Hornos Zapla", de las calidades SAE 1112, 1212 y 12L14 cuyas características se indican en la Tabla 1.

TABLA 1

SAE	sección (mm)	Acero
1112	84 x 84	efervescente
1212	76 x 76	calmado
12L14	76 x 76	calmado

Las palanquillas presentan inclusiones de sulfuro de manganeso, que en general corresponden al tipo 1 de la clasificación de Sims (1), es decir: partículas globulares dispuestas al azar. La Tabla 2 se refiere a la composición química de los aceros empleados.

TABLA 2

N°	SAE	C	Mn	P	S	Pb
1	1112	0.12	0.83	0.105	0.168	-
2	12L14	0.13	0.87	0.006	0.270	0.200
3	1212	0.11	0.90	0.110	0.185	-

La distribución de inclusiones se analiza macroscópicamente mediante impresiones Bauman (2,3,4) ('sulphur print') mientras que microscópicamente se determinan en forma cuantitativa los siguientes parámetros: dis-

tribución de inclusiones, fracción en volumen, factor de forma, longitud proyectada, y plasticidad relativa.

Estas determinaciones se realizan en microscopios ópticos con ocular micrométrico y aparato cuantimétrico Quantimet modelo B, empleando las técnicas metalográficas usuales para la preparación de probetas.

Los dos primeros parámetros se determinan en la sección transversal de la palanquilla y los restantes en la sección longitudinal de las muestras.

La composición química de las inclusiones típicas se determina con microsonda electrónica CAMECA.

En la segunda parte del trabajo, las muestras destinadas a ser deformadas en caliente se maquinan en probetas de 10x15x35 mm extraídas de las zonas con mayor contenido de inclusiones, orientadas de manera tal de obtener condiciones de deformación similares a las imperantes en laminación.

Las probetas se deforman a 50%, 65% y 80% de la altura inicial mediante forjado usando un martinete Arrigoni de 100 Kg de masa activa.

Las temperaturas seleccionadas para los ensayos se encuentran comprendidas en el rango de 850° a 1150°C empleándose a tal fin un horno eléctrico a resistencia, con circulación de gas inerte con el objeto de impedir la oxidación.

3. RESULTADOS

3.1 Distribución de inclusiones

3.1.1 Macroscópica

Mediante impresiones Bauman se determina la distribución de inclusiones y por consiguiente la de azufre, en la sección transversal de la palanquilla. Se observa que la segregación es similar a la del lingote de donde provienen.

Las palanquillas corresponden aproximadamente a la zona central del lingote. La distribución observada es típica para los aceros analizados (Figs. 1, 2 y 3).

3.1.2 Microscópica

Mediante el análisis cuantimétrico se determina la distribución de inclusiones desde el borde al centro de la palanquilla, en la sección transversal de la misma. Se obtiene de este modo la fracción en volumen de las distintas zonas en que se divide la muestra, Fig. 4.

En Fig. 5 se representa la longitud proyectada de las muestras. Ver Apéndice I.

3.1.3 Identificación de inclusiones

El análisis con la microsonda de las inclusiones típicas observadas permite determinar que en general son de sulfuro de Manganeso, Fig. 6; si bien algunas poseen en sus extremos otras fases correspondiendo a silicatos complejos ('tips') provenientes de los elementos empleados en la desoxidación del acero.

Se detectan además inclusiones de silicoaluminatos de hierro y manganeso.

3.2 Factor de forma

El factor de forma, es decir la relación entre la longitud y el ancho máximo de la inclusión se mide empleando la técnica descrita por Van Vlack (5) a los efectos de garantizar una selección al azar de las inclusiones a ser medidas. Apéndice I.

Se barre una sección longitudinal de la palanquilla que abarca desde el borde al centro de la misma. En la Fig. 7 se indica el histograma correspondiente a cada calidad en estudio determinando el factor de forma más probable para las condiciones dadas de laminación. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 3.

TABLA 3

SAE		Sección	Factor de forma logarítmico, promedio
1112	efervescente	84 x 84 mm	0.39
1212	calmado	76 x 76 mm	0.82
12L14	calmado	76 x 76 mm	0.82

3.3 Plasticidad de las inclusiones

Utilizando las técnicas de metalografía cuantitativa descriptas precedentemente se analiza la variación del factor de forma de los sulfuros sometiendo los tres materiales a las condiciones de deformación y temperatura arriba indicadas. Las mediciones se efectúa sobre la sección perpendicular a la dirección original de laminación con el fin de tener inclusiones de sección circular como punto de partida.

A partir de los valores de factor de forma se calcula ψ , la plasticidad relativa de la inclusión con respecto a la matriz, definida según Apéndice I. Valores de ψ cercanos a 1 indican una inclusión blanda y altamente deformable mientras que $\psi = 0$ implica una inclusión indeformable.

La Fig. 8 muestra la variación de plasticidad con respecto a la cantidad de deformación. Se observa un descenso de la plasticidad de las inclusiones a altas deformaciones confirmando resultados precedentes (14). Se observa una menor plasticidad en el acero 1 (1112 efervescente). Asimismo, Fig. 9, existe una disminución de la deformabilidad relativa a las temperaturas más altas especialmente en los aceros 2 y 3 con menos contenido de oxígeno. La dispersión en los resultados es adjudicable a la diferencia de deformabilidad de inclusiones individuales deformadas en las mismas condiciones. Esta variación atribuída por otros autores (14) a variaciones en la composición, puede deberse también a inhomogeneidad de la deformación.

Las Figs. 10 y 11 muestran la apariencia de las inclusiones en sección transversal y longitudinal respectivamente y la Fig. 12 muestra la estructura del mismo acero.

4. DISCUSION

Los resultados de las mediciones realizadas muestran que es posible la caracterización automática, utilizando el Quantimet (4), de la distribución, tamaño y fracción en volumen de inclusiones. Es, sin embargo, menester recurrir a los más laboriosos métodos manuales para la obtención de valores de factor de forma y longitud proyectada, que son los más relevantes a las propiedades de tenacidad. Como es habitual en estos procedimientos, la obtención de valores de alguna significación estadística hace imprescindible un elevado número de mediciones. Esta dificultad se agrava ante la natural heterogeneidad geométrica de las inclusiones que generalmente aumenta durante el trabajado mecánico. Es, de todas maneras, posible obtener valores razonables de factor de forma que permiten conocer el comportamiento de las inclusiones durante el trabajado. En efecto, la Fig. 8 confirma los resultados de otros investigadores (14) con respecto a la influencia de composición y cantidad de deformación sobre la plasticidad relativa de los sulfuros. En el acero 1112 efervescente, los mismos muestran una mayor resistencia a la deformación y una menor sensibilidad al aumento de la deformación, especialmente a bajas temperaturas. A temperaturas relativamente altas y con bajas deformaciones la plasticidad de los sulfuros con alto contenido de oxígeno aumenta considerablemente. Aun así, no alcanza los valores observados en aceros calmados a bajas temperaturas de deformación.

No existe consenso entre los diversos investigadores que han atacado el problema sobre las causas que determinan el descenso de plasticidad relativa a altas deformaciones. Ello ha sido adjudicado a endurecimiento por trabajado, cambio de forma, aumento de superficie, fricción superficial, etc. (14). Al respecto es interesante hacer notar la menor deformabilidad de los sulfuros en el acero 12L14 con respecto al 1212, de características bastante similares excepto por

la adición de plomo al primero de ellos. El plomo se encuentra asociado y en el exterior de los sulfuros. Es de esperar que a las temperaturas en cuestión se encuentre en estado líquido y en condiciones de lubricar la interfase austenita-sulfuro. Ello debería facilitar el flujo de metal sobre la inclusión eliminando la tensión longitudinal de corte. Obrarían solamente entonces las fuerzas de compresión y ello podría explicar la menor deformabilidad observada.

Corresponde hacer notar que tanto en los ensayos realizados en este trabajo como en los realizados por otros investigadores se ha llegado a la deformación final a través de varios pasos, en algunos casos con calentamientos intermedios. Ello hace que la estructura de la matriz varíe considerablemente: desde material altamente deformado hasta material totalmente recristalizado. Con los consiguientes cambios de resistencia a la deformación que debieran traducirse en variaciones en la plasticidad relativa de las inclusiones. En el transcurso de este trabajo fue posible deformar en una sola "pasada" solamente a las temperaturas más altas y a bajas deformaciones mientras que las restantes se realizan en dos o más golpes en rápida sucesión. Se ha rediseñado el sistema de deformación con el fin de aumentar la capacidad de deformación y disminuir el rozamiento para eliminar la inhomogeneidad de deformación. Ello podría eventualmente introducir algunas variaciones en los resultados hasta aquí obtenidos.

Los resultados precedentes confirman la validez de la práctica habitual de producción de aceros de corte libre procesando a temperaturas relativamente altas materiales de un adecuado nivel de oxidación, y sugieren un efecto beneficioso co-lateral del Pb, tendiente a obtener sulfuros con la menor deformación posible.

Asimismo, es evidente que las condiciones de procesamiento de aceros estructurales, en especial los microaleados, requeridas para obtener refinamiento de grano, es decir: altas deformaciones a bajas temperaturas, son las más desventajosas en lo que a forma ideal de inclusiones se refiere. Solamente en caso de llegarse a deformar en el rango ferrítico, por menor resistencia de esta fase con respecto a la austenita, es factible esperar una mejoría relativa en este sentido. Alternativamente debe pensarse en un cambio en la plasticidad

relativa de los sulfuros por un cambio de composición de los mismos: agregados de zirconio, tierras raras, etc.

5. CONCLUSIONES

- 1.- Es posible determinar por métodos automáticos (Quantimet(4) la distribución, cantidad y fracción en volumen de inclusiones mientras que la longitud proyectada y el factor de forma deben medirse en la forma convencional.
- 2.- La plasticidad relativa de los sulfuros con respecto a la matriz disminuye con:
 - (a) una disminución del contenido de Oxígeno;
 - (b) un aumento de la cantidad de deformación;
 - (c) un aumento de la temperatura de deformación;
 - (d) la presencia de plomo alrededor de las inclusiones.
- 3.- Las condiciones de procesamiento, es decir temperatura y deformación, determinan la forma final de los sulfuros y por consiguiente las propiedades de tenacidad, maquinabilidad, etc.
- 4.- La inhomogeneidad de la deformación y la ocurrencia o no de recristalización durante la deformación interfieren con el resultado de las mediciones.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por el Instituto Argentino de Siderurgia y por el Programa Multinacional de Metalurgia de OEA y a la empresa Altos Hornos Zapla por la provisión del material utilizado.

APENDICE

I. MÉTALOGRAFIA CUANTITATIVA

La metalografía cuantitativa se realiza en un aparato cuantimétrico Quantimet modelo B, barriéndose probetas pulidas metalográficamente, en sentido longitudinal o transversal, según la determinación a efectuar.

I.1 Fracción en volumen

Para el caso de la fracción en volumen se aplican las ecuaciones básicas de la estereología (4) (6), entre ellas:

$$\frac{\sum A_i}{\sum A_t} = \frac{V_i}{V_t} = F_v$$

donde A representa el área, V el volumen, F_v la fracción en volumen. i y t el área total de inclusiones y el área total examinada respectivamente.

Sobre la pantalla del Quantimet el aumento observado es de X 1000 y se cuentan las inclusiones de 100 campos por probeta, llegando a medirse alrededor de 5000 inclusiones por calidad de acero estudiado.

La distribución de fracción en volumen de inclusiones en los aceros arrojan una desviación de muestreo $\sigma(x) = 0.5\%$, donde

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{\sum (x_i - x)^2}{N - 1}}$$

siendo x: fracción de volumen y N: números de campos por muestra. Este valor indica la amplitud de la distribución. La desviación típica del valor medio $\sigma(\bar{x}) = \frac{\sigma(x)}{\sqrt{N}}$

I.2 Longitud proyectada

La determinación de la longitud proyectada de las inclusiones es realizada en sección longitudinal con microscopios ópticos Reitcher y ocular micrométrico a X 500 aumentos. Se miden aproximadamente 300 inclusiones por tipo de acero.

I.3 Factor de forma

Para la medición del factor de forma, o sea la relación entre la longitud y el ancho máximo de cada inclusión, se aplica el método expuesto por L. Van Vlack (5), según el cual se elimina el error humano de selección y permite errores de origen estadístico únicamente. Se barre toda la sección longitudinal de la probeta, midiendo 50 inclusiones en cada muestra.

El método consiste en mover la platina del microscopio una distancia predeterminada hacia adelante sin observación. Luego, con observación, la muestra se mueve hacia la próxima inclusión y esa inclusión se mide. Este procedimiento vuelve a repetirse de la misma manera para cada observación. El incremento de distancia se elige de modo que sea examinada toda la probeta.

El valor del factor de forma obtenido es el promedio de por lo menos 25 inclusiones elegidas al azar a través de la muestra.

I.4 Plasticidad de las inclusiones

Esta propiedad básica de las inclusiones está definida por la relación de la deformación de la inclusión respecto a la del acero.

$$\nu = \frac{\epsilon_{\text{inclusión}}}{\epsilon_{\text{acero}}} \quad (1)$$

Mediante el laminado en caliente de barras se puede demostrar, según Pickering, que si se efectúa una reducción en sección transver-

sal de x_1 a x_2 y la relación longitud/ancho de la inclusión está dada por b/a , es posible expresar que:

$$\lambda = \frac{b}{a} = \left(\frac{x_1}{x_2} \right)^{3/2} \quad (2)$$

siendo λ la deformación de la inclusión.

También puede expresarse la deformación de las inclusiones y del acero usando la expresión de la elongación verdadera o natural, definida por Hencky (8):

$$\mathcal{E} = \int_{l_0}^{l_1} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_1}{l_0}$$

donde l_0 es la longitud inicial y l_1 la longitud después de la deformación.

Suponiendo que no hay cambio de volumen durante la laminación, es decir:

$$F_0 l_0 = F_1 l_1 \quad (3)$$

donde F_0 es la sección inicial y F_1 la sección después de la deformación, la elongación verdadera para el acero puede expresarse como:

$$\mathcal{E}_s = \ln \frac{F_0}{F_1} = \ln h \quad (4)$$

y para inclusiones en forma de elipses con el eje b en dirección de la elongación es:

$$\mathcal{E}_i = \int_{b_0}^{b_1} \frac{db}{b} = \ln \frac{b_1}{b_0} \quad (5)$$

suponiendo que el volumen de la inclusión es:

$$V = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^2 \frac{b}{2} \quad (6)$$

y que no cambia durante la deformación, se obtiene introduciendo

$a = \frac{b}{\lambda}$ y despejando el valor de b de (6)

$$b = \sqrt[3]{\frac{6V\lambda^2}{\pi}} = c \lambda^{2/3} \quad (7)$$

substituyendo (7) en la ecuación (5) resulta:

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \ln \frac{\lambda_i}{\lambda_0} \quad (8)$$

En estado as-cast: ($a_0 = b_0$) luego $\lambda_0 = 1$ por lo tanto

$$\varepsilon_i = \frac{2}{3} \ln \lambda_i \quad (9)$$

comparando el alargamiento de las inclusiones con el del acero se obtiene el índice de plasticidad o de deformabilidad expresado por (9):

$$\bar{v} = \frac{\varepsilon_i}{\varepsilon_s} = \frac{2}{3} \ln \frac{\lambda}{h} = \frac{2}{3} \frac{\log \lambda}{\log h} \quad (10)$$

El empleo de $\log \lambda$ en lugar de λ tiene la ventaja de que en análisis estadísticos se obtienen distribuciones más normales.

Maunder y Charles (10) modificaron la fórmula anterior considerando que la deformación sea plana de la siguiente manera:

$$\bar{v} = \frac{1}{2} \frac{\log \lambda}{\log h} \quad (11)$$

El estudio de la plasticidad de las inclusiones se focaliza principalmente en las inclusiones de sulfuros dado que se comportan plásticamente a todas las temperaturas de deformación.

De la ecuación (10) se deduce que cuando $\bar{V} = 1$, las inclusiones son muy plásticas, se deforman igual que el acero, mientras que $\bar{V}=0$ indica que no son plásticas, es decir que no cambian su forma bajo el efecto de la deformación.

Los valores experimentales del índice de plasticidad vs. grado de deformación, Fig. 8, se ajustan a una recta por el método de cuadrados mínimos.

BIBLIOGRAFIA

- 1 C.E. SIMS, Transactions of AIME, vol. 215, Junio 1959, p. 367.
- 2 ASTM Metals Handbook. ASTM USA 1948. Ed.
- 3 ASTM Standard Designation E45, 126, 1963.
- 4 T. ALLMAND y D.S. COLEMAN, Metals and Materials, 5, 325, 1971.
- 5 L.H. VAN VLACK, Transactions of the ASM, Vol. 45, 1953, p. 742.
- 6 E.E. UNDERWOOD, The mathematical foundations of quantitative stereology, ASTM, 1972.
- 7 F.B. PICKERING, JISI Junio 1958, p. 148.
- 8 M. REINER, Theoretical rheology, 1958, Warsaw.
- 9 T. MALKIEWICZ y S. RUDNIK, JISI, Enero 1963, vol. 201, p. 33.
- 10 P.J.H. MAUNDER y J.A. CHARLES, JISI, Julio 1968, p. 705.
- 11 S. RUDNIK, JISI, Abril 1966, p. 374.
- 12 T.J. BAKER y J.A. CHARLES, JISI, Septiembre 1972, p. 702.
- 13 E. ROZOVSKY y colab., Trans. AIME vol. 4, Abril 1973, p. 927.
- 14 T.J. BAKER y J.A. CHARLES, JISI Septiembre 1972, p. 680.

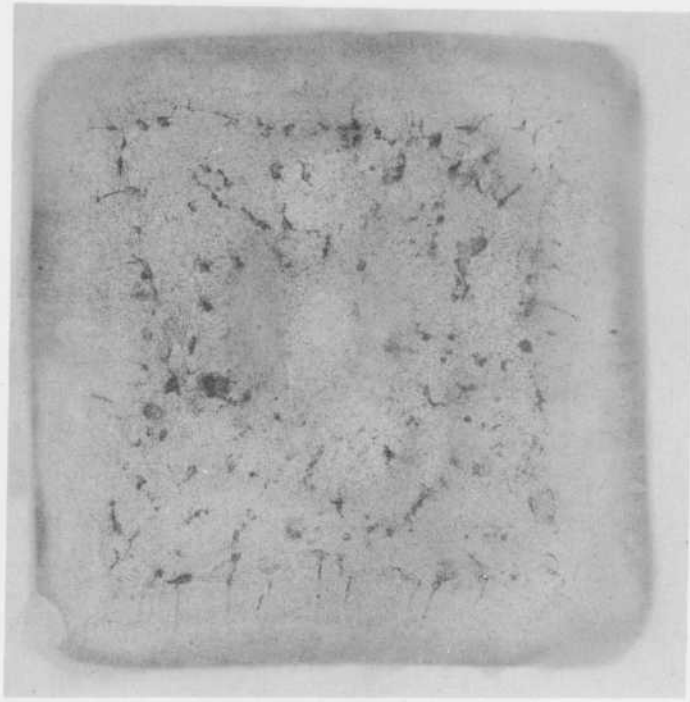


Fig. 1. Acero SAE 1112

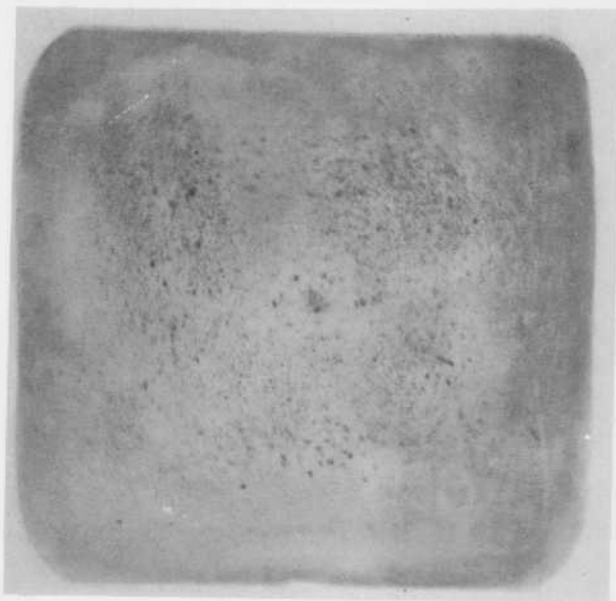


Fig. 2. Acero SAE 1212

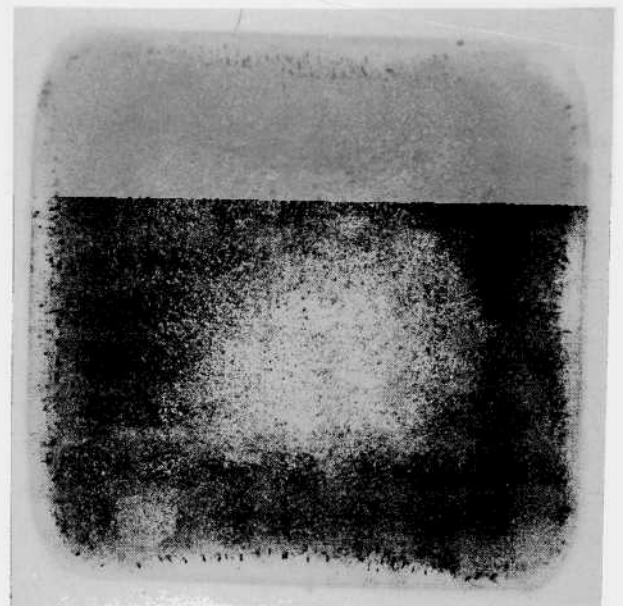
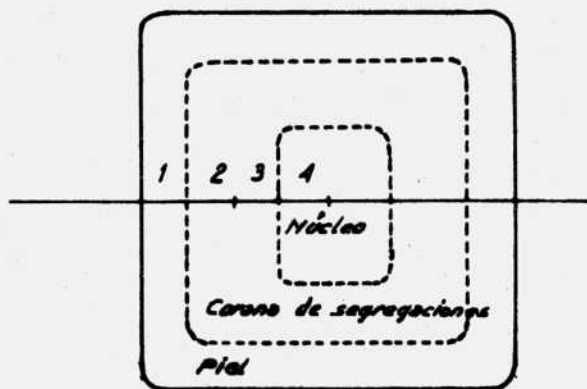
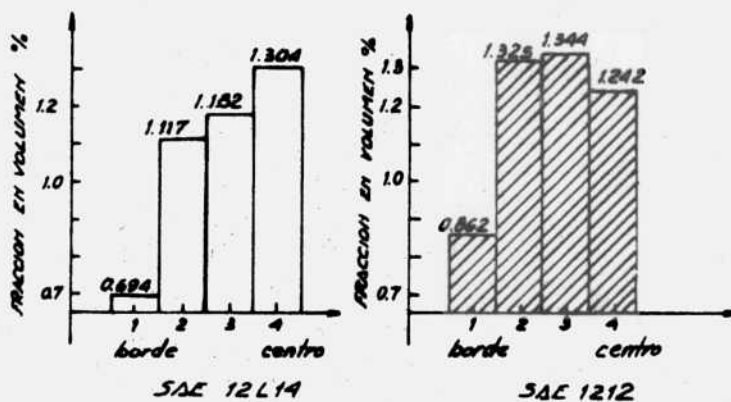
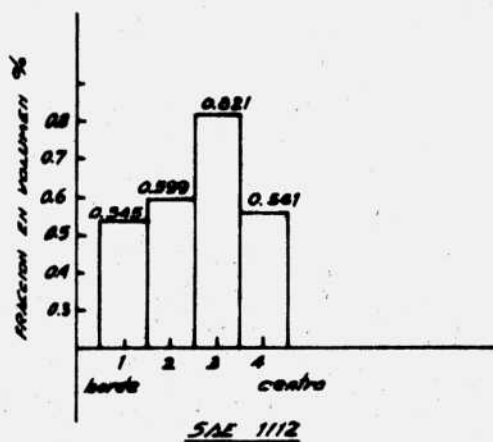


Fig. 3. Acero SAE 12L14

Distribución de azufre



(a)



(b)

Fig. 4. Distribución de inclusiones.

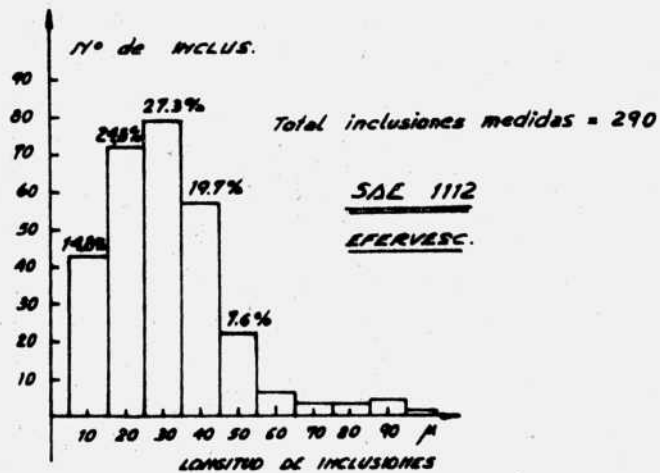
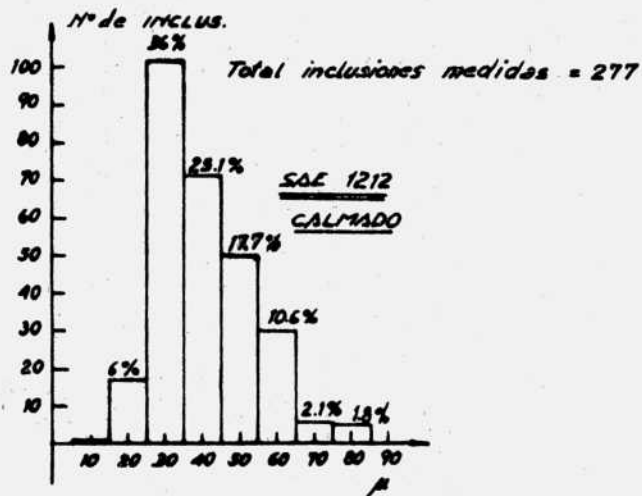
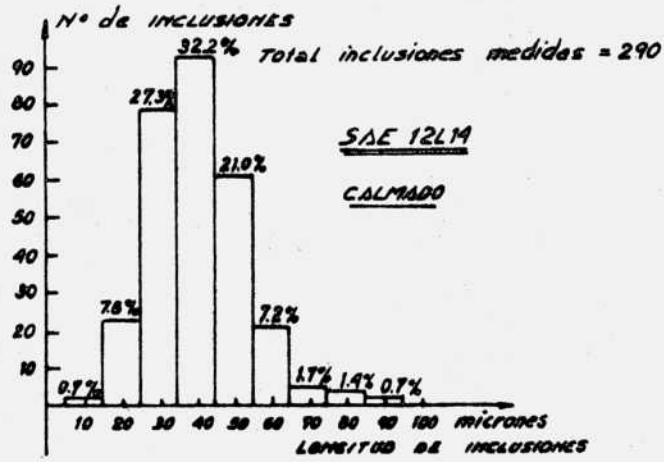


Fig. 5. Tamaño de inclusiones.

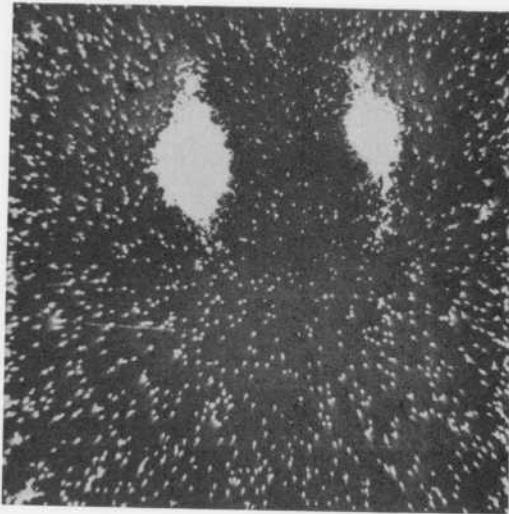


Imagen "X" S, $K_{\alpha 1}$

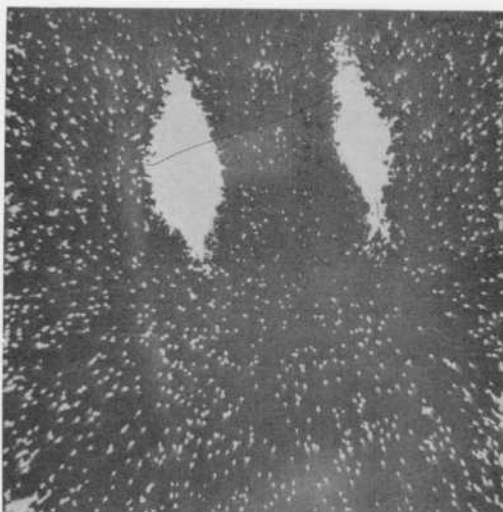


Imagen "X" Mn, $K_{\alpha 1}$

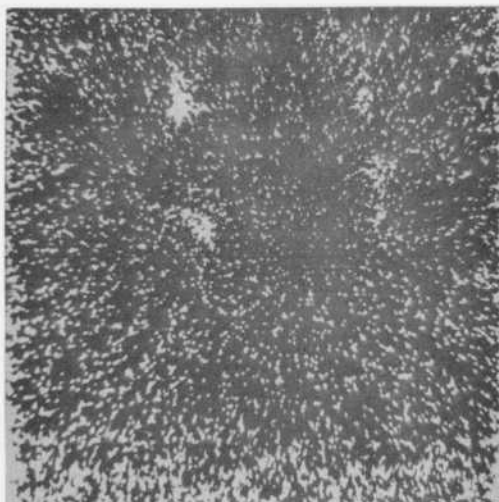


Imagen "X" Si, $K_{\alpha 1}$

Fig. 6. Imágenes electrónicas de inclusiones

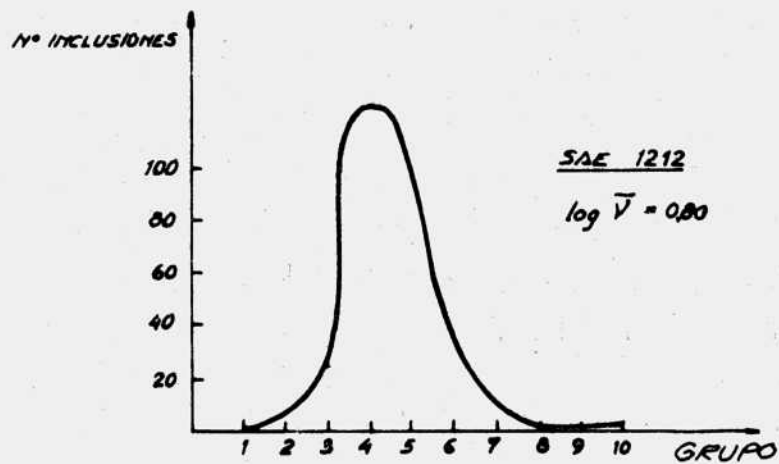
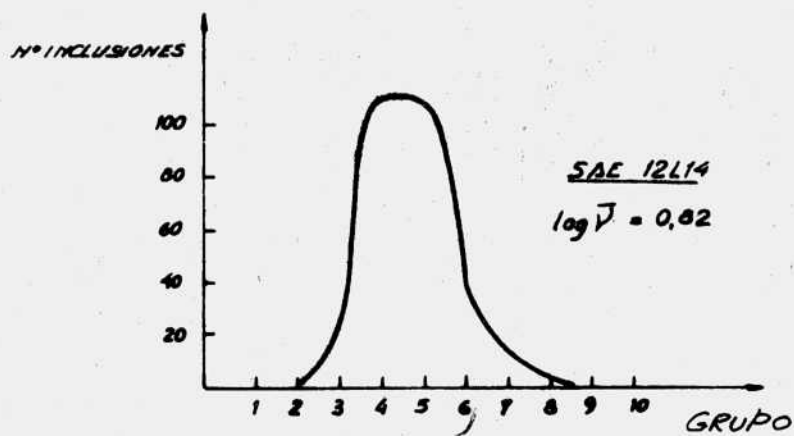
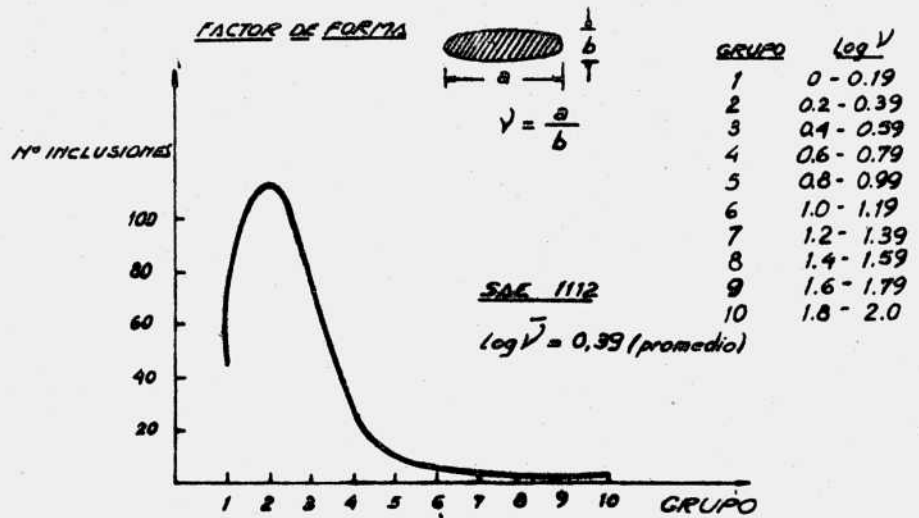


FIGURA N° 7

Factor de forma de inclusiones

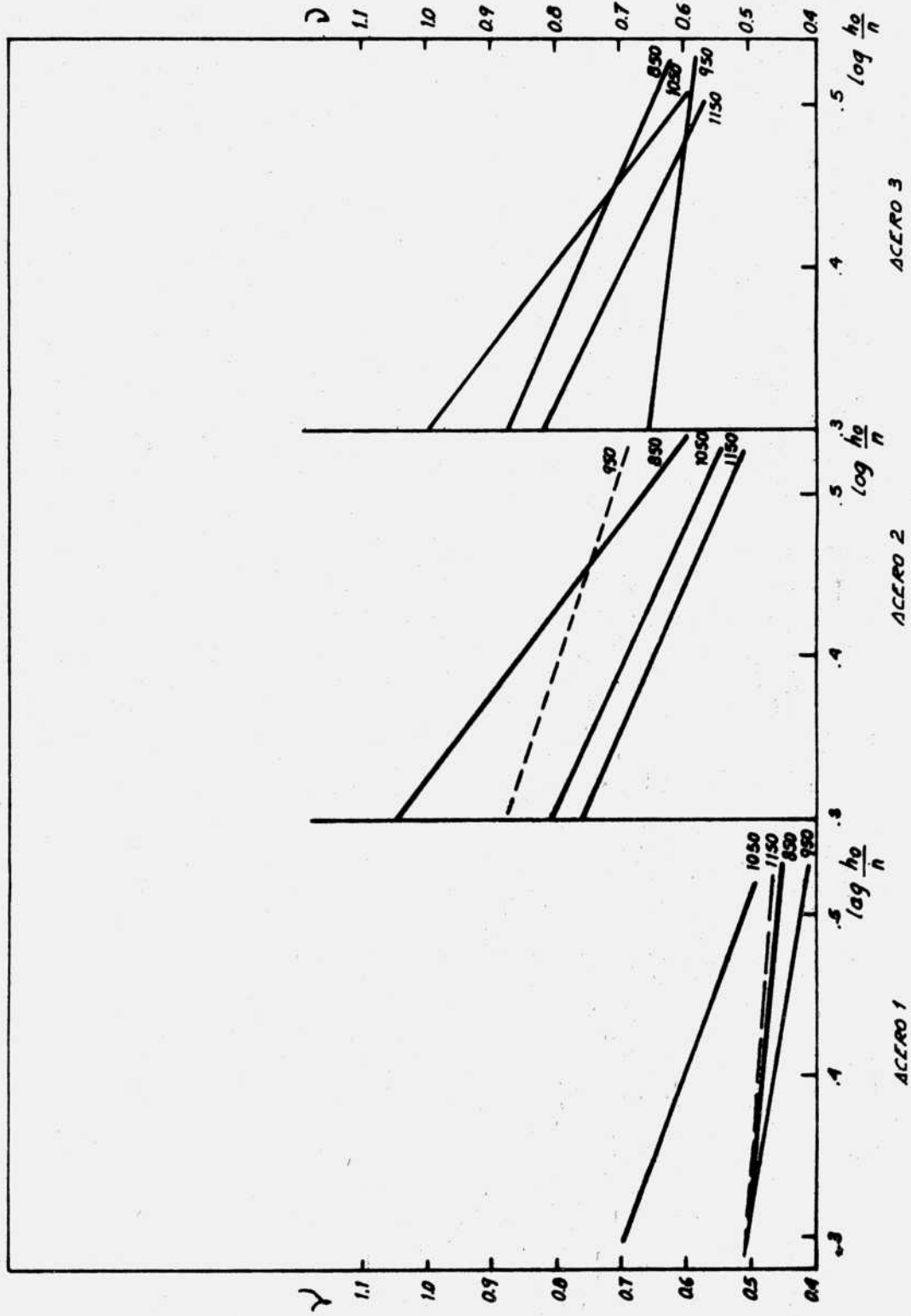


FIGURA N° 8
Relación entre plasticidad relativa y cantidad de deformación.

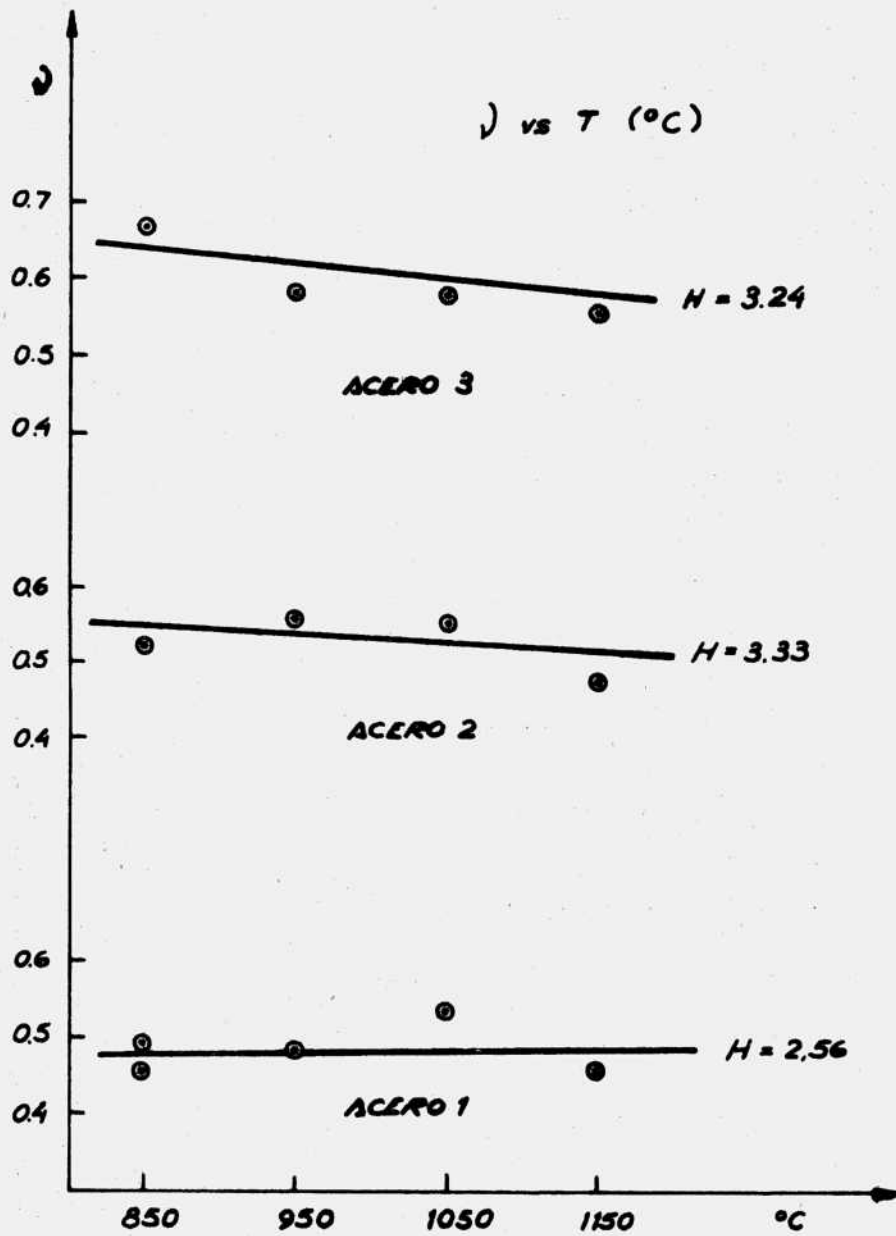


FIGURA N^o 9

Relación entre plasticidad relativa y temperatura de deformación.

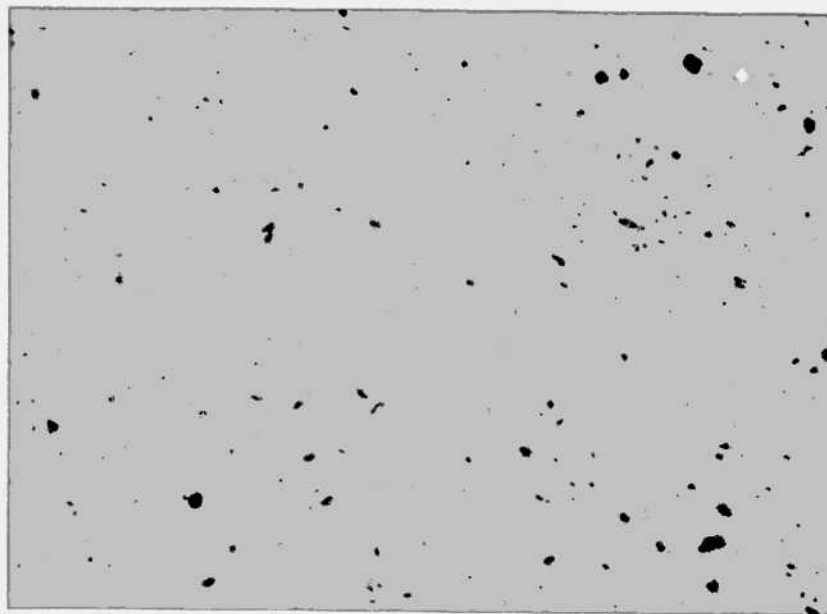


Fig. 10. Acero SAE 12L14. Sección transversal. 200X.

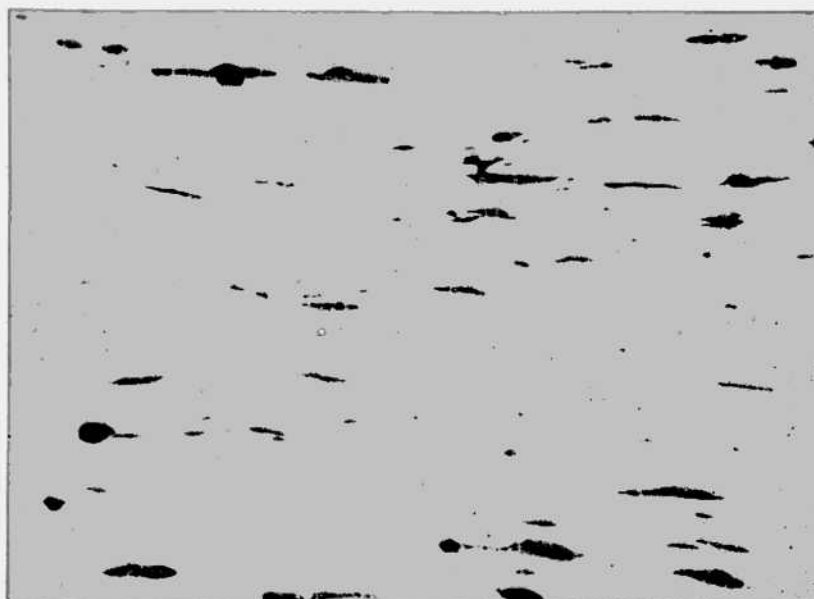


Fig. 11. Acero SAE 12L14. Sección longitudinal. 200X.

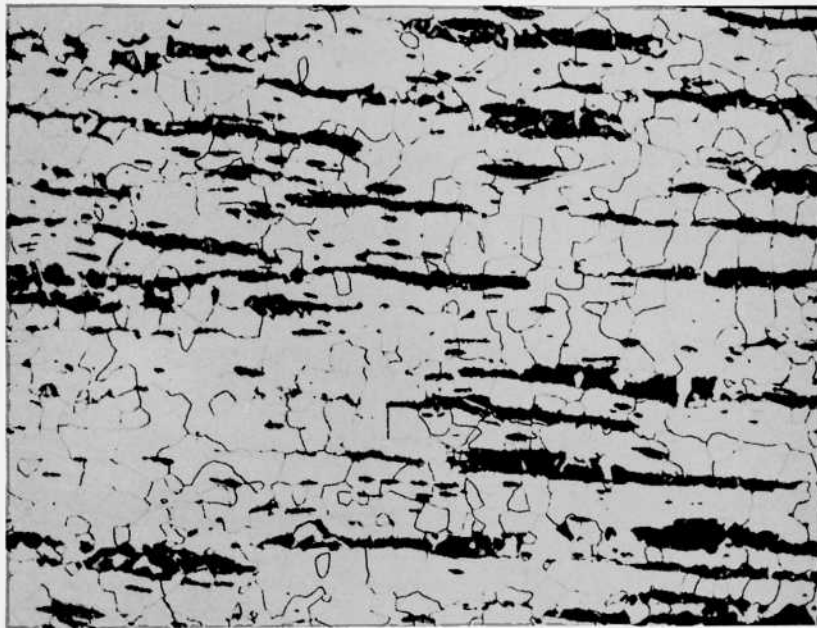


Fig. 12. Microestructura Acero SAE 12L14. Sección longitudinal. Nital 2%, 100X.