

04.72.03

TE 18/85

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

GERENCIA DE TECNOLOGIA

ANALISIS DE DEFECTOS EN TUBOS DE ACERO CON COSTURA

M SARRATE, L. DE VEDIA Y L. VELO

Para ser presentado a las V JORNADAS METALURGICAS de la S.A.M., setiembre 1972

BUENOS AIRES
1972

TE 18/85

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

ANALISIS DE DEFECTOS EN TUBOS DE ACERO CON COSTURA

M. SARRATE, L. DE VEDIA Y L. VELO

Para ser presentado a las V JORNADAS METALURGICAS de la S.A.M. , setiembre 1972

BUENOS AIRES
1972

"ANÁLISIS DE DEFECTOS EN TUBOS DE ACERO

CON COSTURA"

**Ing. Mariano Sarrate - Ing. Luis de Vedia
Ing. Luis Velo**

**Comisión Nacional de Energía Atómica. Bs.As.
República Argentina**

(Servicio de Asistencia Técnica a la Industria)

**Presentado en las
V Jornadas
Metalúrgicas
de la SAM**

INTRODUCCION

Con motivo de consultas realizadas al S.A.T.I.* referentes a defectos detectados por ultrasonido en tubos de acero soldados a tope por forja con calentamiento por resistencia eléctrica, se realizó una evaluación del origen de los mismos.

Mediante microsonda electrónica es posible analizar su procedencia. Se encuentran defectos cuyo origen es del material y otros que corresponden al proceso de soldadura.

Se analizó la peligrosidad de los defectos mediante mecánica de fractura.

La fabricación industrial de tubos de acero con costura se realiza por:

- a) soldadura por arco sumergido.
- b) costura por forja con calentamiento por resistencia.

El primero consiste en la realización de una costura longitudinal mediante arco eléctrico y material de aporte en forma de alambre. El arco se establece bajo un manto de escoria que sirve para proveer una protección adecuada contra los gases de la atmósfera, actuar como vehículo de los elementos de aleación y como fundente.

El segundo método consiste en realizar la costura longitudinal logrando la unión por forja de los bordes de la chapa cilindrada. Para ello es necesario llevar a una temperatura adecuada dichos bordes, lo que se consigue haciendo circular una elevada intensidad de corriente por los mismos. Esto se realiza empleando corriente de alta o baja frecuencia, presentando uno y otro método las siguientes variantes:

- Soldadura mediante contactos deslizantes.-

Tal como muestra la fig. 1 la corriente es introducida en el cilindro por medio de contactos deslizantes que se ubican en un punto próximo a los bordes y a una distancia tal de los rodillos de conformado final para lo cual no se haya completado el cierre del cilindro. La corriente cierra su circuito en la forma indicada en la fig. 1.

Llegado el material a la temperatura necesaria, se produce la forja simultáneamente con el conformado final del tubo. Las impurezas superficiales son proyectadas lateralmente junto con parte del material. Este exceso es luego eliminado por maquinado.

La corriente empleada puede ser de alta frecuencia

* Servicio de Asistencia Técnica a la Industria.

(más de 300 Kc), o de baja frecuencia (aproximadamente 10 Kc), siendo posible en este último caso, reemplazar los contactos deslizantes por electrodos rodantes. La diferencia que resulta del empleo de uno u otro método, consiste en lo siguiente: utilizando alta frecuencia, debido al efecto pelicular la corriente cierra el circuito por un camino muy cercano a los bordes. Esto trae aparejada la ventaja de que el volumen de material térmicamente afectado es muy pequeño. En cambio utilizando baja frecuencia, la zona afectada térmicamente no se encuentra tan limitada por el mencionado efecto pelicular. No obstante esto se traduce en una velocidad de enfriamiento inferior a la del caso anterior lo que disminuye la posibilidad de transformación martensítica.

- Soldadura por inducción. -

Tal como muestra la fig. 2, la corriente es inducida en el cilindro por una bobina que lo rodea. La corriente, en este caso, cierra su circuito en la forma indicada en la figura, a través de toda la superficie del tubo, en lugar de hacerlo solamente por los bordes como en el caso anterior.

Con este método puede emplearse también alta o baja frecuencia, aplicándose todo lo dicho anteriormente.

- Normalizado. -

En la práctica industrial se efectúa este tratamiento inmediatamente luego de la soldadura. Este se realiza por calentamiento mediante un inductor situado a cierta distancia de la etapa de soldadura. Esta distancia depende de la velocidad de enfriamiento y de avance del tubo, ajustándose de modo tal que el normalizado comience cuando la soldadura se ha enfriado hasta una temperatura de 450 - 550°C, siendo la temperatura final del mismo de aproximadamente 900°C. En el caso de calentamiento por baja frecuencia puede a veces prescindirse de este tratamiento.

Descripción del trabajo.

El presente trabajo se efectuó sobre 2 tipos de tubería de acero:

a) calidad X 46 (ver normas API) utilizados para conducción de fluidos, de 12" de diámetro y espesores de 8,38 mm. y 9,52 mm. Estos tubos fueron fabricados mediante el proceso de soldadura a tope por forja y empleando baja frecuencia.

b) tubería de acero 1010 de 5,5" de diámetro y espesor 5 mm. Estos tubos fueron fabricados por el mismo proceso y empleando alta frecuencia.

La evaluación consistió en el análisis de defectos presentes en las soldaduras que fueron detectados en la inspección por ultrasonido durante el control de calidad de las mismas.

Debido a las características del proceso de fabricación de estos tubos, los defectos detectados pueden atribuirse a:

- Inclusiones no metálicas (alineadas o en tamaño mayor) provenientes del material de la chapa.
- Eliminación incompleta de óxidos en las superficies a unir (esto se realiza por arenado), lo cual evidenciaría una deficiente preparación de la pieza.
- Parámetros del proceso tales como: temperatura insuficiente, presión de forja insuficiente, fisuras generadas por excesiva velocidad de enfriamiento.

Se efectuaron exámenes metalográficos y análisis con microsonda electrónica.

Las Figs. 3 a 8 corresponden micrografías de defectos observados en tubos de calidad X 46; y las 9 y 10 corresponden a la tubería de acero SAE 1010.

El examen metalográfico de las mismas indica distintos tipos de defectos. Se observa inclusiones alineadas en forma diversa y según el flujo del material durante el forjado, y fisuras que pueden haberse formado por tensiones térmicas durante el enfriamiento o por el recalado del material durante la forja.

Estas observaciones no caracterizan debidamente la naturaleza de los defectos lo que motivó el empleo de la microsonda electrónica.

Se realizó sobre c/u de las muestras los análisis mediante barrido, lográndose de esa manera la identificación de los elementos presentes en defectos. Las figuras que se presentan a continuación corresponden a las muestras y elementos que se especifican en la tabla.

Interpretación de los resultados.-

Fig. 3,4,5 y 6: Se observa un defecto que aparece en el examen metalográfico como falta de unión con 7,5 mm. de profundidad en sentido normal.

La microsonda electrónica detectó que el defecto en cuestión es una inclusión del tipo silicato orientado según el flujo del material. Las figuras 3 y 4 muestran la probeta atacada con nital 2% con diferentes aumentos; los N°s 5 y 6, el mismo defecto sobre la probeta sin atacar, en la que puede verse la zona estudiada en la microsonda. Es un caso de defecto propio de la chapa.

Fig. 7: Defecto adyacente a la zona de unión, de orientación radial. La observación metalográfica lo define como posible fisura.

La microsonda electrónica se encuentra limitada en la detección de oxígeno, y por lo tanto la confirmación de la naturaleza del defecto (fisura) se realiza por la ausencia de los elementos constitutivos de las inclusiones normales.

Fig. 8: Defecto sobre la zona de flujo adyacente a la unión, de orientación radial. Metalográficamente resulta difícil definir si se trata de una fisura o una inclusión. La microsonda electrónica detectó un sílico-aluminato y zonas con sulfuros.

Se trata por lo tanto de una inclusión, es decir de un defecto proveniente de la cappa, lo que es atribuible a una deficiencia en el proceso.

Fig. 9 y 10: Metalográficamente se observan inclusiones alineadas según el flujo de material y en las líneas de unión. El análisis con microsonda electrónica confirmó estos resultados detectando la presencia de un sílico-aluminato de Ca.

La observación metalográfica muestra un desigual flujo de material a ambos lados de la junta lo que indica también una deficiencia en el proceso.

Numeración correspondiente a las figuras de microsonda electrónica.

Muestra	Imagen electrón.	Elementos analizados					
		Si	Ca	Al	Mn	S	O
Figuras 3, 4, 5 y 6	11	12	13		14	15	16
Fig. 8	17	18	-	19	20	21	22
Figuras 9 y 10	23	24	25	26	-	-	-

Estimación por mecánica de fractura de la peligrosidad de los defectos.-

Tomaremos el caso de los tubos de material X 46 de 320 mm. de diámetro y 9,5 mm. de pared ($\sigma_y = 32 \text{ Kg/mm}^2$; $\sigma_h = 44 \text{ Kg/mm}^2$).

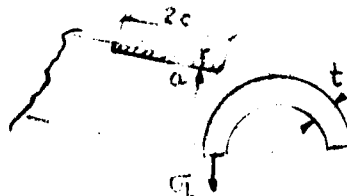
Estos tubos, de acuerdo a la norma API se prueban hidráulicamente a 160 atm, siendo presión de trabajo 80% de la de prueba.

Consideremos un defecto (una inclusión, una falla de unión, una fisura) de 2,5 mm. de profundidad y 50 mm. de longitud con orientación axial (este es el mayor tamaño de defecto observado).

$a = 2,5 \text{ mm.}$

$2c = 50 \text{ mm.}$

σ_h = tensión circunferencial



Al aplicar mecánica de fractura se supone que el defecto superficial es del tipo fisura y de geometría semi-elíptica. La tensión circunferencial σ_h tenderá a abrir el defecto y propagarlo a través del espesor de pared.

Determinación del tamaño crítico de fisura para la prueba de presión.

En primer término, y para tenerlo como un valor de referencia, calcularemos la longitud de fisura pasante que, en las condiciones del ensayo de presión, se volvería inestable provocando la rotura del tubo (supongamos que en el interior del tubo está aplicado un parche - chapa de hierro de delgado espesor-que evita pérdidas del fluido presurizante).

Veremos que criterio de mecánica de fractura usar partiendo de la base que la temperatura NDT del material (temperatura de ductilidad nula) es de $\approx 0^\circ\text{C}$ y que el ensayo de presión se realiza a temperaturas superiores a la NDT

Criterios de rotura

Los criterios de rotura para tubos presurizados son (Ref. 5)

a) Criterio de la tenacidad a la fractura.

Aplicable a materiales de tenacidad baja o media y para fisuras relativamente largas.

$$\sigma_h = \frac{K_c}{M \sqrt{\pi c \psi}} \quad (1)$$

siendo σ_h = tensión circunferencial

K_c = tenacidad a la fractura

M = factor que tiene en cuenta las tensiones adicionales debido al "abundamiento"

$2c$ = longitud de la fisura pasante

rango de aplicación

ψ = corrección por plasticidad
($\psi \geq 1$)

$$\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_Y}\right)^2 \frac{1}{c} \leq 7$$

R = radio interno

t = espesor pared

De acuerdo a los ensayos del Battelle (Ref 6) tomamos para el material X 46 mm. $K_{Ic} = 900 \text{ Kg/mm}^{3/2}$ (a temp. ambiente)

b) Criterio de la tensión de fluencia.

Está derivado del anterior, aplicable a materiales de alta tenacidad y para fisuras cortas.

$$\sigma_h = \frac{\bar{\sigma}}{M} \quad (2) \quad \bar{\sigma} = \text{tensión de fluencia} \approx \frac{1}{2} (\sigma_Y + \sigma_u)$$

rango de aplicación: $\left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_Y}\right) \frac{1}{c} \geq 7$

Veremos que criterio aplicar en nuestro caso

$$\left. \begin{array}{l} K_{Ic} = 900 \text{ Kg/mm}^{3/2} \\ \sigma_Y = 32 \text{ Kg/mm}^2 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Para fisuras pasantes con } 2C \geq 250 \text{ mm.} \\ \text{usar la expresión (1), para } 2C < 250 \text{ mm. u-} \\ \text{sar (2)} \end{array}$$

$$C = ?$$

reemplazando

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{2} (\sigma_Y + \sigma_u) = 38 \text{ Kg/mm}^2$$

$$R = 160 \text{ mm}$$

$$t = 9,5 \text{ mm}$$

$$\sigma_h = \frac{\bar{\sigma}}{(1 + 1,61 \frac{C^2}{Rt})^{1/2}}$$

$$\sigma_h = \frac{PD}{2t} = \frac{160 \text{ Kg/cm}^2 \times 32 \text{ cm}}{2 \times 0,95 \text{ cm}} = 26 \text{ Kg/mm}^2$$

reemplazando se obtiene

$$C = 35 \text{ mm.}$$

O sea que una fisura pasante de longitud $2C = 70 \text{ mm.}$ se vuelve inestable bajo las condiciones de la prueba de presión.

Si bien los controles de calidad detectarán un tubo con ese tamaño de defecto antes de la prueba final, es de interés tomarlo como valor de referencia, indicativo de la buena tenacidad del material.

Crecimiento del defecto durante el servicio.

Como ya se indicó consideraremos un defecto axial de profundidad $a = 2,5$ mm y longitud $2C = 50$ mm.

La presión máxima de trabajo es de 130 atm y durante la vida útil del tubo se tendrán variaciones de presión de 30 atmósferas.

La expresión que da la velocidad de crecimiento de un defecto es del tipo

$$\frac{da}{dn} = C_0 \Delta K^n$$

siendo $\frac{da}{dn}$ el crecimiento de fisura
por ciclo

$$\text{Siendo } \Delta K \approx \Delta \sigma \sqrt{\pi a}$$

C_0, n constantes

ΔK rango de variación del parámetro intensidad de tensiones

Integrando se llega a (7)

$$N = \frac{2}{(n-2) C_0 M^{\frac{n}{2}} \Delta \sigma^n} \left[\frac{1}{a_i^{\frac{(n-2)}{2}}} - \frac{1}{a_f^{\frac{(n-2)}{2}}} \right]$$

expresión que indica los ciclos de carga requeridos para que el defecto de profundidad a inicial crezca hasta a final

siendo N = número de ciclos para crecer al tamaño crítico
 a_i = profundidad inicial del defecto (en pulgadas)
 a_f = " final o crítica del defecto (en pulgadas)
 n, C_0 constantes
 M parámetro que tiene en cuenta la forma del defecto y la geometría del componente (Ref. 8)
 $\Delta \sigma$ rango de variación de las tensiones en miles de libras por pulgada cuadrada (Ksi)

Para la estimación del crecimiento de un defecto sometido a cargas cíclicas, por el método de mecánica de fractura se parte del supuesto que todo el ciclaje se utiliza para la propagación del defecto y que no se gastan ciclos por la iniciación.

Valores a utilizar

$$a_i = 2,5 \text{ mm}$$

$$a_f = 9,5 \text{ mm (o sea el espesor de pared del tubo)}$$

$$n = 5,8$$

$$C_0 = 0,27 \times 10^{-3} \left. \begin{array}{l} \text{constantes correspondientes a un acero} \\ \text{A 36 de } \sigma_y = 30 \text{ Kg/mm}^2 \end{array} \right\} \text{ (Ref. 9)}$$

$$M = \frac{1,2 \pi}{Q}$$

$$Q = f\left(\frac{a}{2C}\right) \approx 0,9 \quad (\text{Ref. 4})$$

$$\therefore M = 4$$

para $P = 30 \text{ atm}$, $\Delta\sigma_k = 5 \text{ Kb/mm}^2 = 7 \text{ ksi}$

reemplazando se obtiene $N = 8 \times 10^7$ ciclos.

Esta es la cantidad de ciclos (con $\Delta P = 30 \text{ atm}$) para que un defecto de 2,5 mm. de profundidad (y 50 mm. de largo) crezca hasta atravesar el espesor de pared.

Este crecimiento es debido a tensiones cíclicas, no se consideraron efectos ambientales.

Si las variaciones de presión que tendrá la tubería en su vida en servicio es apreciablemente inferior a 8×10^7 ciclos (excluyendo factores ambientales y trabajando por sobre la temperatura NDT) sería posible emplear el tubo con el defecto analizado.

Esta conclusión proviene de la aplicación de mecánica de fractura en la evaluación de la peligrosidad de defectos pero no debe olvidarse que aplicando las normas API el tubo con dicho defecto es rechazable.

Esto que aparece como contradictorio es un área de trabajo que algunos autores han comenzado a explorar, (Ref. 10) sugiriendo que la especificación de defectos permisibles deberán ser preparados conjuntamente por las personas que fabrican, controlan calidad e inspeccionan y por los investigadores.

Conclusiones

En esta evaluación del origen de defectos en tubos soldados a tope por resistencia ha resultado de utilidad la información brindada por la microsonda.

Algunos de dichos defectos son de fácil identificación al microscopio óptico, pero existe un gran porcentaje de los mismos que introducen dudas. Es en ellos que la microsonda electrónica permite concluir si se debe a un defecto de proceso o de material.

Los defectos observados son de reducidas dimensiones. Para el caso de los tubos de calidad X 46 con 9,5 mm de espesor de pared, el promedio de defectos estaba en 1,5 mm de profundidad. El mayor encontrado fue de 2,5 mm de profundidad. Aplicando las normas API con inspección ultrasónica, éstos defectos resultan rechazables.

Se empleó el defecto mayor encontrado para estimar la peligrosidad del mismo durante la prueba de presión, y su crecimiento durante la vida en servicio.

Se encuentra que durante la prueba de presión, el crecimiento del defecto superficial es insignificante, y que el tipo y tamaño crítico de defecto sería una fisura pasante de 70 mm de longitud.

En cuanto al crecimiento del defecto superficial duran-

te la vida en servicio, se encuentra que bajo variaciones de presión de 30 atm, se requieren 8×10^7 ciclos para que el defecto crezca hasta atravesar el espesor de pared, produciendo pérdidas (pero no rotura).

Para ésta estimación se ha considerado que la temperatura de trabajo del material está siempre por encima de la temperatura NDT y que no existen efectos del medio ambiente.

Vemos que aplicando mecánica de fractura, se puede estimar un período de vida útil del tubo, en determinadas condiciones de trabajo.

REFERENCIAS

- 1.- "API Specification for High-Test Line Pipe" American Petroleum Institute, Dallas, Texas.
- 2.- "Improvements in electric resistance welded X 60 line pipe technology". A.H.Aronson, M.Korchynsky, J.L.Mihelich. Nov. 1969, vol 48, p. 473s-478s.
- 3.- "Fabrication des tubes d'acier soudés longitudinalement de diamètres moyennes" H.Bouchon, J.Morat, L.Vyers. Soudage et techniques connexes, vol 25, n° 5/6, may-juin 1971, p181-199.
- 4.- "Welding Handbook" American Welding Society, New York.
- 5.- "Criteria for crack extension in cylindrical pressure vessels". G.T.Hahn, M.Sarrate, A. Rosenfield. International Journal of Fracture Mechanics, vol 5 n° 3 1969
- 6.- "Recent work on flaw behavior in Pressure Vessels". A.R. Duffy, E.J.Eiber, W.A.Maxey. Practical Fracture Mechanics for Structural steel. p.M3. 1969
- 7.- "Fracture Mechanics Technology applied to heavy section steel structures" E.T.Wessel, W.G.Clark, W.H.Pryle, Fracture 1969, p. 825
- 8.- "Fatigue crack propagation in steel weldments" F.Y.Lawrence, W.H.Munse. SAE Paper n° 720267, año 1972
- 9.- "Applied Fracture Mechanics" C.F.Tiffany, J.N.Masters. ASTM STP 381, p. 249, 1965
- 10.- "The specification of permissible defect sizes in welded metal structures" A.A.Wells, Fracture 1969 Proceedings de la segunda conferencia internacional de Fractura, Brighton, Inglaterra 1969

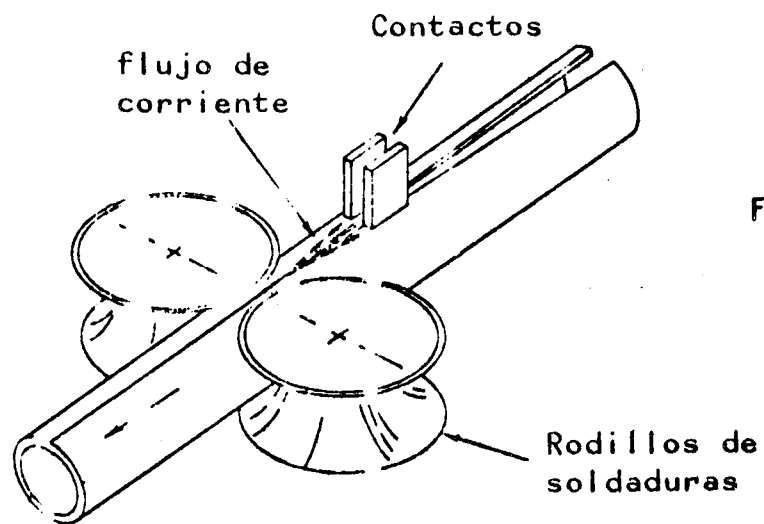


Fig 1

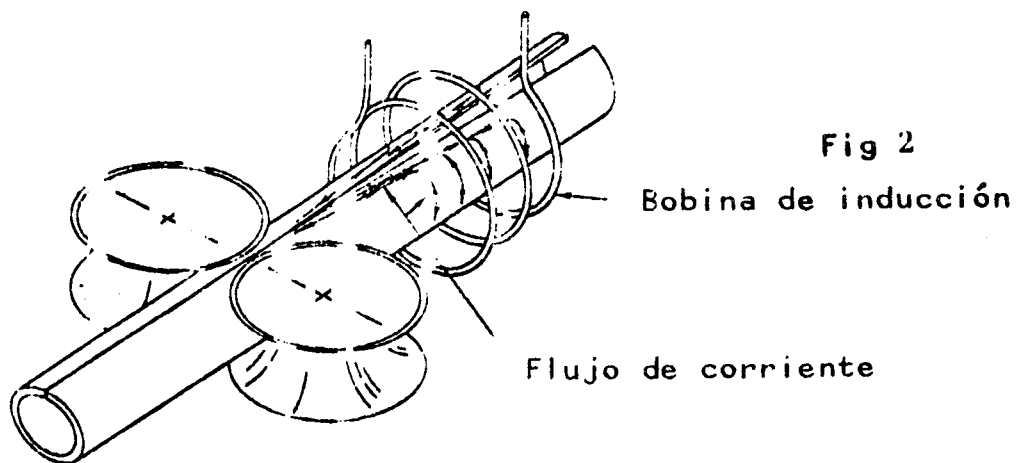


Fig 2

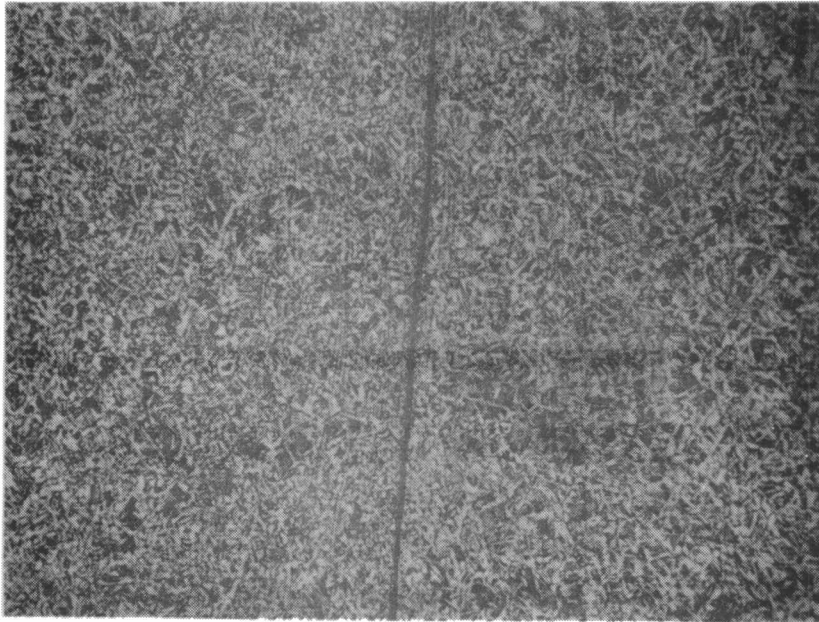


Fig. 3

100 X

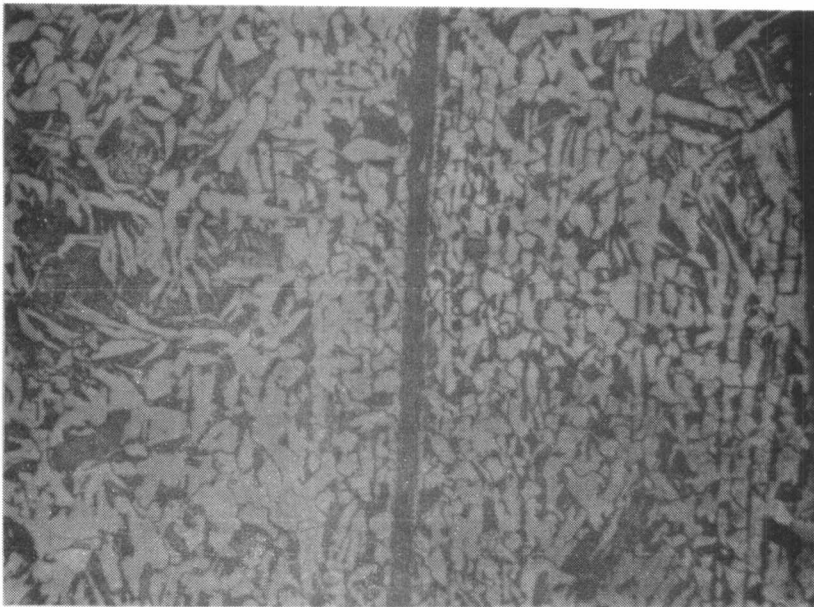
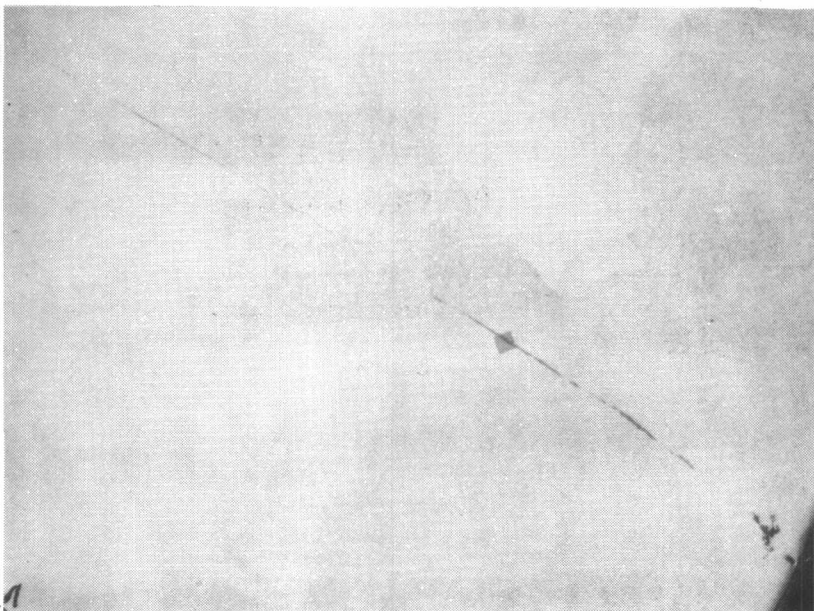


Fig. 4

400 X



sup. exterior
del tubo

Fig. 5

23 X

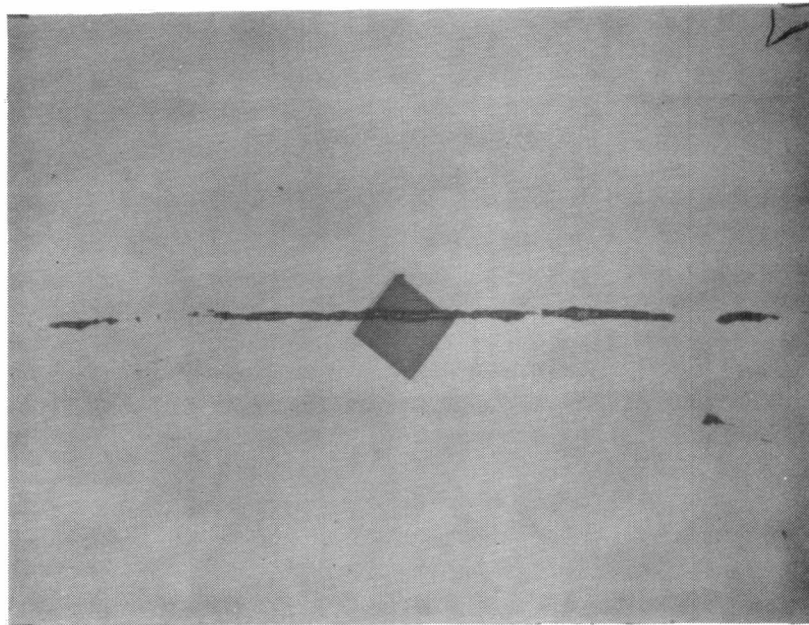


Fig. 6

96 X

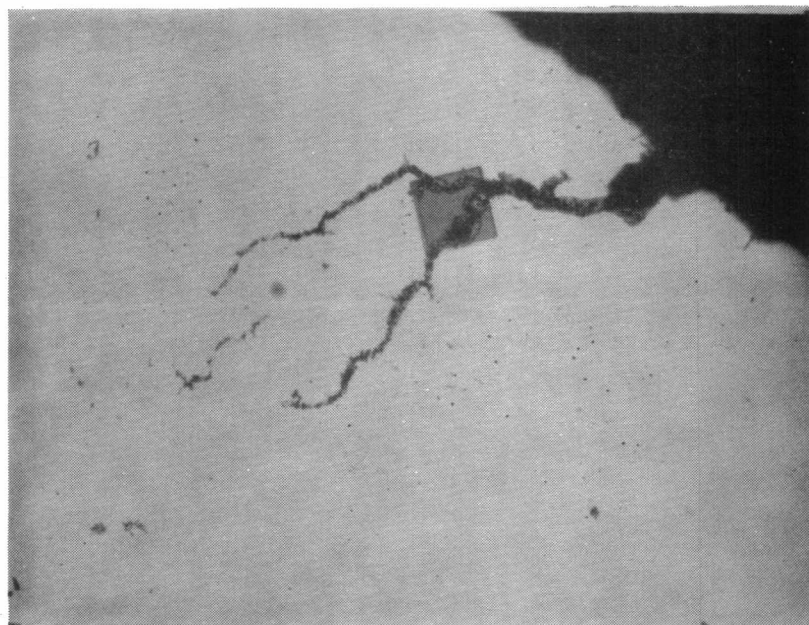


Fig. 7

96 X

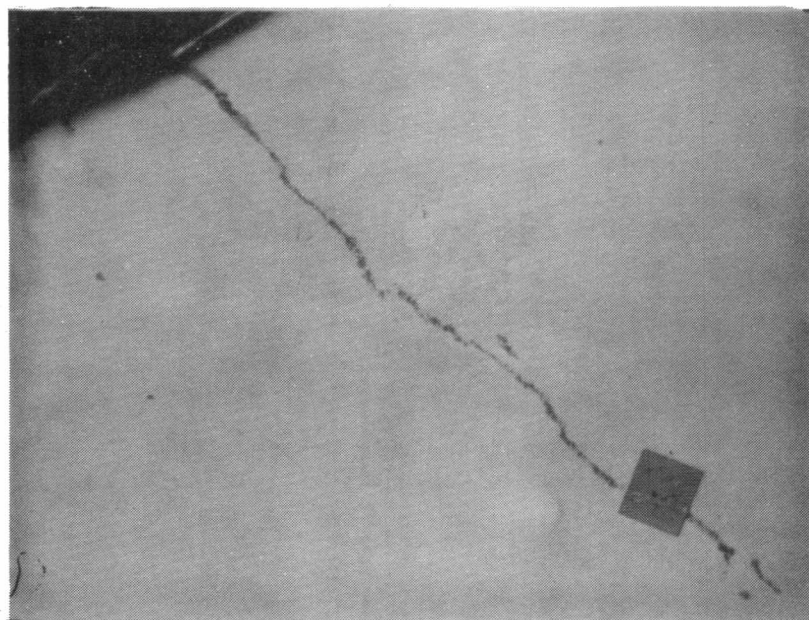


Fig. 8

96 X

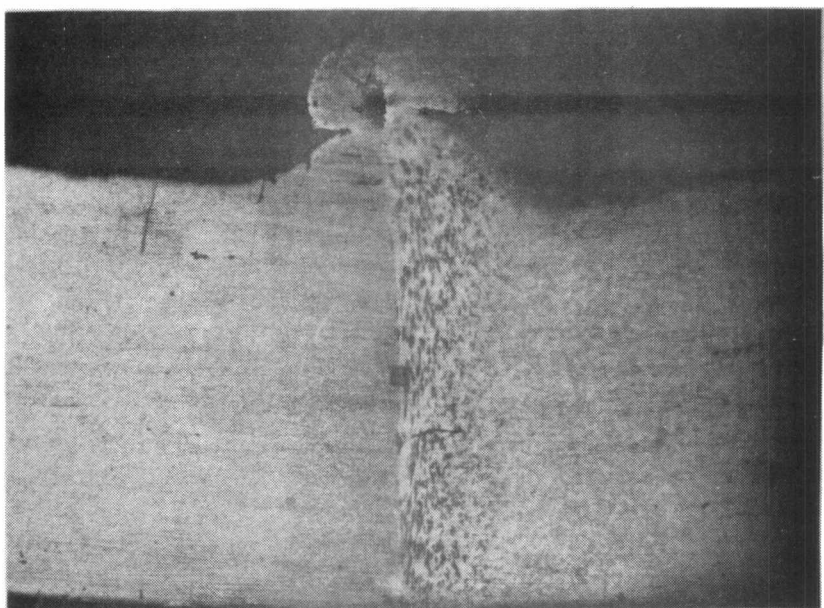


Fig. 9

11 X

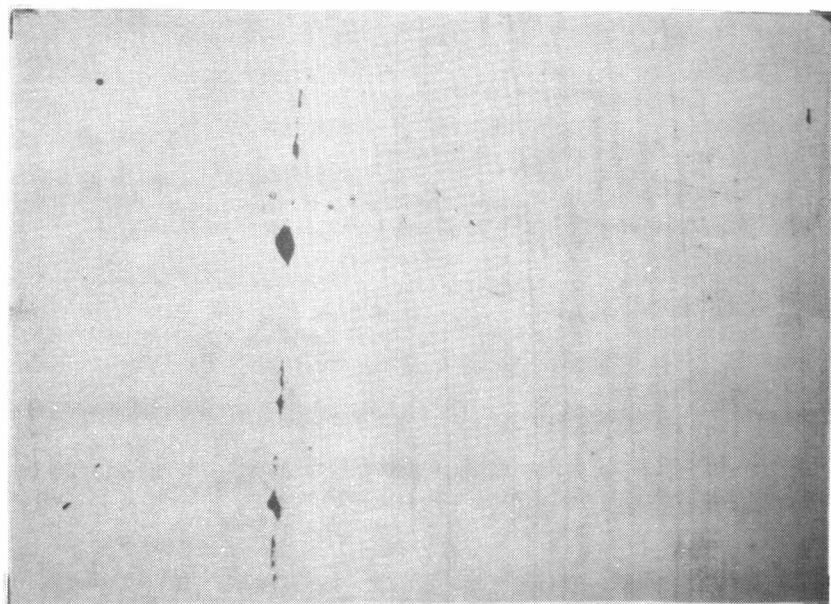


Fig. 10

15 X

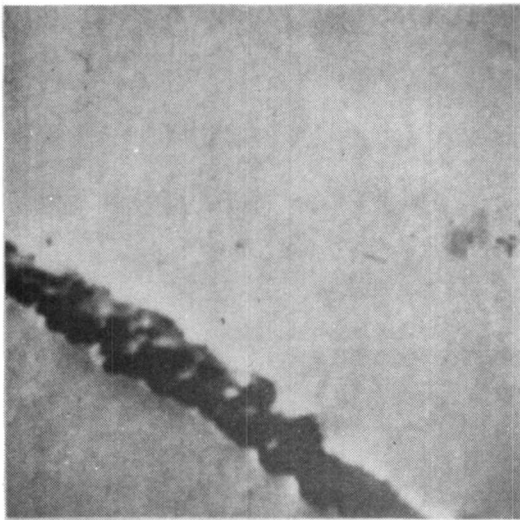


Fig. 11. Muestra: Fig. 3
Imagen electrónica. 100X100 μ

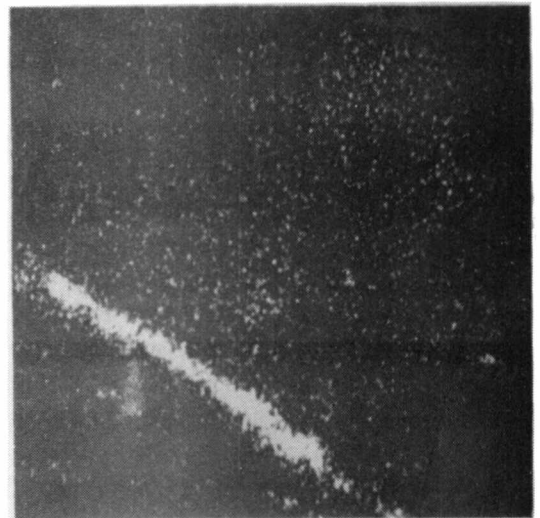


Fig. 12. Misma zona. Imagen X
Si $K\alpha_1$ 100 X 100 μ

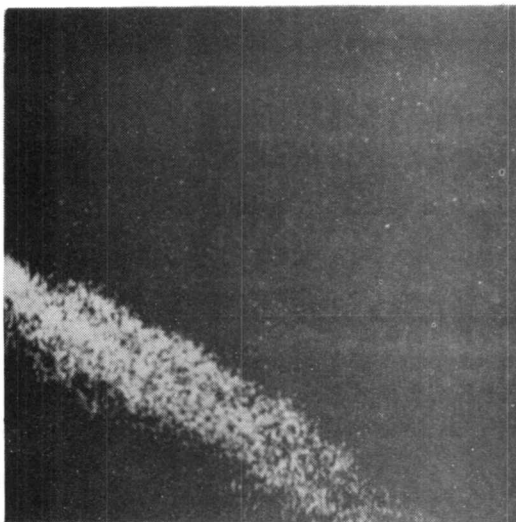


Fig. 13. Misma zona. Imagen X.
Ca $K\alpha_1$ 100 X 100 μ

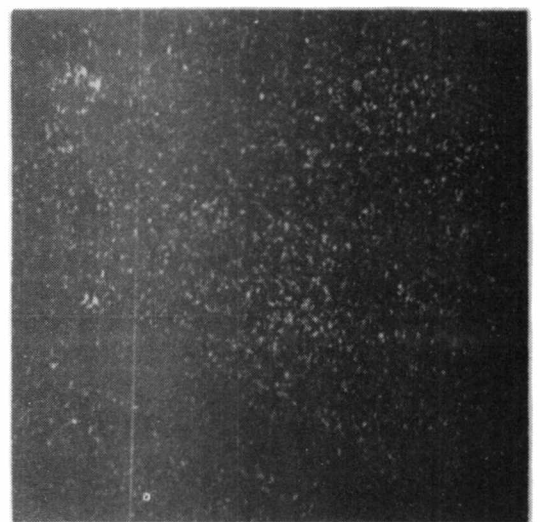


Fig. 14. Misma zona. Imagen X
Mn $K\alpha_1$ 100 X 100 μ

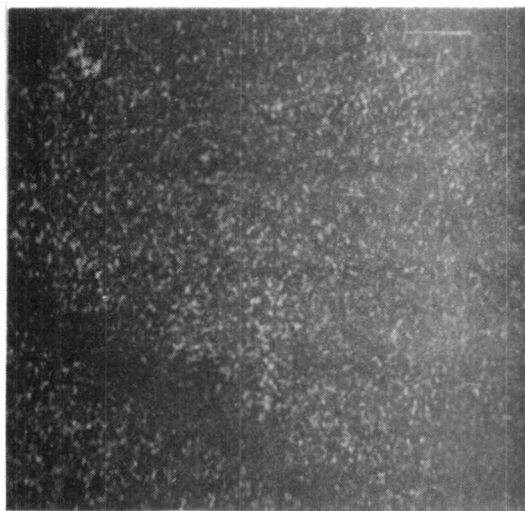


Fig. 15. Misma zona. Imagen X
S $K\alpha_1$ 100 X 100 μ



Fig. 16. Misma zona. Imagen X
O $K\alpha_1$ 100 X 100 μ

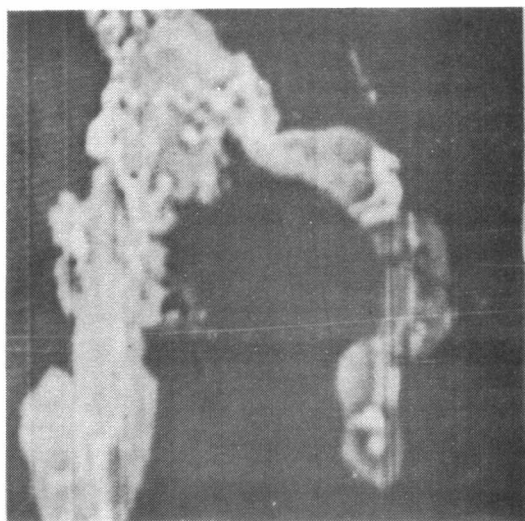


Fig. 17. Muestra: Fig. 8
Imagen electrónica 100X100 μ

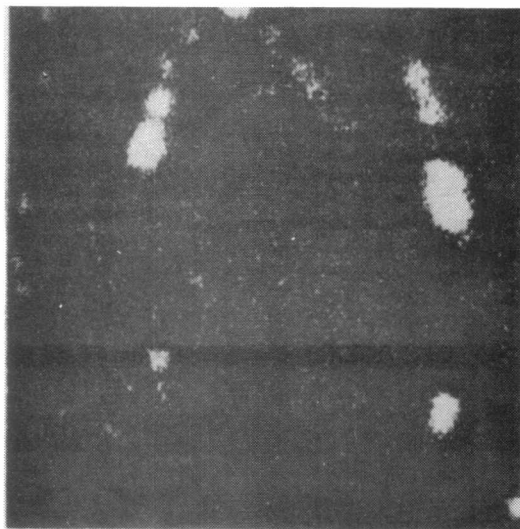


Fig. 18. Misma zona. Imagen X
Si $K_{\alpha 1}$ 100 X 100 μ

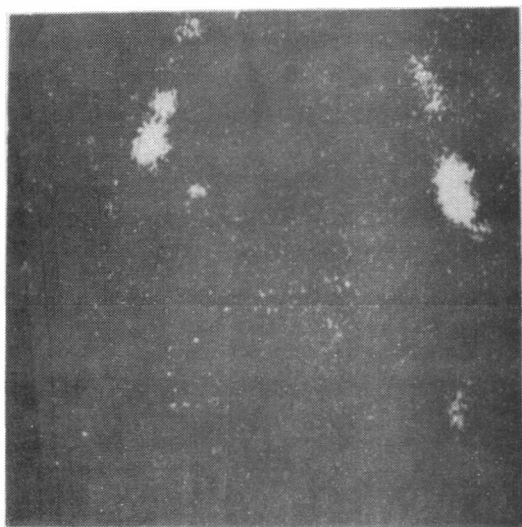


Fig. 19. Misma zona. Imagen X
Al $K_{\alpha 1}$ 100 X 100 μ

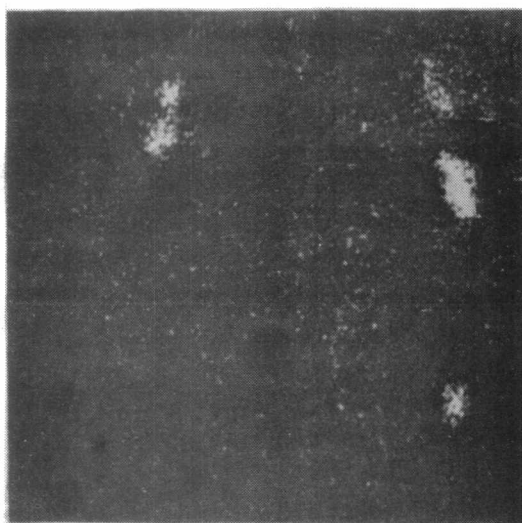


Fig. 20 Misma zona. Imagen X.
Mn $K_{\alpha 1}$ 100 X 100 μ

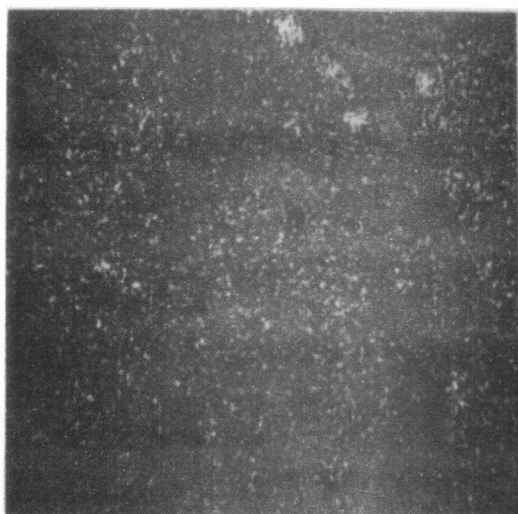


Fig. 21. Misma zona. Imagen X
S $K_{\alpha 1}$ 100 X 100 μ

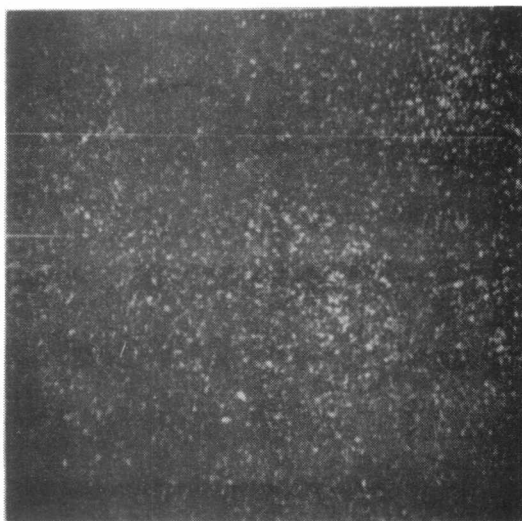


Fig. 22. Misma zona. Imagen X
O $K_{\alpha 1}$ 100 X 100 μ



Fig. 23. Muestra: Fig. 9
Imagen electrónica 200 X 200 μ

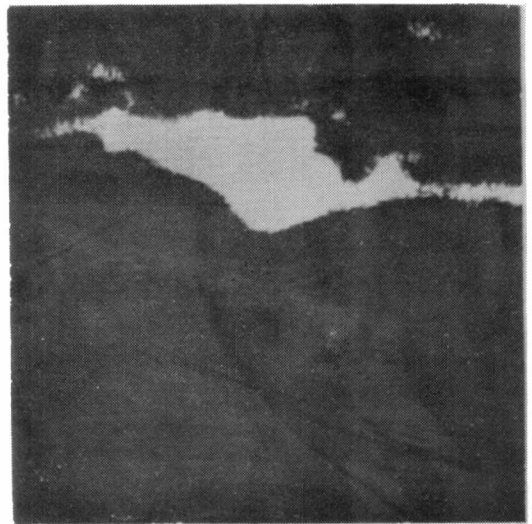


Fig. 24. Misma zona. Imagen X
Si $K\alpha_1$ 200 X 200 μ

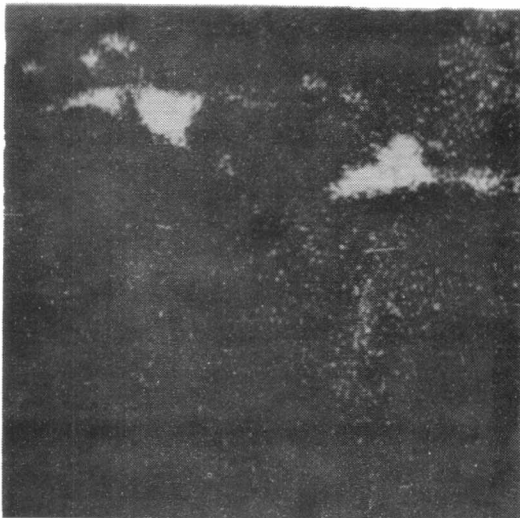


Fig. 25. Misma zona. Imagen X
Ca $K\alpha_1$ 200 X 200 μ

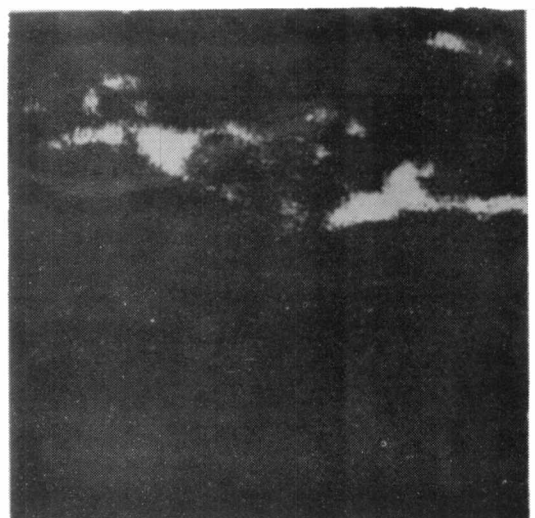


Fig. 26. Misma zona. Imagen X.
Al $K\alpha_1$ 200 X 200 μ