

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 3	Año 1975

08.75.06

CNEA-NT 6/75
PMM/I-185

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

Area Combustibles Nucleares

BRAZING DE TERMOCUPLAS PASANTES A TAPONES
PARA DISPOSITIVOS DE IRRADIACION

H.W.Kerr*, D.F.Pedraza**, C.Andreone**, J.Zvinys+, O.D.Herrero+

Proyecto PNUD 72/019: "Tecnología de Cápsulas de Irradiación"

*Department of Mechanical Engineering, University of Waterloo,
Ontario, Canada

**Departamento de Metalurgia, Area Investigación, Desarrollo y
Servicios, CNEA

+Departamento de Combustibles Nucleares, Area Combustibles
Nucleares, CNEA

Buenos Aires-Argentina
Agosto 1975

INTRODUCCION

La tecnología de dispositivos experimentales para ensayos de irradiación de materiales nucleares presenta problemas serios de diseño y de fabricación para garantizar un servicio contra riesgos nucleares.

El diseño impone a menudo la necesidad de utilizar metales especiales -o materiales refractarios- para la construcción de los dispositivos, y la medición de las variables de interés -temperatura, dilatación, presión de gases de fisión, flujos neutrónicos y térmicos- exige la incorporación de detectores diversos.

La fabricación y el montaje de los componentes requiere entonces el empleo de técnicas no convencionales. Entre éstas, el proceso de soldadura denominado brazing es el más adecuado para la fijación de termocuplas envainadas a tapones de cápsulas experimentales, dado que existe una diferencia de masa considerable entre las partes a unir.

De este modo, el proyecto de realización de la primera cápsula para ensayos de irradiación de muestras combustibles no sólo tiene por objeto la prueba de materiales de elaboración propia, sino que también constituye un medio para el desarrollo de nuevos procesos técnicos y su incorporación a la CNEA.

La cápsula ARSO-01- que se muestra en la Fig 1 - ha sido diseñada según el concepto de "pared doble"; ésto es, entre la muestra a ensayar y el fluido refrigerante del reactor experimental, existen dos paredes. La probeta de combustible debe ir sumergida en eutéctico NaK (punto de fusión $T_f = -11^{\circ}\text{C}$) contenido en una cápsula interior, estanco. Esta se aloja en otra cápsula igualmente estanco - que contiene eutéctico Pb-Bi ($T_f = 125^{\circ}\text{C}$); ambas cápsulas son de acero inoxidable 304. Termocuplas de Cromel-Alumel envainadas en acero inoxidable 304, de diámetro exterior $\varnothing = 1.00\text{mm}$, emplazadas en la vaina de la probeta, deben suministrar información de temperatura. La máxima temperatura esperada es de 300°C .

En el presente informe se exponen los resultados de los ensayos practicados con el objeto de lograr un brazing de termocuplas pasantes a tapones con la geometría de los de la cápsula ARSO-01 que cumpla con las exigencias de diseño.

EQUIPOS Y MATERIALES UTILIZADOS

Todos los ensayos fueron realizados en hornos de inducción y bajo vacío. Se utilizaron un horno RADYNE con una frecuencia de ~ 500 KHz y un horno TRAMEC, modelo IHC-30 A cuya frecuencia de operación es 450 KHz. Para los ensayos realizados en el horno TRAMEC el vacío se obtenía usando un equipo VEECO, mientras que en el otro caso se usó un equipo convencional de alto vacío.

Con el horno RADYNE se usó una bobina inductora de 6 vueltas, longitud total 55 mm, y diámetros $\phi_{\text{ext}} = 60$ mm, $\phi_{\text{int}} = 45$ mm. Con el otro horno se usaron dos bobinas inductoras, que designaremos en adelante como bobinas b_1 , y b_2 . La b_1 es de 5 vueltas, longitud total 65 mm, $\phi_{\text{ext}} = 59$ mm., $\phi_{\text{int}} = 45,5$ mm con una derivación de 3 vueltas longitud 34 mm, $\phi_{\text{ext}} = 105,5$ mm, $\phi_{\text{int}} = 83$ mm. La derivación se usó para disipar potencia, ya que la del horno resultó excesiva para los ensayos realizados. La bobina b_2 consta de 5 vueltas, longitud 66 mm, $\phi_{\text{ext}} = 143$ mm, $\phi_{\text{int}} = 127$ mm.

El material usado para simular el tapón fué acero inoxidable 304. Las termocuplas fueron de características similares a las que deben usarse en el dispositivo ($\phi = 1$ mm., vaina de inoxidable); en algunos casos se las simuló mediante alambres de inoxidable de diámetro aproximado de 1 mm.

El material de aporte fué la aleación comercial Microbraz 30 cuyas características se exponen en la Tabla I. Esta aleación es apropiada dado que produce uniones de alta resistencia mecánica y alta resistencia a la oxidación y a la corrosión.

TABLA I

Características de la aleación Microbraz - 30^{*}

Composi- ción No- minal %	Temperatu- ra de só- lidus	Tempera- tura de líquidus	Rango de Brazing	Tempera- tura de Brazing Sugerida	Resisten- cia a la oxidación (de la u- nión): Por	Ductili- dad de la unión: Ex- celente hasta	Resisten- cia a la tensión de corte (Metal ba- se AISI 304) 59300 psi	Resisten- cia a la corrosión en Nak y agua a alta tem- peratura satisfac- toria.	Microcons- tituyen- tes de a- leación (antes del bra- zing): Peritécti- co y So- lución Sólida.
Cr 19.0 Si 10.0 C 0.15 _{max} Ni balan- ce	1080°C	1135°C	1150 - 1205°C	1190°C	encima de 980°C	380°C			

* Datos provistos por el fabricante.

TECNICAS Y RESULTADOS EXPERIMENTALES

Con el objeto de poner a punto la técnica de brazing de termocuplas a tapones se realizaron experiencias en varias etapas que pueden agruparse como sigue:

- 1) Mojado.
- 2) Brazing de alambres de acero inoxidable 304 y de termocuplas a probetas pequeñas de acero inoxidable 304 (ver Fig.2)
- 3) Brazing de alambres de acero inoxidable 304 a tapones de inoxidable 304.
- 4) Brazing de termocuplas a tapones de acero inoxidable 304.
- 5) Soldadura por TIG de tapones conteniendo termocuplas pasantes soldadas por brazing con tubos de acero inoxidable.

Las experiencias de mojado se realizaron en primer término con el propósito de comprobar que el acabado superficial del acero utilizado y las condiciones de limpieza de las piezas eran los apropiados. Las piezas utilizadas eran dos pequeños cilindros concéntricos torneados con una luz entre ellos de $\sim 0,1$ mm. Estos cilindros fueron limpiados con acetona (posteriormente se usó in distintamente acetona o tetracloruro de carbono), luego ajustados uno con otro mediante un tornillo, vueltos a limpiar y se depositó una pequeña cantidad de material de aporte en la zona superior del espacio entre ellos. El conjunto así preparado (como así también las piezas de los ensayos 2-4) se colocó simplemente apoyado en un tubo de Vycor contenido en una cámara - también de Vycor - conectada al equipo de vacío. (Fig. 3). La cámara pasaba por el interior de la bobina de inducción y se calentó la pieza hasta lograr la fusión del material de aporte. Los resultados fueron satisfactorios, como lo muestra la Fig. 4 en que el cilindro interior fue de acero 304 (derecha de la fotomicrografía) y el exterior, de acero 316.

La geometría de las probetas utilizadas en las experiencias de los grupos 2 y 3 se muestra en la fig. 2. En todos los casos del grupo 2 el material de aporte fué preparado en una superficie de vidrio perfectamente limpia mezclando el polvo de Nicrobraz 30 con un cemento líquido (provisto por la misma firma) -un material plástico volátil - que actúa como vehículo y como ligante del polvo, con un rango de viscosidad 6-8 centipoises. Este cemento se volatiliza totalmente entre 260°C y 315°C, sin dejar residuos después del brazing. La mezcla así preparada era ubicada de inmediato en la zona que se señala con la flecha en la Fig. 2 y luego se colocaba la pieza en una mufla durante ~ 24 horas a una temperatura de $\sim 150^\circ\text{C}$, a los efectos de producir una volatilización parcial del cemento.

En las experiencias con los tapones (Grupo 3) el polvo se colocaba directamente en la zona de depósito y luego se añadía paulatinamente el cemento realizándose el mezclado de ambos in situ.

En todas las experiencias, el brazing fué precedido por varios ciclos térmicos de breve duración cada uno a fin de volatilizar el cemento totalmente y realizar la operacion final en buenas condiciones de vacío.

El estudio metalográfico se realizó revelando las subestructuras tanto de los metales base como del aporte mediante pulido químico. El reactivo utilizado fué la mezcla que se detalla a continuación: Cl_2Cu , 45 g. ; Fe Cl_3 8 g.; HCl , 180 ml; HNO_3 1,5 ml; H_2O , 180 ml; alcohol, 380 ml.

Las experiencias más significativas se detallan en el cuadro siguiente (Tabla II) a los efectos de facilitar una evaluación de los resultados obtenidos. Las micrografías correspondientes completan la información provista por el cuadro.

TABLA II
RESULTADOS EXPERIMENTALES

Probeta	Geometría	Horno	Potencia KV	Ciclaje térmico	Tiempo de soldadura (Seg)	Observaciones
B-3 (alambre)	C.P. (1)	R (2)	0.8	9 calentamientos en 0.1 KV, total 16 min..28 seg., luego uno en 0.8 KV por 35 seg. y dos más en 0.2 KV durante 3 min. 46 seg.	103	La soldadura fue exitosa si bien pudo observarse porosidad debido al microre- chupe. Pudo apreciarse una obvia solu- bilización del metal base en el aporte y un efecto de erosión en borde de grano. Alrededor del trozo de alambre central se observa una zona aparentemente despro- vista de microsegregación dendrítica. Pulidos reiterados no arrojaron ningún resultado diferente del que muestra la fotomicrografía (Fig. 5).
B-4 (alambre)	A.L. (3) C.P.	y R	0.7	9 calentamientos en 0.1 KV, total 17 min.41 seg., luego dos en 0.2 KV, total 2 min. 57 seg.	81	El aporte penetró en forma apropiada produciéndose una buena soldadura. No se observó disolución apreciable de material base cerca de la salida superior del alam- bre, quizás leve en la zona del agujero lateral (donde se deposita el aporte).. El problema de erosión en borde de grano subsiste. (Fig. 6).

(continuación)

Probeta	Geometría	Horno	Potencia KV	Ciclaje térmico	Tiempo de soldadura (Seg)	Observaciones
B-5 (termo cupla)	C.P.	R	0.7	14 ciclos entre 0.2 y 0.3 KV durante 24 min.34 seg.	73	Soldadura exitosa. Persiste efecto de erosión intergranular. No se efectuó corte longitudinal si bien se sospecha que el problema de disolución en la zona de entrada subsiste. (Fig. 7).
B-10 (alambre)	C.P.	R	0.7	2 ciclos en 0.1 KV y 1 en 0.25 KV, total 4 min. 44 seg.	80	Soldadura exitosa. Erosión intergranular. Disolución leve en la zona de depósito de aporte (Fig. 8).
B-17 (alambre)	A.L.	R	0.7	1 ciclo en 0.1 KV 2 min. 29 seg.y 1 en 0.25 KV du- rante 46 seg.	71	Soldadura buena. Alguna microporosidad. Disolución del alambre evidente, en zona de entrada del aporte. Erosión intergra- nular. (Fig. 9).
B-30 (alambre)	A.L. (un solo lado)	R	0.8	1 ciclo en 0.1 KV durante 2 min. 28 seg.	50	Soldadura exitosa. Erosión. No hay disolu- ción de material base. (Fig. 10).

(continuación)

Probeta	Geometría	Horno	Potencia KV	Ciclaje térmico	Tiempo de soldadura (Seg)	Observaciones
B-32 (alambre)	C.E. ⁽⁴⁾	R	0.6	1 ciclo en 0.2 KV, 2 min. 35 seg.	120	Soldadura exitosa. Erosión intergranular. No hay disolución de material base(Fig.11).
C-4 (2 tapones con 4 alambres y 2 termocuplas)	C.P.	T ⁽⁵⁾	6	Tapón superior: 3 ciclos en 3 KV, 3 min. 17 seg., luego 1 en 5 KV de 1 min. 30 seg.	390	Soldadura exitosa. Erosión intergranular. Leve disolución en la zona inferior de una termocupla. No hay disolución alrededor del alambre.
				Tapón inferior: 2 ciclos en 3 KV, 3 min. 30 seg.	320	Id. tapón superior. También disolución zona de depósito de aporte. Fig. 12.
C-5 ⁽⁶⁾ (tapón doble 3 alambres y 3 termocuplas)	C.P.	T	7	2 ciclos en 3 KV, 4 min. 35 seg.	90	Id. C-4 (Fig. 13)
			6	2 ciclos en 3 KV, 4 min. 30 seg.	120	

(continuación)

Probeta	Geometría	Horno	Potencia KV	Ciclaje térmico	Tiempo de soldadura (Seg)	Observaciones
C-6 ⁽⁶⁾ (tapón con 6 termocu- plas)	C.E.	T	6	3 ciclos en 3 KV, 3 min. 6 seg.	100	Soldadura exitosa. Erosión intergra- nular. Disolución muy leve o no exis- tente. (Figura 14).
C-7 ⁽⁶⁾	C.E.	T	6 después de 1 min.se bajó a 4	3 ciclos en 3 KV, 3 min. 3 seg.	130	No se realizó estudio metalográfico. Aspecto externo excelente.(Fig. 15.)

(1) Copa profunda (Ver Fig. 2a)

(2) Horno Radyne

(3) Agujero lateral (Ver Fig. 2c)

(4) Copa extendida (Ver Fig. 2b)

(5) Horno Tramec

(6) Ver geometría de tapones en Figs. 2d y e.

La luz alambre/tapón y termocupla/tapón fue en todos los casos de 0.1 mm.

Análisis de los resultados y conclusiones

Los resultados de las experiencias, evidenciados por las fotomicrografías que se acompañan, muestran diversos aspectos que se señalarán por separado.

La microestructura del material de aporte que se funde y solidifica durante el proceso de brazing es siempre dendrítica resultado lógico dadas las condiciones sumamente severas de solidificación.

La erosión intergranular es un factor presente que no ha podido ser eliminado. Ello se debe -como lo aclara la misma firma proveedora- a la presencia de Si en la aleación, y es inevitable. Puede reducirse reduciendo al máximo posible el tiempo de operación. El uso de Nicrobraz 50 que no contiene Si, evitaría el efecto de erosión. Pero esta aleación contiene P por lo cual presenta una resistencia a la corrosión en Na ó NaK inferior a la del Nicrobraz-30.

La disolución del material base es un factor importante ya que las vainas de las termocuplas son sumamente delgadas.

Las geometrías óptimas resultan ser la de copa extendida (probetas C-6 y C-7) que además presenta la ventaja de poder practicar la soldadura por el método TIG del tapón y el tubo al cual debe ir unido sin calentar excesivamente la zona de brazing, y la de depósito lateral (B-30). Sin embargo esta última podría presentar inconvenientes para el tapón superior durante la operación del dispositivo ya que la discontinuidad creada en la pared podría provocar perturbaciones al flujo hidrodinámico en el canal de ensayo. Ensayos por TIG se realizaron sobre dos probetas sin que se notara ningún efecto en la zona de brazing vecina.

Un inconveniente comunmente enunciado por otros investigadores en cuanto al instrumental utilizado es la alta frecuencia de los hornos. El calentamiento por radiación alcanza sólo una pequeña penetración, y el del resto de la pieza hacia la zona que contiene el material a fundir se realiza por conducción. Ello trae aparejada la creación de un gradiente de temperatura y por ende una distribución inhomogénea en la dirección transversal que alarga el tiempo de operación. Por otra parte, se hace más difícil controlar la temperatura que se alcanza en el aporte, ya que cuando comienza a fundir, la temperatura sigue elevándose innecesariamente. Como no se dispuso de un horno más adecuado (la frecuencia recomendada es de 10 KHz) en la última experiencia que se expone en la Tabla II se optó por bajar la potencia una vez que la fusión del aporte comenzó, con resultados externos ampliamente satisfactorios.

Otro inconveniente con el que se tropezó en el uso del horno Tramec fué la alta potencia (mínima) del mismo. Ello se subsanó usando una derivación para disipar parte de la potencia.

Un par de ensayos de tracción realizados sobre alambre y termocupla mostrarón una resistencia razonable, produciendose la ruptura fuera de la zona de brazing.

En resumen, se considera que los resultados han sido ampliamente satisfactorios con los materiales e instrumental disponibles en este laboratorio.

Agradecimientos

Se agradece al Sr. M. Soenen (Proyecto PNUD ARG 4/35 A) las sugerencias útiles que ha brindado en el curso de su breve estadía en nuestro Laboratorio y al Programa Multinacional de Metalurgia (OEA-CNEA) la financiación parcial de este trabajo.

LEYENDAS DE LAS FIGURAS

Figura 1- Esquema de la cápsula ARSO - 1.

Figura 2- Dibujos esquemáticos de las probetas y tapones utilizados en los ensayos.

a) copa profunda.

b) copa extendida.

c) copa profunda más agujeros laterales y un agujero lateral.

d) cortes longitudinal y transversal de tapón con seis termocuplas pasantes y geometría de copa profunda.

e) cortes longitudinales de tapones superior e inferior en forma de H con geometría de copa extendida.

Figura 3- Esquemas de la cámara de Vycor que contiene a la probeta (ó tapón) de ensayo y que va acoplada al sistema de vacío.

Figura 4- Fotomicrografía de la zona de brazing entre un acero 304 (derecha) y uno 316 (izquierda), mostrando la subestructura dendrítica característica.

Figura 5- Fotomicrografías de la zona de brazing de la probeta B - 3 (alambre pasante).

a) corte longitudinal mostrando el efecto de disolución del material base.

b) detalle de la zona inferior de (a) mostrando la región aparentemente desprovista de microestructura alrededor del alambre.

Figura 6- Fotomicrografías de la zona de brazing de la probeta B - 4 (alambre pasante).

a) corte transversal con zona de brazing estrecha.

b) corte transversal con zona de brazing ancha.

c) corte longitudinal desde la zona de copa profunda hasta los agujeros laterales.

Figura 7- Fotomicrografías de la zona de brazing de la probeta B - 5 (termocupla pasante)

a) corte transversal.

b) corte transversal en gran aumento mostrando la complicada morfología de la microsegregación.

c), d) y e) cortes transversales a distintos aumentos.

Figura 8- Fotomicrografías de la zona de brazing de la probeta B - 10 (alambre pasante)
a) , d) e) y f) cortes longitudinales a distintos aumentos.

b) corte longitudinal en la zona superior de la probeta, mostrando la copa profunda (zona de deposición del material de aporte).

c) corte longitudinal en la zona inferior de la probeta.

Figura 9- Fotomicrografías de la zona de brazing de la probeta B - 17 (alambre pasante).

a) y b) dos zonas de un corte transversal

c) zona de los agujeros laterales.

Figura 10- Fotomicrografías de la zona de brazing de la probeta B - 30 (alambre).

a) corte longitudinal en la región del agujero lateral.

b) detalle de a)

Figura 11- Fotomicrografía de la zona de brazing de la probeta B - 32 (alambre)

a) corte longitudinal a la altura de la copa extendida, hacia un costado del alambre, sobre el material base (cilindro masivo).

b) corte longitudinal (centro).

c) corte longitudinal (zona superior).

d) corte longitudinal (zona inferior).

Figura 12- Fotomicrografías de zonas de brazing de los tapones C - 4 (4 alambres y 2 termocuplas pasantes).

a) tapón superior, parte superior (termocupla)

b) tapón superior, parte inferior de a).

c) tapón inferior, parte superior (alambre)

d) tapón inferior, parte inferior de c)

e) tapón inferior, parte superior (termocupla)

f) tapón inferior, parte inferior de e).

Figura 13- Fotomicrografías de zonas de brazing de los tapones C - 5 (3 alambres y 3 termocuplas)

a) tapón inferior, parte superior (termocupla)

b) tapón inferior, parte inferior (alambre)

c) tapón superior, parte superior (termocupla)

d) tapón superior, parte inferior de c)

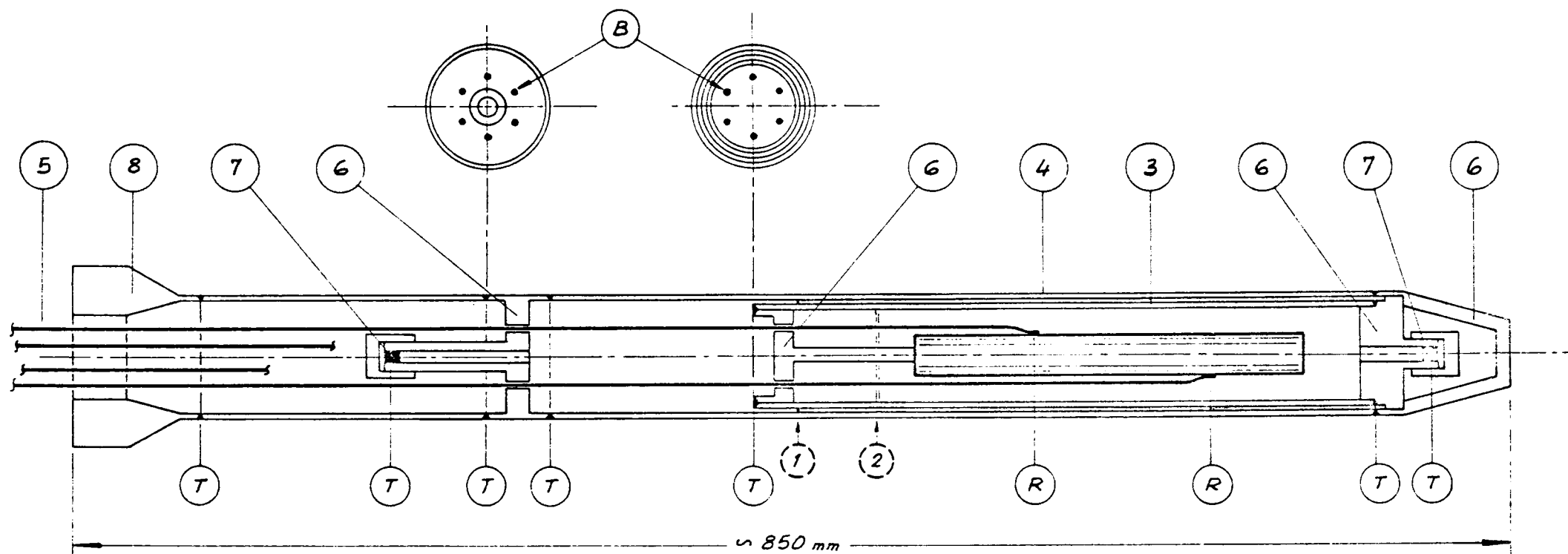
- e) tapón superior, parte superior (termocupla)
- f) tapón superior, parte inferior de e)

Figura 14- Fotomicrografías de zonas de brazing del tapón C - 6 (6 termocuplas pasantes)

- a) parte superior.
- b) parte inferior de a)
- c) Idem a) otra termocupla
- d) parte inferior de c)
- e) Idem a) otra termocupla
- f) parte inferior de e)

Figura 15- Fotografías del tapón C - 7 (3 termocuplas y 3 alambres)

- a) vista superior
- b) vista inferior



REFERENCIAS

SOLDADURAS

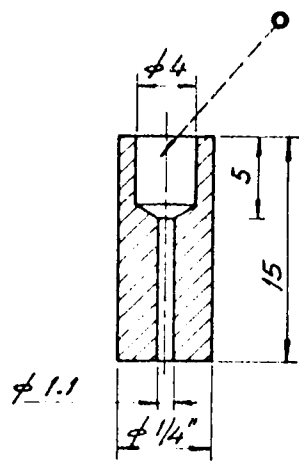
- (B) - BRAZING
(R) RESISTENCIA
(T) TIG

- (1) NIVEL DE PbBi
(2) NIVEL DE NaK
(3) RECINTO INTERNO
 ϕ_e 19.5 mm x 0.75 mm esp.
(4) RECINTO EXTERNO
 ϕ_e 22.5 mm x 0.75 mm esp.

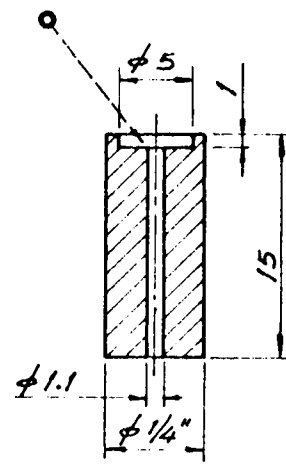
- (5) TERMOCUPLAS ϕ 1 mm
(6) TAPONES
(7) SELLOS DE RECINTOS
(8) BRIDA CABEZAL

ESQUEMA DE LA CAPSULA ARSO-1

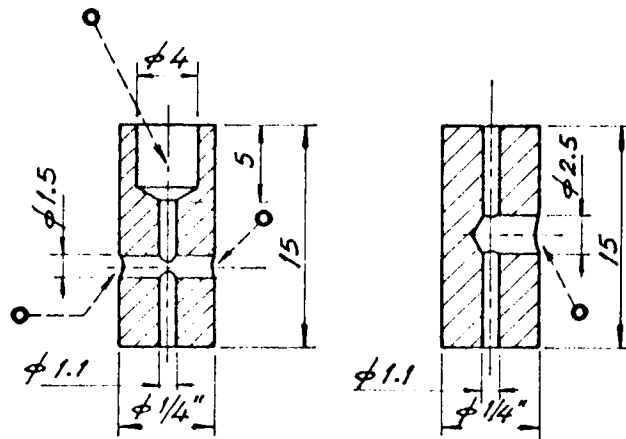
FIGURA 1



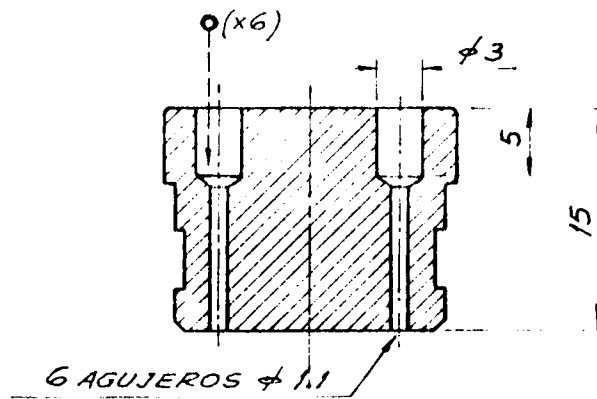
(a)



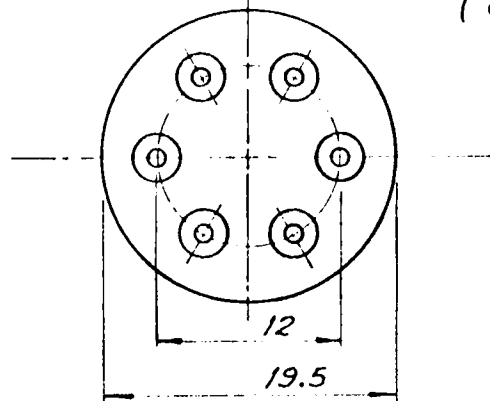
(b)



(c)



(d)



(○---→) : UBICACION DE "Nicrobraz 30"
PARA BRAZING -

FIGURA 2

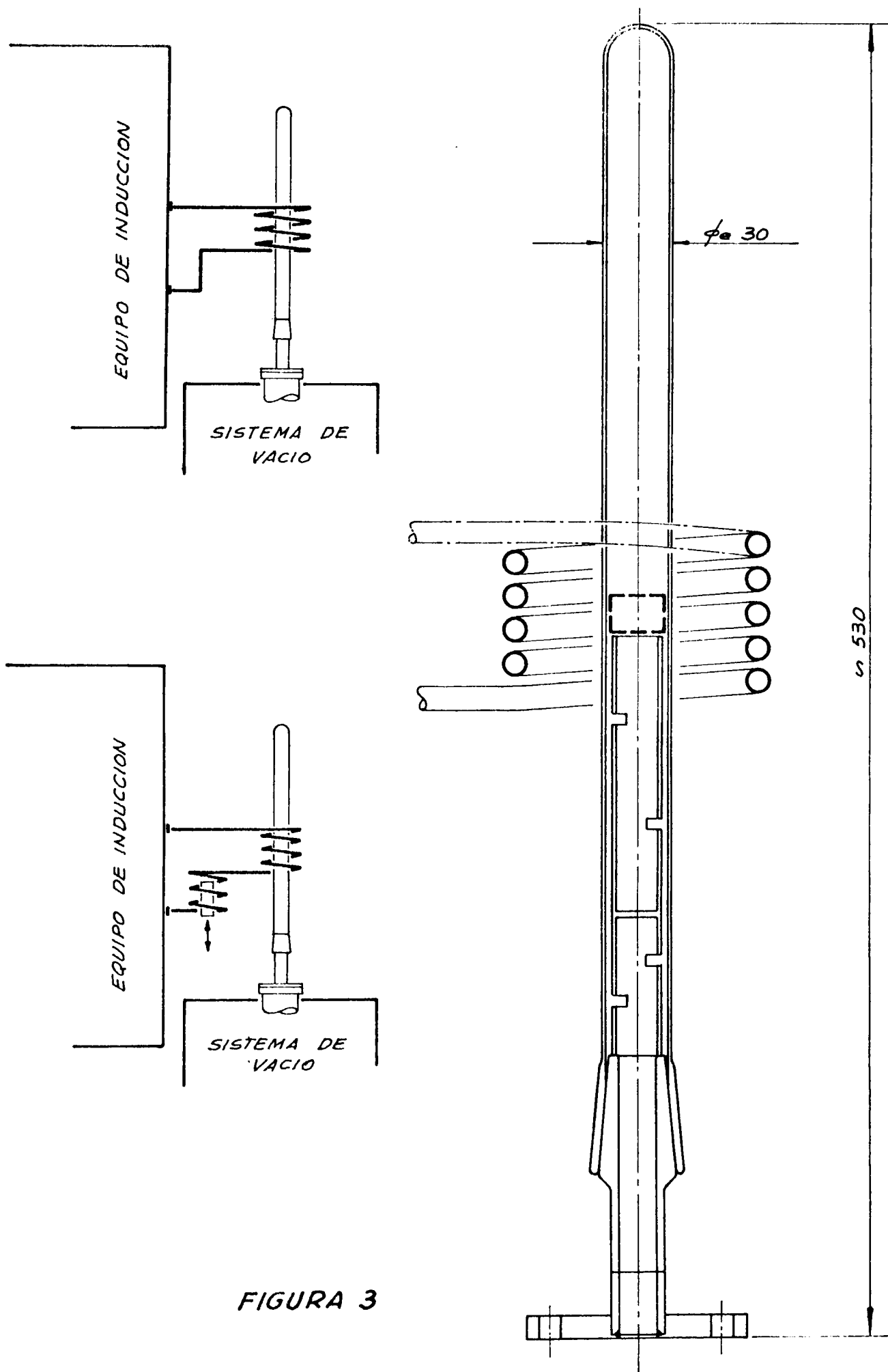


FIGURA 3

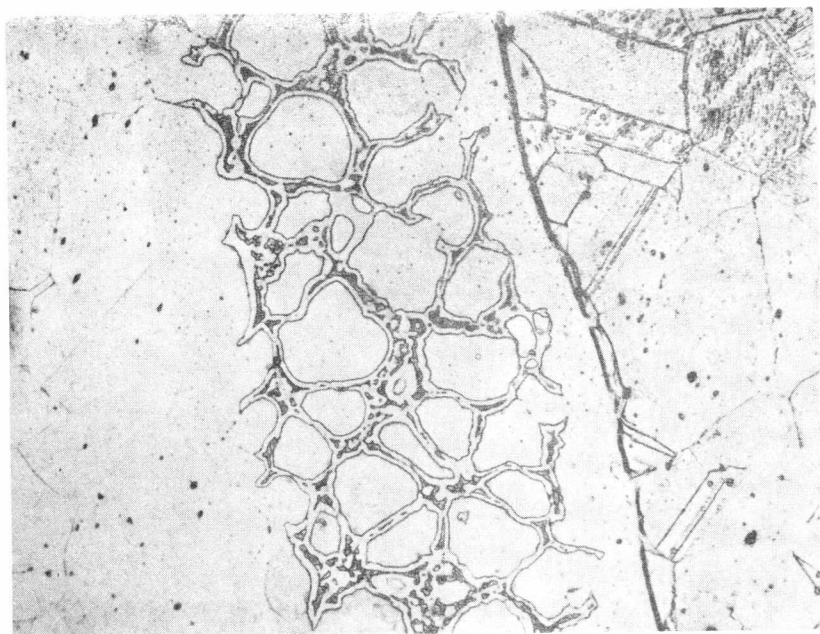
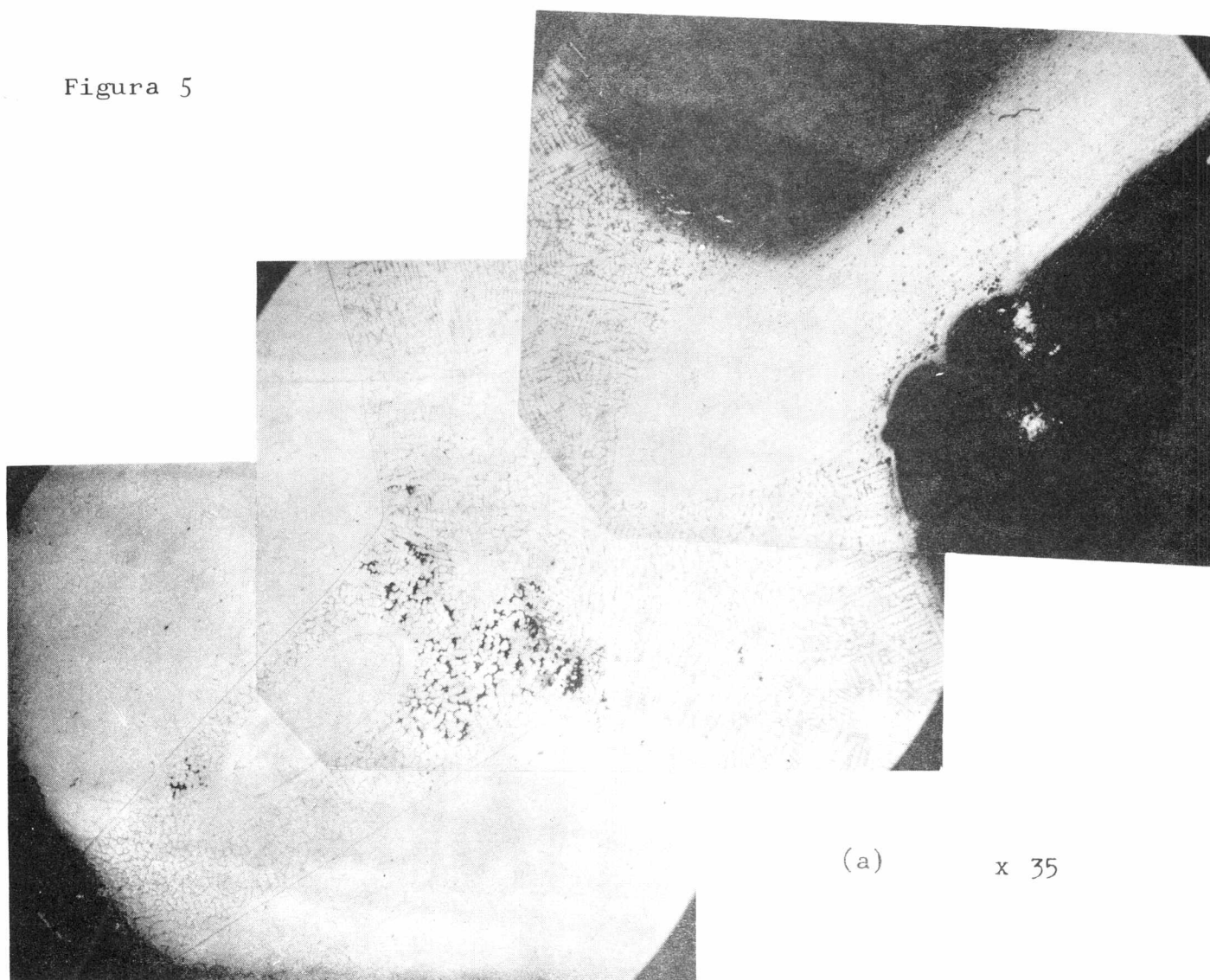


Figura 4

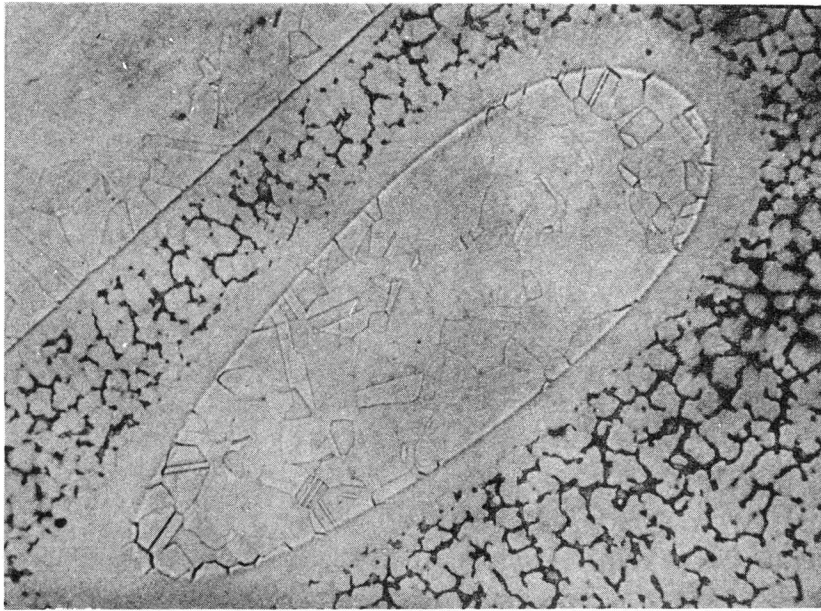
x 400

Figura 5



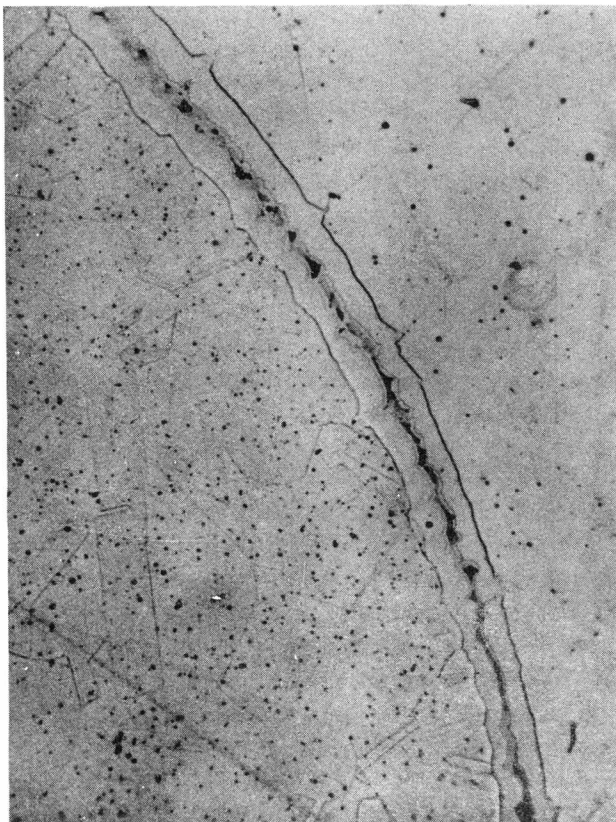
(a)

x 35

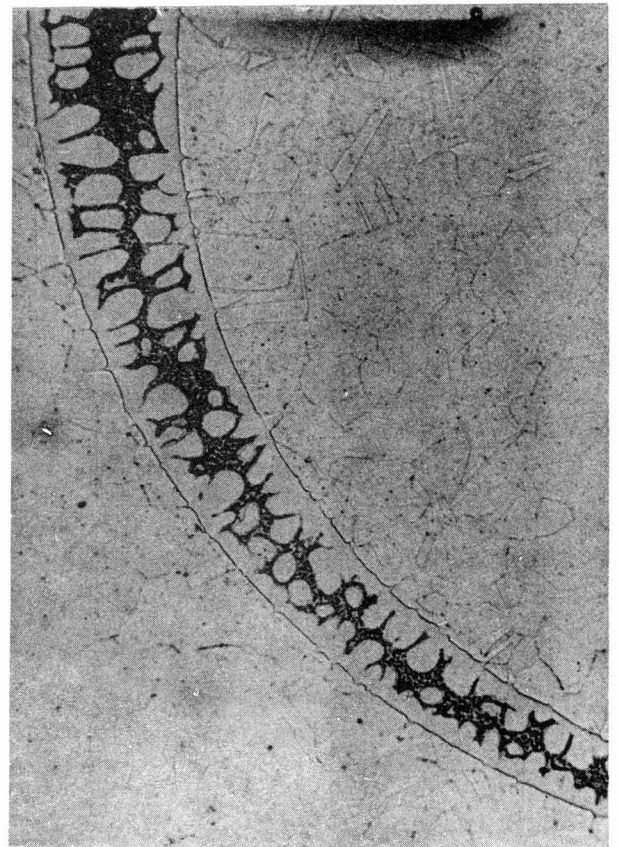


(b) x 100

Figura 5



(a) x 200



(b) x 200

Figura 6

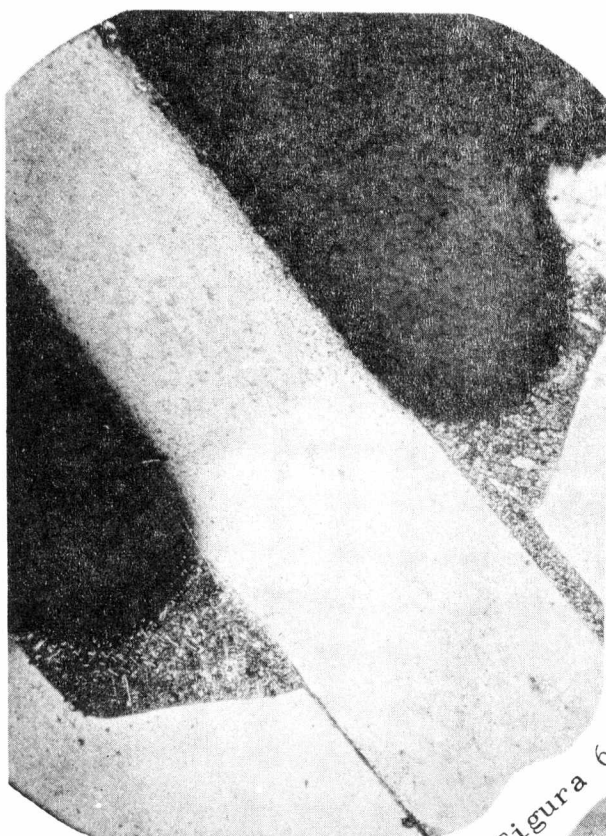


Figura 6

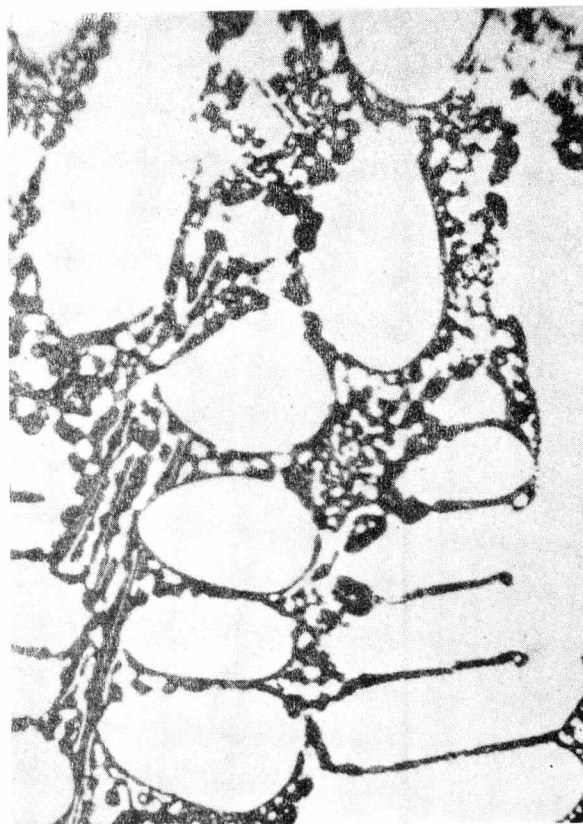
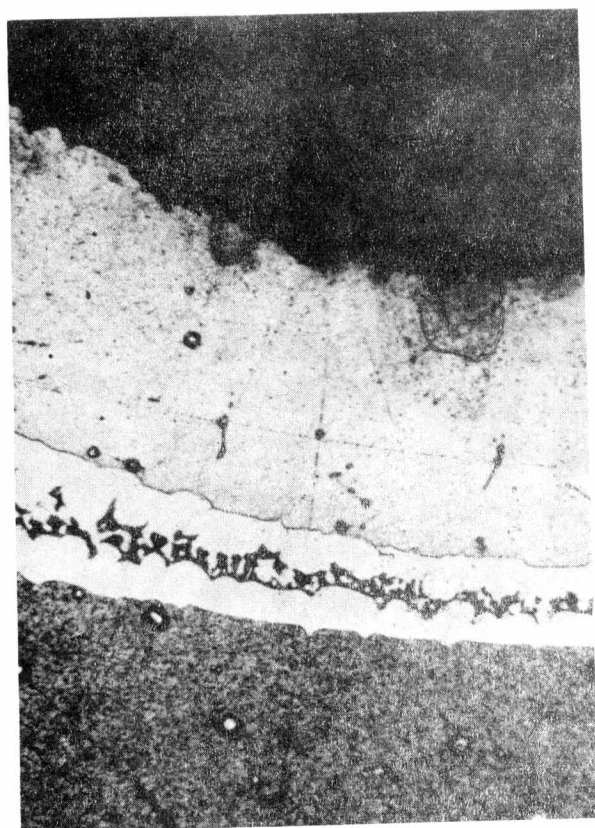
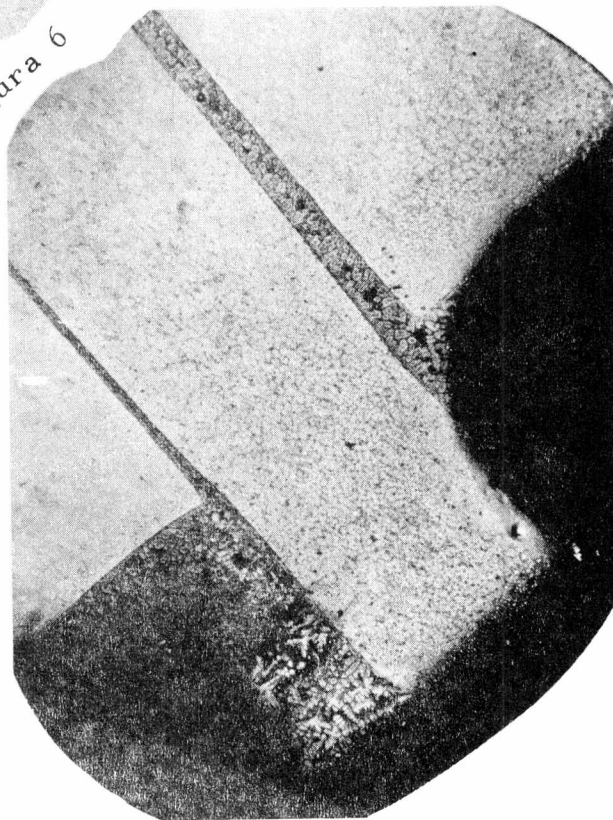


Figura 7

(b) x 800

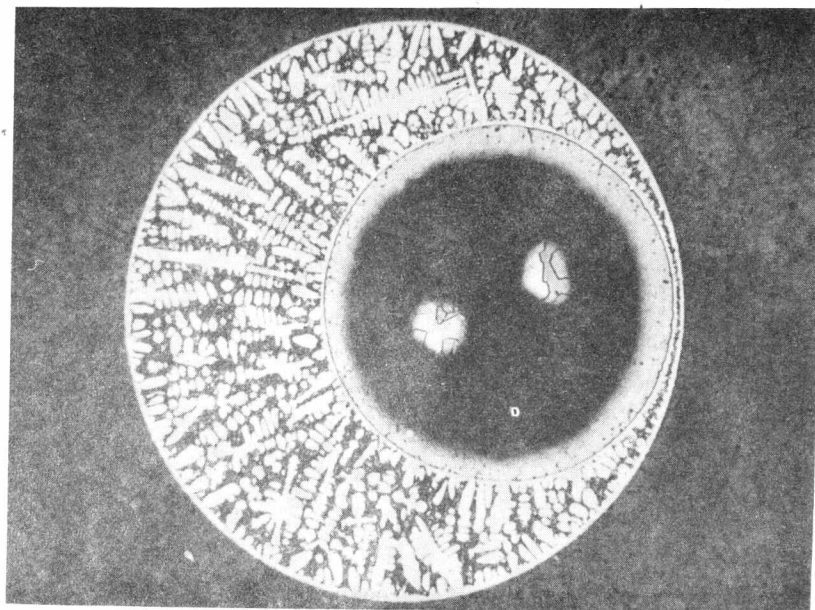


(a) x 500



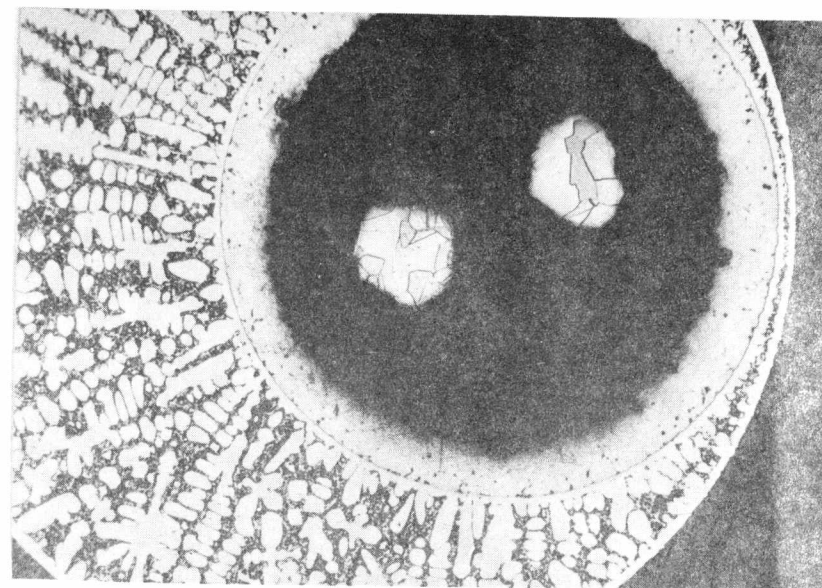
(c)

Figura 7



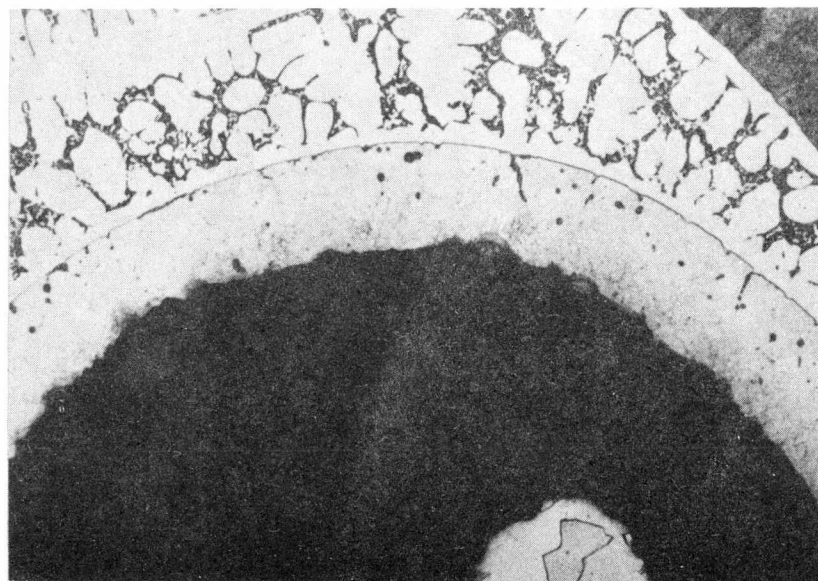
x 60

(c)



x 100

(d)



(e)

x 200



(a) x 200

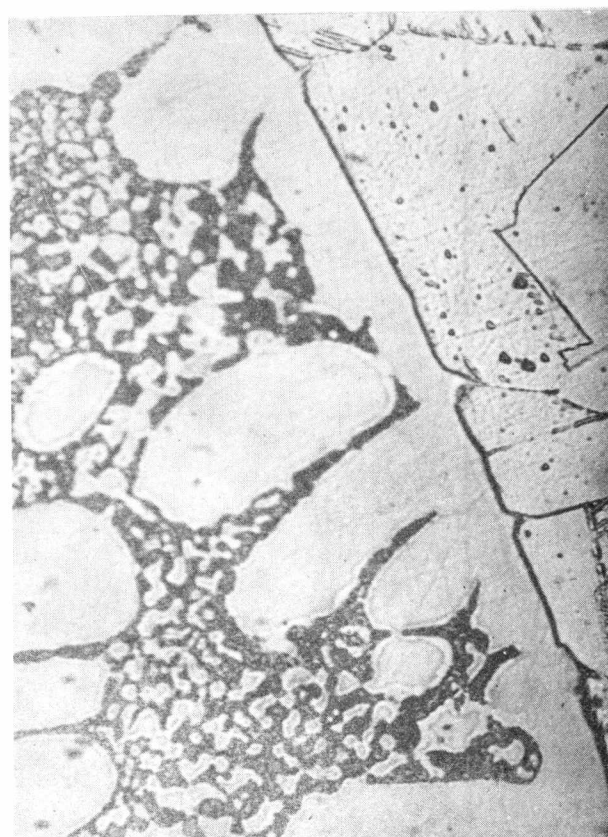


(b) x 35

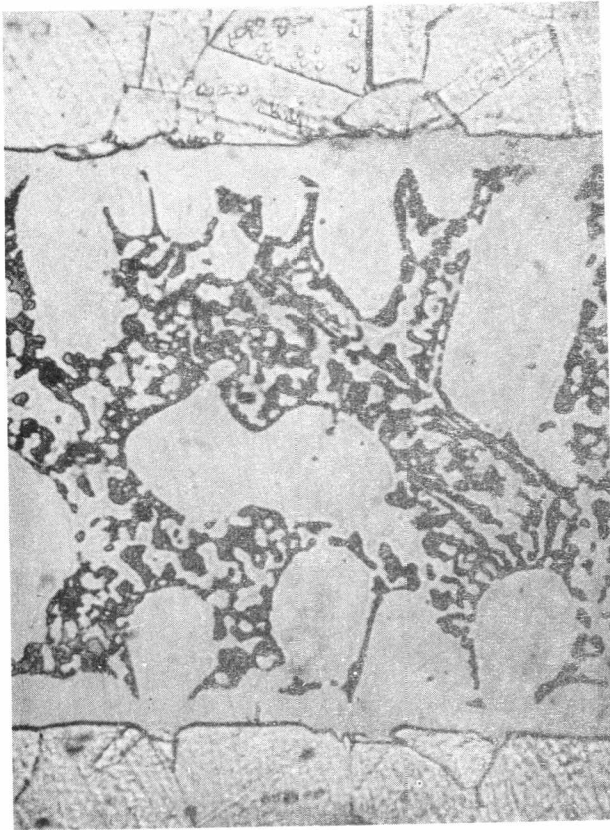
Figura 8



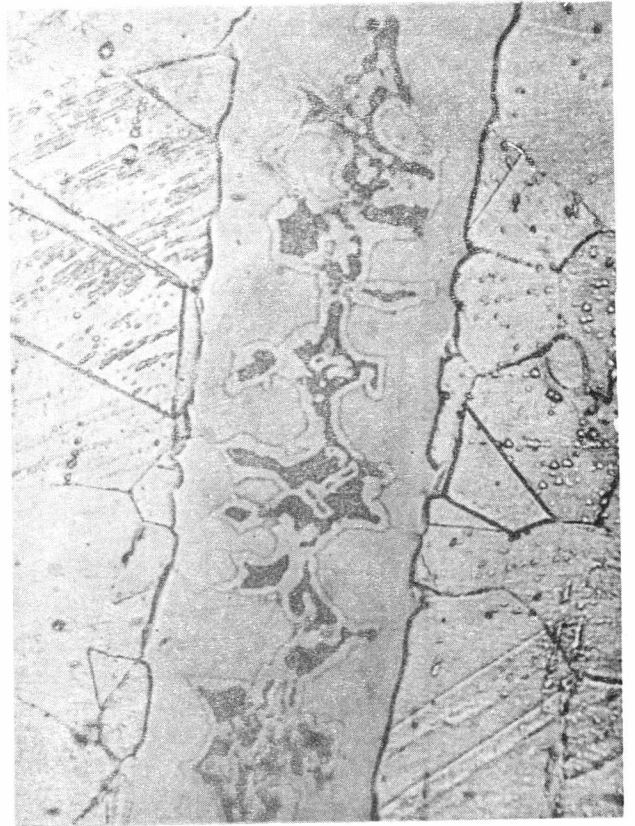
(c) x 35



(d) x 800

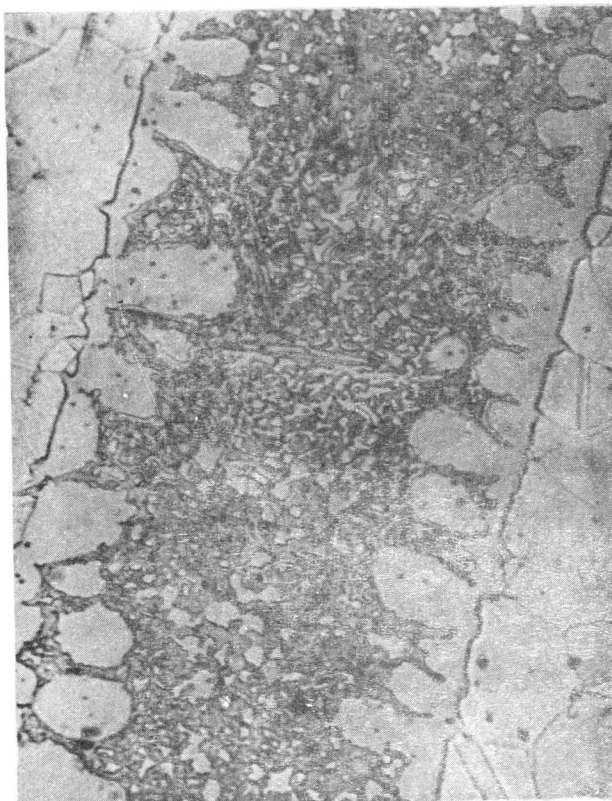


(e) x 800

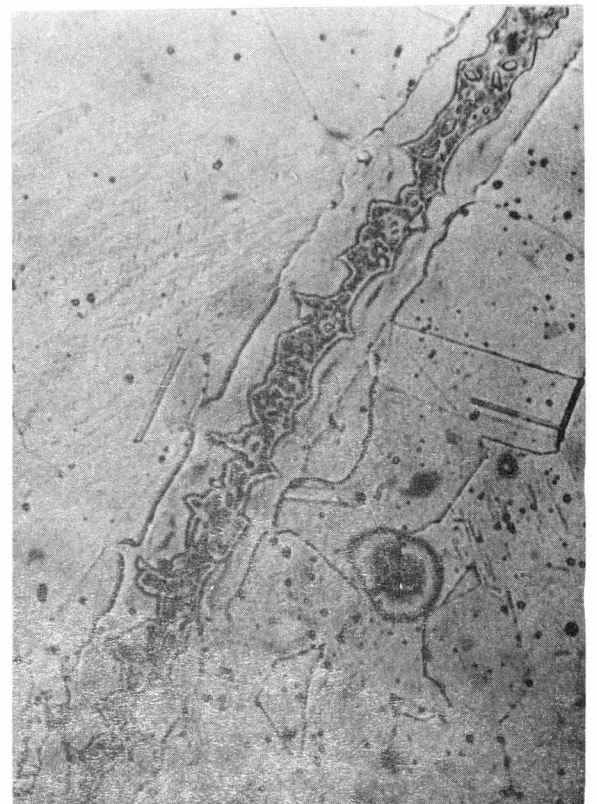


(f) x 800

Figura 8

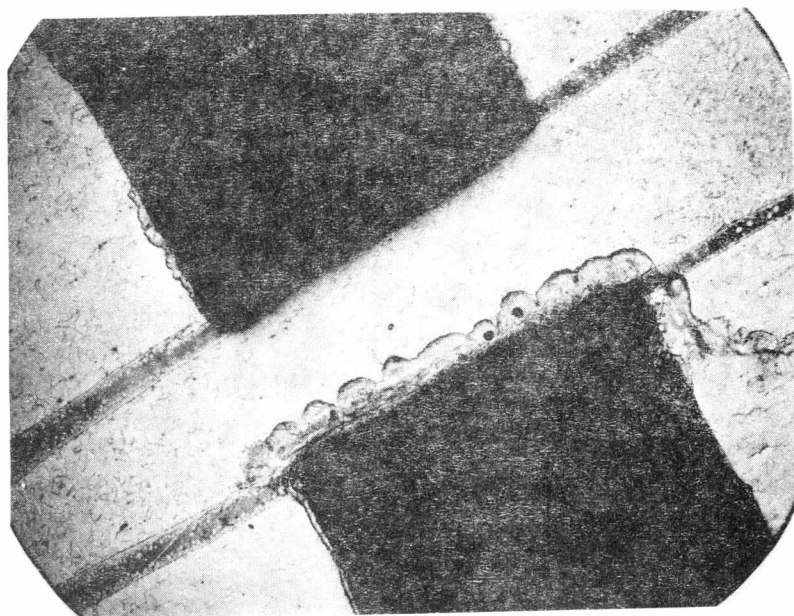


(a) x 800

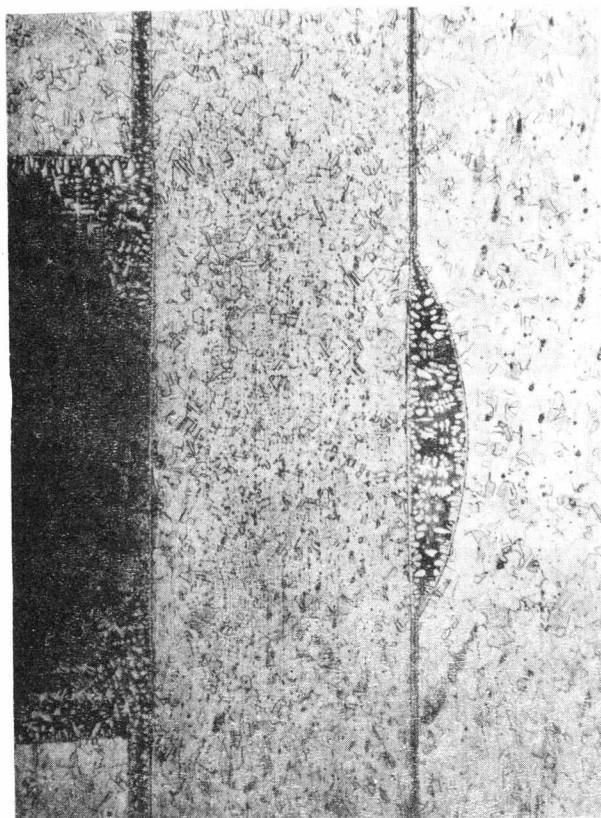


(b) x 800

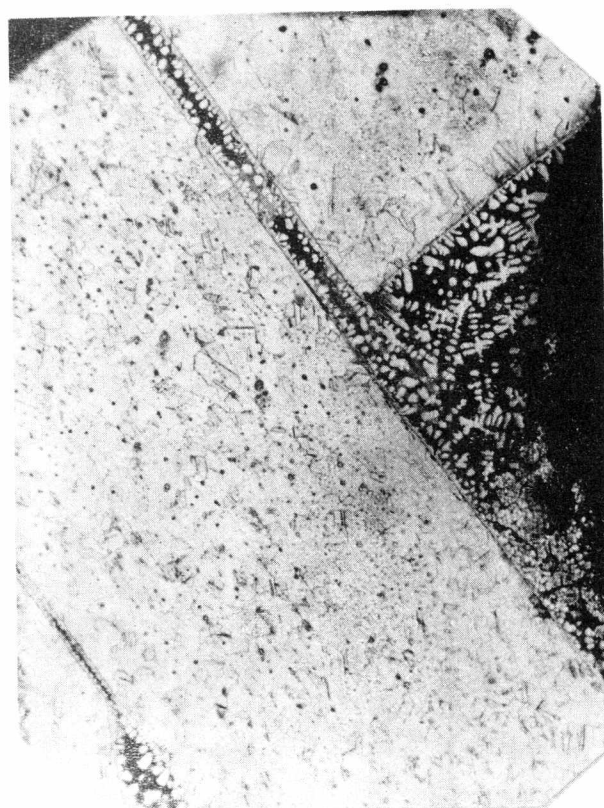
Figura 9



(c) x 35

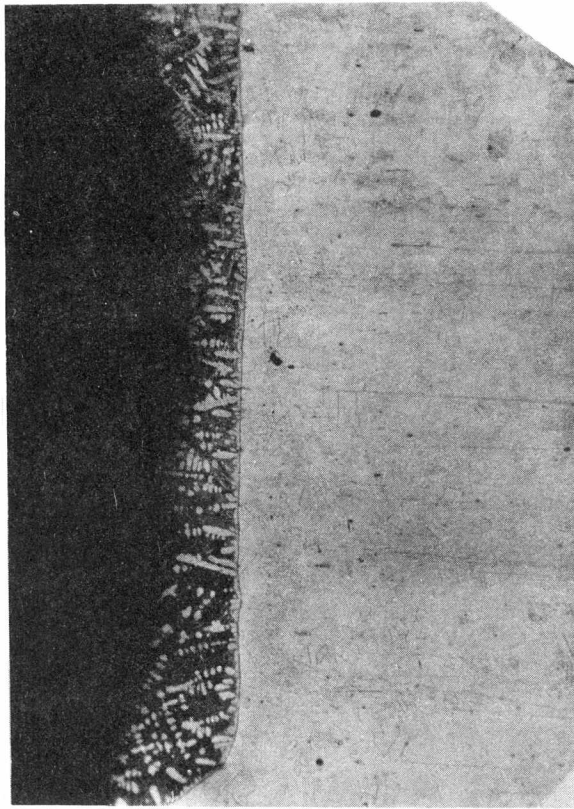


(a) x 40

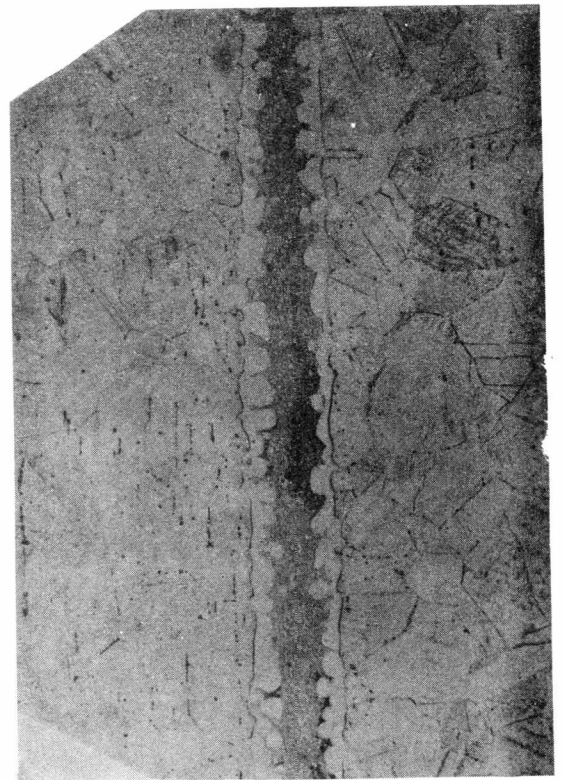


(b) x 60

Figura 10

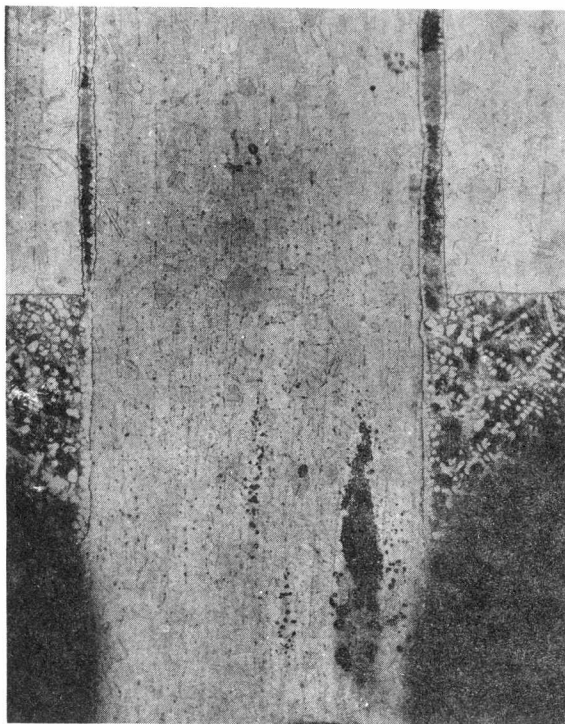


(a) x 60

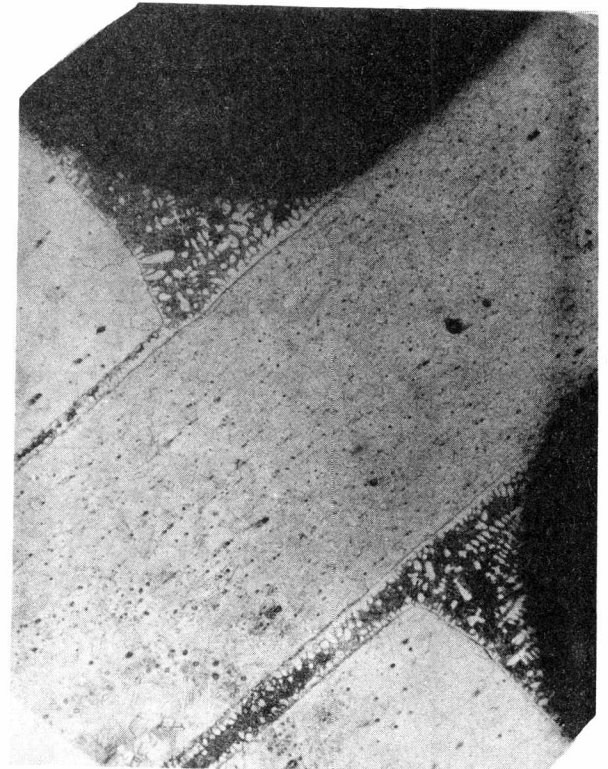


(b) x 500

Figura 11

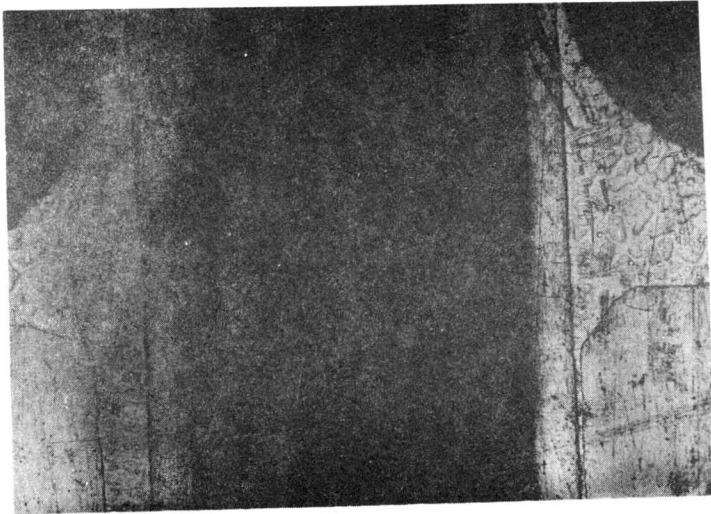


(c) x 60



(d) x 60

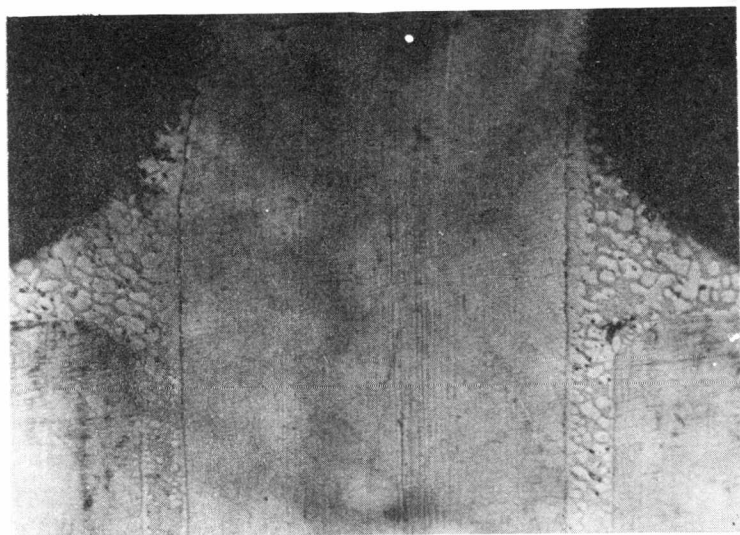
Figura 12



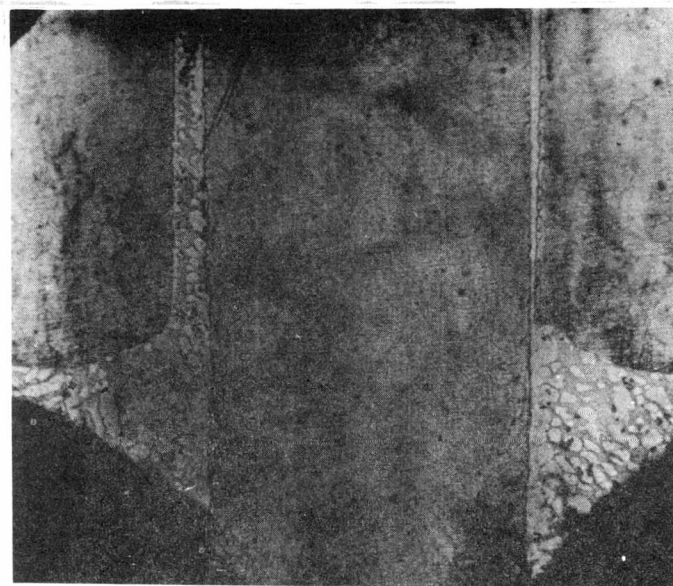
(a) parte superior (t.c.) tapón superior



parte inferior (t.c.) (b)

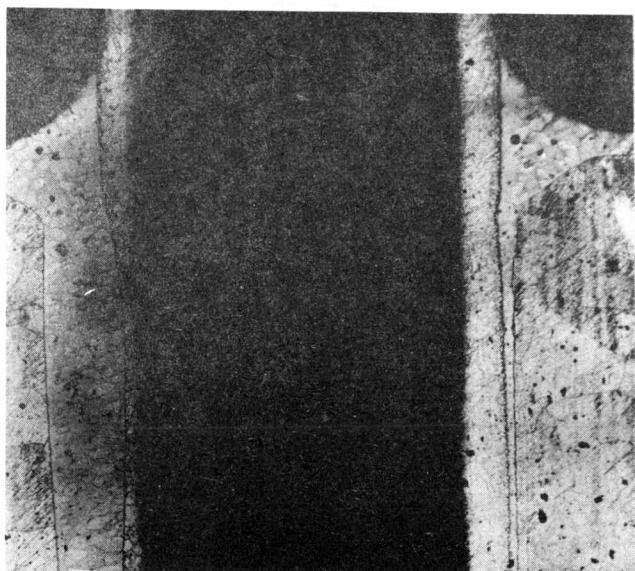


parte superior (al.) (c) x 60

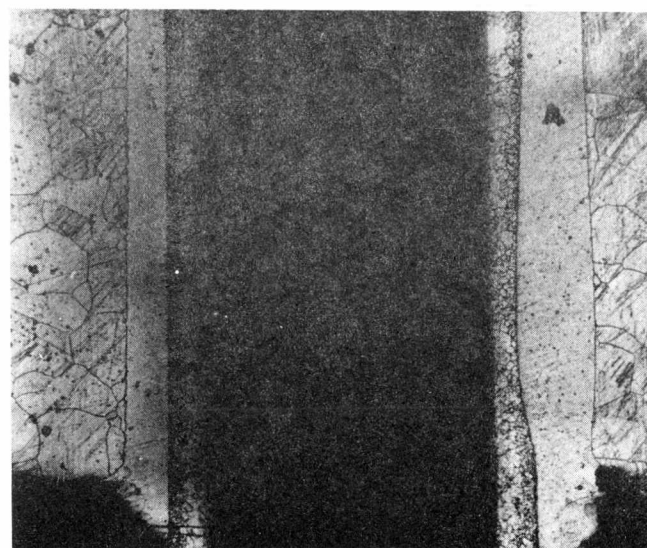


parte inferior (al.) (d)

tapón inferior



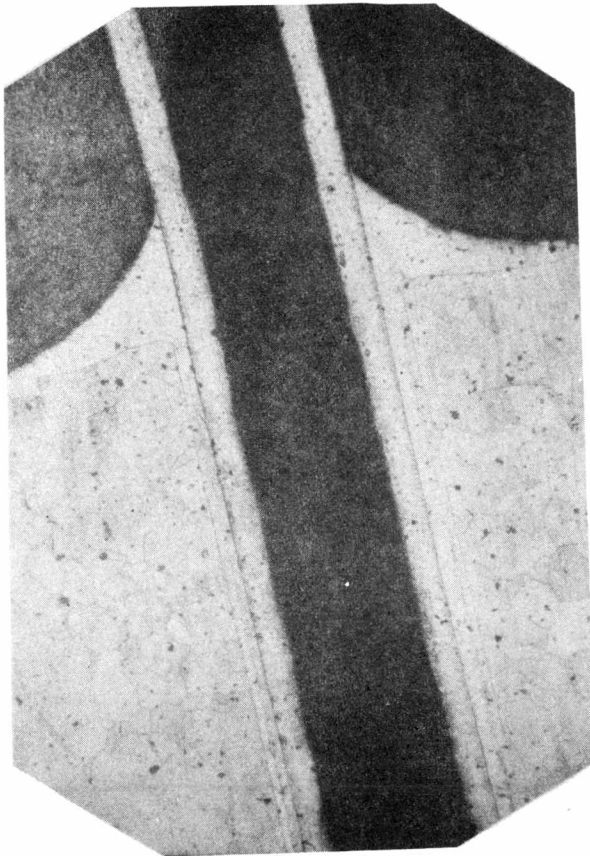
parte superior (t.c.) (e)



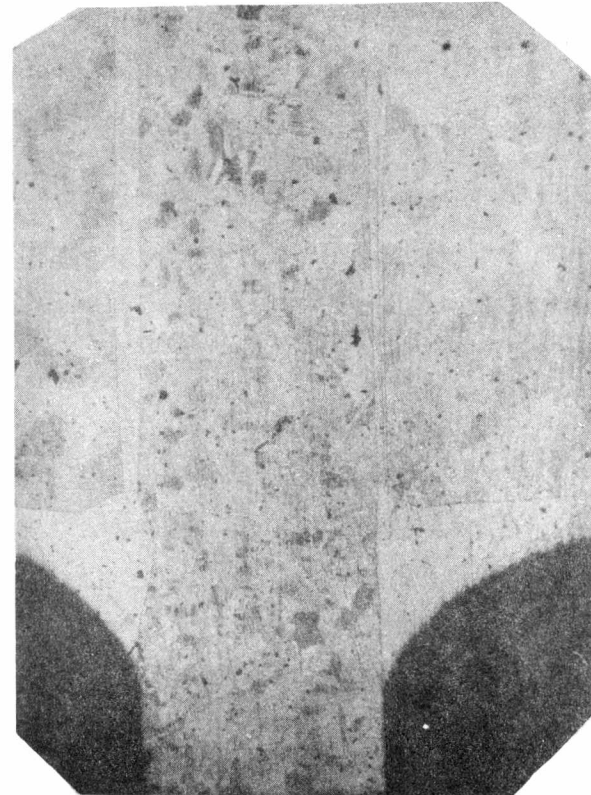
parte inferior (t.c.) (f)

Figura 13

C - 5



(a) parte superior (1)



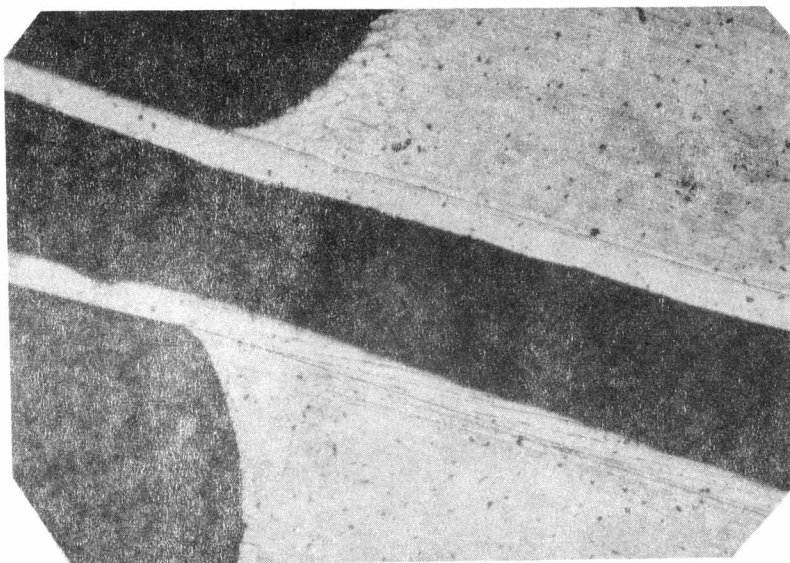
tapón chico

(3) parte inferior (al.), (0)

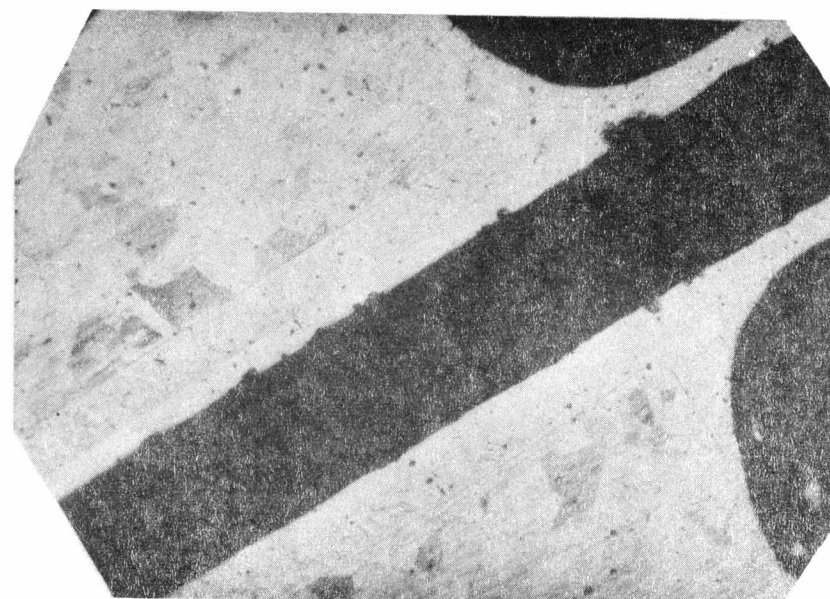
x 35

(b)

Figura 13

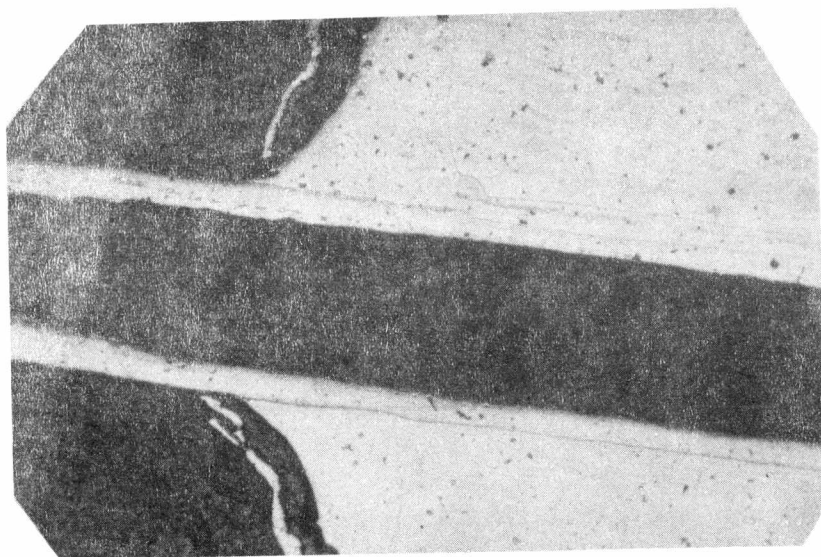


(c) parte superior (7)



tapón grande

parte inferior (9) (d)



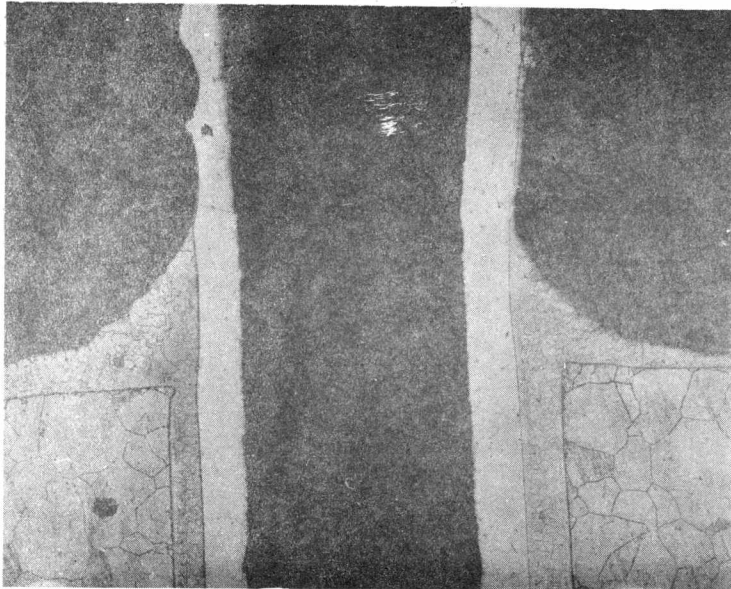
(e) parte superior (8)



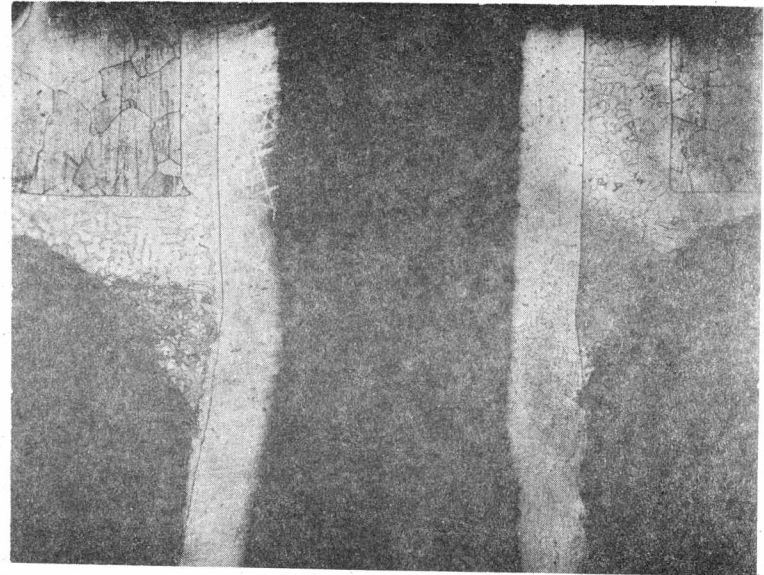
tapón grande

parte inferior (2) (f)

Figura 14



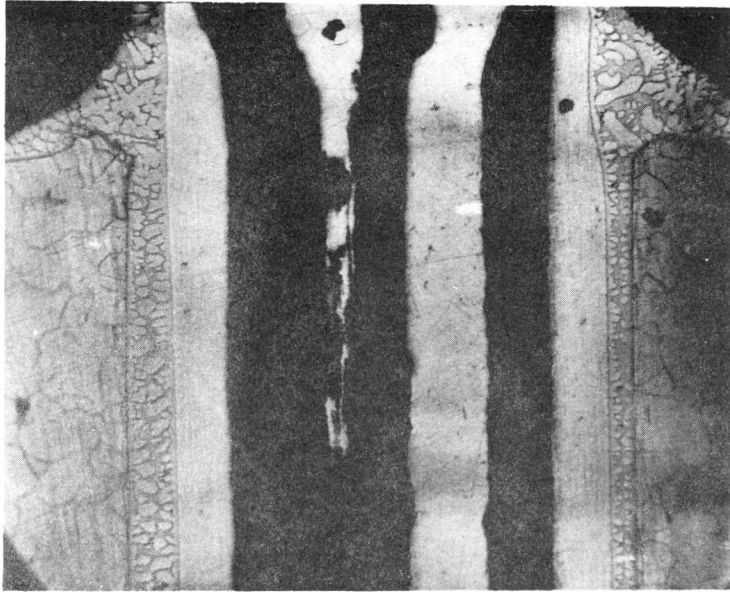
(a)



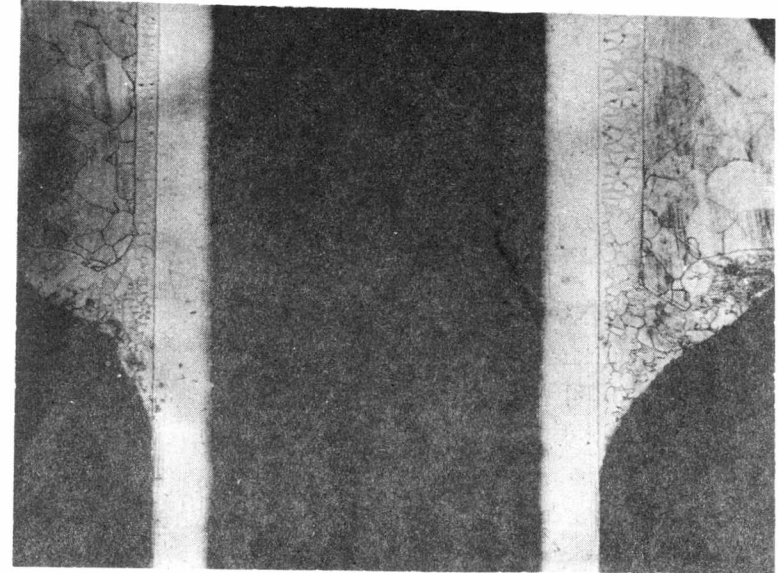
(b)

x 60

Figura 14



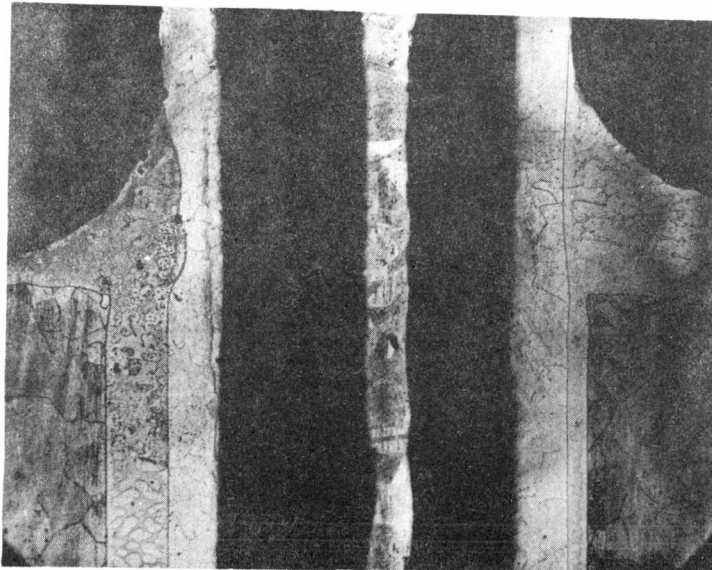
(c)



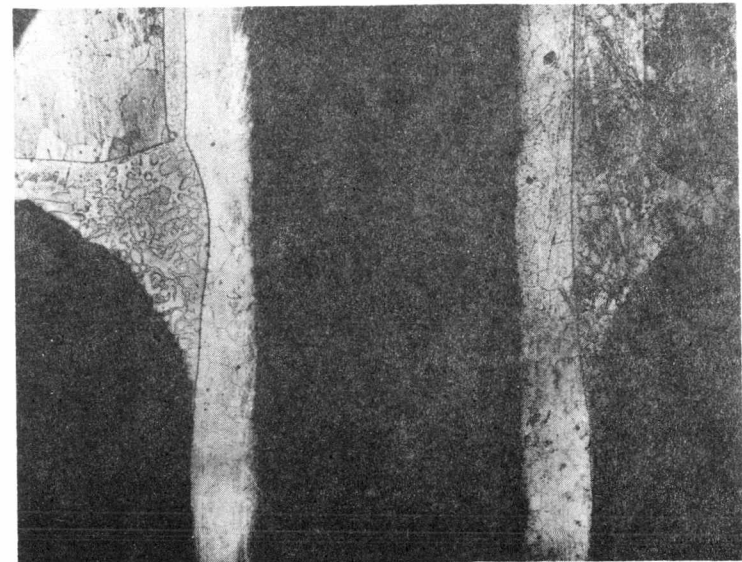
(d)

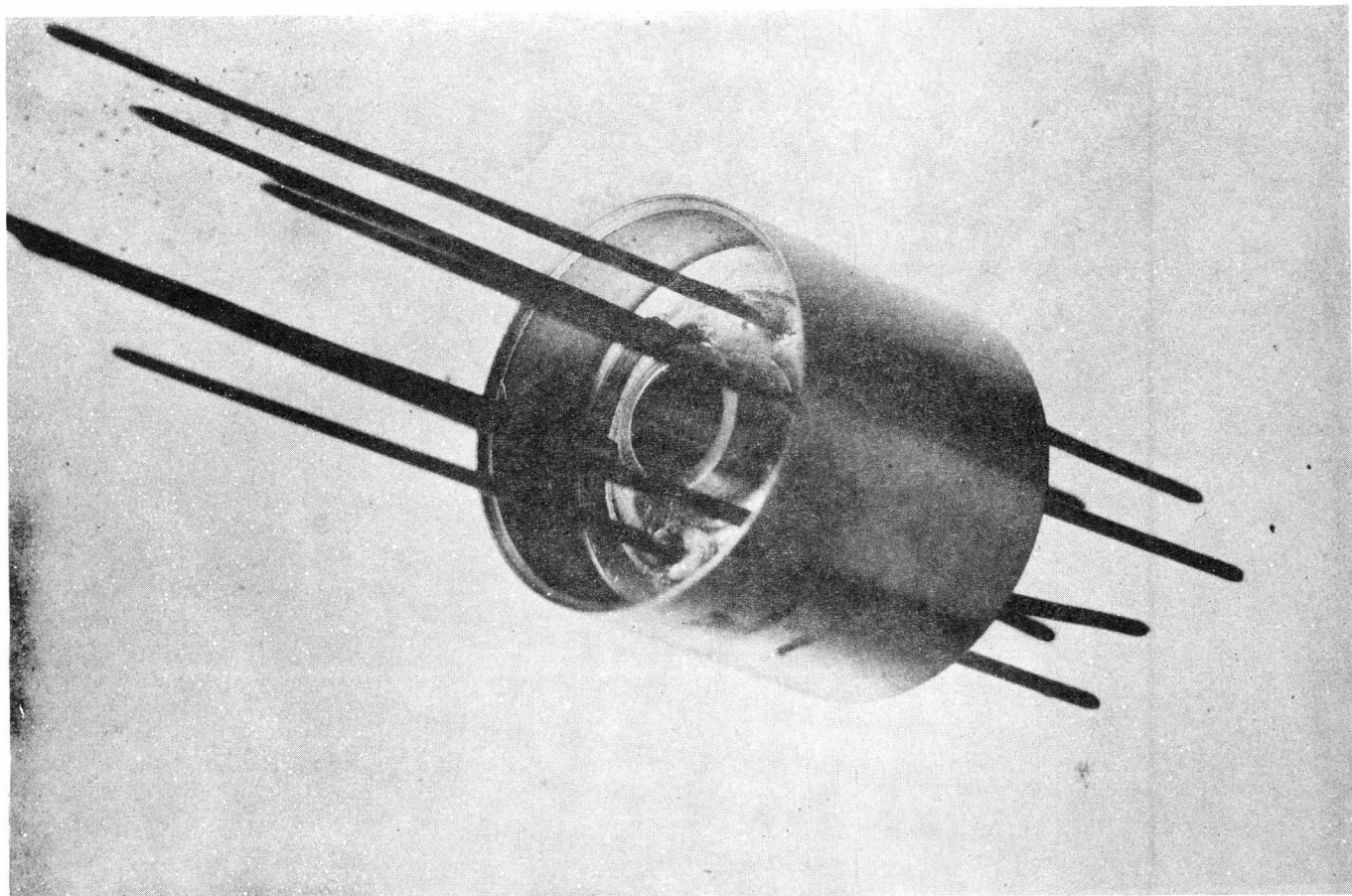
x 60

(e)



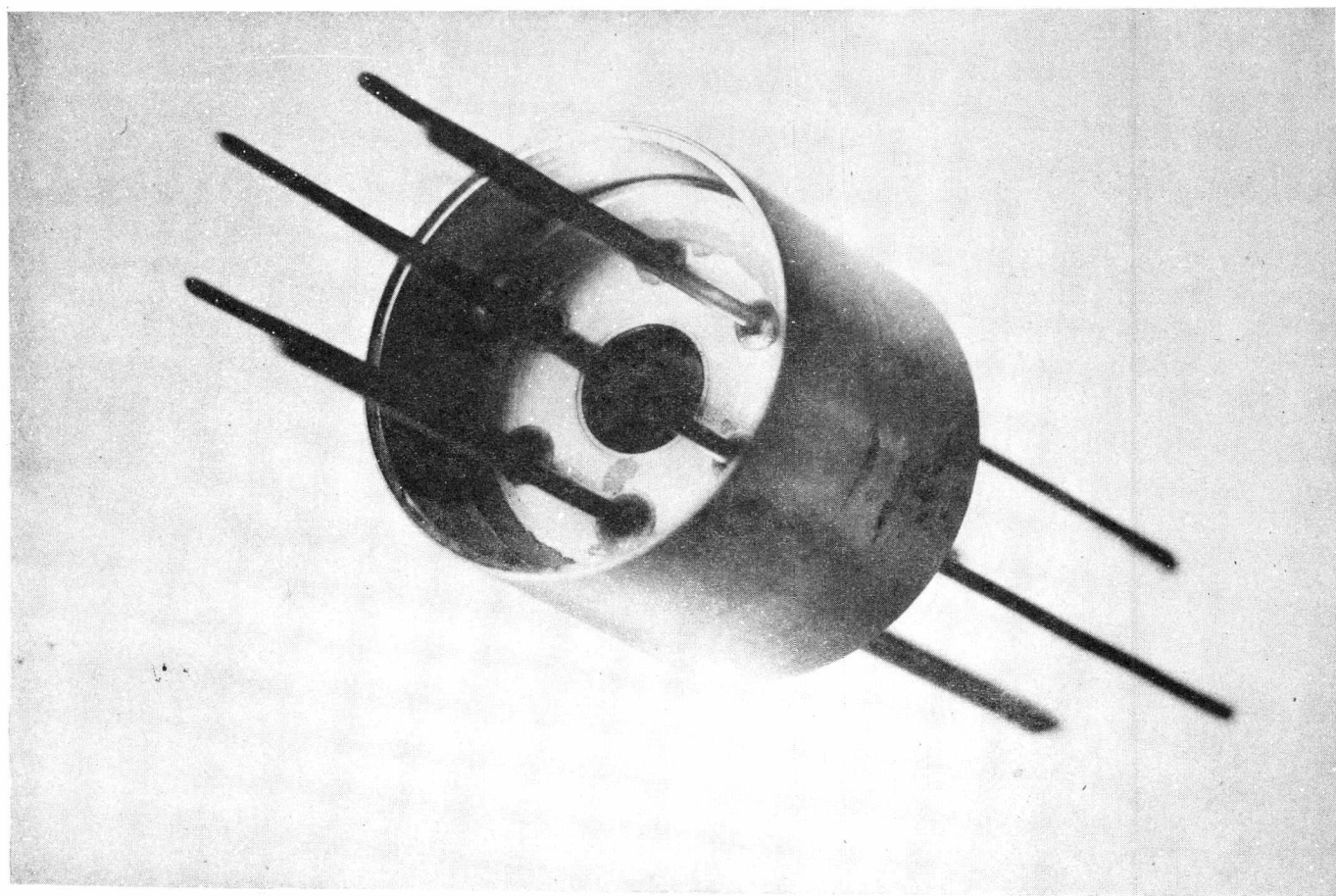
(f)





(a)

Figura 15



(b)