

REPUBLICA ARGENTINA  
COMISION NACIONAL DE ENERGIA ATOMICA  
Dependiente de la Presidencia de la Nación  
GERENCIA DE DESARROLLO

COMPORTAMIENTO FRICCIONAL Y DESGASTE DEL Zr-IV

H.A. FERNANDEZ

J.E. RUZZANTE

J.H. VOSEN

Buenos Aires

1984

## COMPORTAMIENTO FRICCIONAL Y DESGASTE DEL ZIRCALOY IV

H.A. Fernández<sup>\*</sup>, J.E. Ruzzante<sup>\*\*</sup> y J.H. Vosen<sup>\*</sup>

\* Grupo Lubricantes Sólidos - C.I.T. U.T.N.

Medrano 951 (1179) Buenos Aires, Argentina

\*\* Departamento de Materiales - C.N.E.A.

Av. Libertador 8250 (1429) Buenos Aires, Argentina

### RESUMEN

Estudios sobre fricción y desgaste del Zircaloy IV fueron realizados en diferentes condiciones de trabajo y lubricación. Se utilizó un equipo LFW-1 (Alta velocidad) que registra simultáneamente fuerza de fricción, posición del bloque (permite determinar el desgaste), temperatura de probeta y velocidad. Se estudiaron los siguientes tipos de lubricación: a) Sin lubricante; b) Lubricante líquido (con aditivos y aceite mineral blanco); c) Lubricante sólido. En todos los casos se midieron y/o determinaron coeficiente de fricción, temperatura de bloque, fuerza de fricción media, variación en la fuerza de fricción y velocidad de desgaste. Los datos de fricción y desgaste obtenidos permitieron establecer que la lubricación sólida es la única aceptable para las condiciones utilizadas en los ensayos. Se profundizó el estudio de la lubricación sólida por película ligada de  $\text{MoS}_2$  realizando ensayos de transi-

torios de arranque, cuyos resultados se compararon con los obtenidos con probetas de acero. Se analizaron las estructuras metalográficas en la cicatriz de desgaste. Se observó que en las pruebas sin lubricante, con aceite mineral blanco y con aceite SAE 30 HD (uso automotriz), el mecanismo de desgaste era preferentemente por desgarramiento. La lubricación sólida por película ligada resultó óptima, con valores similares a los obtenidos con probetas de acero. Se completa el trabajo con la aplicación de un modelo matemático, desarrollado por este Grupo para los transitorios de arranque.

## INTRODUCCION

Considerando la importancia del Zircaloy IV como material de uso en aplicaciones nucleares y, dada la poca bibliografía existente (ref. 1) sobre sus características tribológicas, es de sumo interés el estudio sobre fricción y desgaste bajo distintas condiciones.

Realizar estudios cuantitativos sobre fricción y desgaste requiere instrumental específico, y los resultados obtenidos no pueden ser generalizados a cualquier condición de trabajo.

Nuestro grupo ha hecho un estudio sistemático para diferentes tipos de lubricación, analizando el desgaste y realizando estudios metalográficos convencionales y con microscopía electrónica. El objetivo básico consistió en obtener resultados sobre fricción, desgaste y lubricación, comparables con similares ensayos realizados con probetas de acero de calidad comercial (Acero 1090). La información obtenida mostró la necesidad de encontrar una lubricación no convencional en Zircaloy. En este sentido se optó por estudiar el comportamiento con lubricación sólida en película ligada de  $\text{MoS}_2$ .

## METODO EXPERIMENTAL Y ENSAYOS REALIZADOS

Las experiencias realizadas en el presente trabajo fueron hechas con una máquina LFW-1 de alta velocidad. Este singular equipo ha sido diseñado expresamente para la lubricación imperfecta, y posee un dispositivo electrónico de detección de información con graforegistrados de 4 canales.

Su fundamento mecánico es simple. Sobre un anillo o probeta que rota con una velocidad seleccionable se apoya un bloque estacionario. Si se desea utilizar lubricante sólido (película ligada) se deposita una película sobre el anillo antes del montaje. Para lubricación líquida se dispone de un recipiente con control de temperatura que posibilita la inmersión parcial del anillo en el aceite a usar.

Se dispone también de un horno con control proporcional de temperatura, el cual permite realizar ensayos de hasta 500°C con lubricación sólida o sin lubricante alguno.

El sistema electrónico de detección, cuando utiliza la máxima ganancia, permite determinar variaciones de fuerza de fricción mayores que 100 gr y asperezas superficiales del anillo mayores que 0,2 micrones. El sistema electrónico puede medir y registrar:

1. Fuerza de fricción

2. Variaciones de fuerza de fricción
3. Excentricidad del anillo
4. Desgaste del bloque
5. Desgaste de la película lubricante
6. Velocidad relativa entre bloque y pista
7. Temperatura del bloque
8. Número de vueltas del eje
9. Fuerza de fricción estática (en el arranque)

Las posibilidades de aplicación de este equipo son muy amplias debido a que se pueden simular condiciones de trabajo muy diversas. Las modificaciones principales que pueden realizarse son:

1. Los materiales de las probetas y su terminación
2. La carga (hasta 286 Kg)
3. La velocidad de rotación del eje (de 0 a 1300 rpm)
4. La rotación del eje a movimiento oscilatorio
5. La temperatura del lubricante (si se utiliza líquido); o la temperatura externa para lubricación sólida o sin lubricación
6. La humedad

Se realizaron ensayos con las siguientes condiciones de trabajo:

1. Sin lubricante; 72 rpm; 13,6 Kg de carga; 5000 vuel-

tas; temperatura variable (ver Tabla 1) entre 50°C y 130°C.

2. Lubricante SAE 30 HD YPF Supermóvil suplemento 1; 72 rpm; 27,2 Kg a 68 Kg de carga; 5000 vueltas; temperatura 43,3°C (ver Tabla 1).
3. Lubricante aceite mineral blanco (64,2 cst); 72 rpm; 68 Kg de carga; 5000 vueltas; temperatura 43,3°C (ver Tabla 1).
4. Lubricante sólido (película ligada de  $\text{MoS}_2$ ); velocidad de rotación variable (10-90 rpm); 286 Kg de carga; 10000 vueltas; temperatura externa variable (37,8 - 100°C)(ver Tabla 3).

Se estudió también el transitorio de arranque con lubricación sólida (película ligada de  $\text{MoS}_2$ ) y se aplicó un modelo matemático (ver Apéndice), calculándose el tiempo de relajamiento, la velocidad de desgaste de película más bloque, y los coeficientes de correlación del comportamiento exponencial y lineal respectivamente (Tabla 4).

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la Tabla 1 se transcriben los valores del coeficiente de fricción ( $\mu$ ) con tipos de lubricación diferentes. Con referencia a dicho cuadro cabe aclarar:  $T_{ext.}$  es la temperatura del medio, ya sea ambiente o la obtenida por medio de un horno calefactor;  $L$  es la carga externa aplicada;  $\bar{f}$  es la fuerza de fricción media entre el bloque (Zircaloy) y el anillo rotante (SAE 52100). Esta magnitud fue medida a través de una celda de carga y registrada considerando los valores de máximo y mínimo correspondientes;  $\Delta f$  es la variación de  $f$  entre los valores de máximo y mínimo;  $T_{bloque}$  es la temperatura del bloque medida en el centro del mismo por medio de una termocupla. Estos valores son registrados simultáneamente con  $f$ .

En la Tabla 2 se representa la velocidad de desgaste del bloque ( $v_d$ ) con los tipos de lubricación indicados precedentemente. Se denomina  $v_d$  a la variación de la profundidad de la cicatriz con el tiempo.

Todos los resultados, excepto los correspondientes al transitorio de arranque, fueron medidos en régimen permanente. Varias de las probetas ensayadas fueron analizadas por SEM y microscopía óptica.

En la foto 1 (obtenida por microscopía electrónica) se observa un detalle del borde saliente del bloque de Zircaloy con un aumento de 25 x. Ciertas zonas fueron ampliadas (fotos 1a, 1b, 1c y 1d). En la foto 2 se observa el borde en trante.

A todas las probetas analizadas por microscopía óptica se les realizó un depósito de Ni sobre la superficie de desgaste a fin de protegerlas mecánicamente. Posteriormente fueron cortadas según planos paralelos al eje de giro y perpendiculares al mismo utilizando una máquina de electroerosión. Sobre la superficie así obtenida se efectuó un estudio metalográfico previo anodizado.

En la Tabla 1 se dan valores de  $\bar{f}$  y  $\mu$  obtenidos para el zircaloy sin lubricación; son sensiblemente menores que los correspondientes a aceros de calidad comercial en idénticas condiciones (ref. 2). Esto se atribuye al desprendimiento de partículas de Zircaloy, como se observa en la foto 1.

En las fotos 3, 4 y 5 se ven algunas de las metalografías obtenidas en la zona de desgaste con fuerte deformación. Es esperable que la pista arranque material, parte del cual se deposita en el borde de salida del bloque tal como se observa en la foto 1. (Comparar con el borde de entrada de la foto 2a). En todas las tomas la parte superior de las probe-

tas está fuera de foco por la misma deformación. Se puede asi mismo encontrar material arrancado en las pequeñas hendiduras ocasionadas por la pista como se observa en la foto 2b. El resto se incorpora al lubricante o bien queda aplastado so bre la pista o el bloque, foto 1a. También debe notarse que la variación de temperatura en el rango ensayado no altera el comportamiento friccional.

Los ensayos con aceite aditivado SAE 30 determinan inequívocamente la pésima lubricación que otorgan en este tipo de experiencias, incluso frente al obtenido con aceite mineral blanco (sin aditivos). Esto, presumiblemente, se debe a reactividad química de los aditivos con el Zircaloy. Asimismo, la lubricación con aceite mineral blanco no muestra un comportamiento adecuado ya que el coeficiente de fricción se mantiene por encima de 0,01 (valor aceptable en las condiciones de trabajo)(ref.2).

Los valores de  $\bar{f}$ ,  $\mu$  y T determinados con lubricación sólida son similares a los obtenidos con probetas de acero co mercial. Esto es muy significativo, ya que permite asegurar que la lubricación sólida por película ligada es adecuada.

De la Tabla 2, el análisis comparativo de los valores de  $v_d$  permite establecer como lubricación más conveniente, en las condiciones de trabajo empleadas, la sólida por película li

gada.

De la Tabla 3 se observa que el coeficiente de fricción disminuye con la velocidad de rotación (aproximadamente 55% entre valores extremos).

El ensayo 2 muestra un resultado atípico, ya que no hay dependencia del  $\mu$  con la temperatura externa en el rango estudiado. Es de destacar que no es usual obtener, en las condiciones expuestas en el primer ensayo, coeficientes de fricción del orden de 0,01 utilizando  $\text{MoS}_2$ . Se supone que el asentamiento de película fue óptimo.

En régimen permanente para una carga de 286 Kg, velocidad de rotación de 72 rpm, temperatura ambiente, se obtuvo:

- Fuerza de fricción: 8 Kg
- Variación de fuerza de fricción: 1 Kg
- Coeficiente de fricción: 0,03

En el transitorio de arranque se determinó un tiempo de relajamiento de 16,8 seg.

Los datos experimentales se ajustan al modelo matemático utilizado (ver Apéndice) con un coeficiente de correlación de 0,98.

Cabe destacar que el tiempo de relajamiento medido dió

del mismo orden que cuando se utiliza acero. Este resultado coincide con lo esperado, debido a que la naturaleza del sustrato no debería influir en la lubricación sólida por película ligada.

La velocidad de desgaste se obtuvo directamente del graforegistro de posición de bloque con los siguientes valores:

- Cicatriz de desgaste al cabo de 10000 vueltas:  $c = 1,6 \text{ mm}$
- Profundidad de desgaste, suponiendo simetría cilíndrica:  
 $d = c^2/8R = 18 \text{ u}$  ( $R = \text{radio de la probeta: } 17,5 \text{ mm}$ )
- Velocidad de desgaste del bloque:

$$v_d = \frac{18 \text{ u} \cdot 72}{10000 \cdot 60 \text{ seg}} = 0,002 \text{ u/seg}$$

La Tabla 4 resume los resultados obtenidos con lubricación sólida por película ligada de  $\text{MoS}_2$ .

## DISCUSION

### a) Ensayos sin lubricante

Presenta desgaste por desgarramiento. Esto se evidencia en la cicatriz de desgaste, ya que se observan partículas macroscópicas en gran cantidad (foto 1). Asimismo, en la pista de acero (anillo) se encuentra un depósito de partículas de Zircaloy deformadas por aplastamiento. Se atribuye fundamentalmente este tipo de desgaste a la dureza del material (92HRb). No obstante, ensayos realizados con probetas de acero de dureza similar mostraron un desgaste significativamente menor, lo que indica la influencia de la estructura y composición de la aleación sobre el comportamiento tribológico.

### b) Ensayos con lubricación líquida

Presenta desgaste por abrasión y desgarramiento. Se observa gran cantidad de partículas desprendidas, decantadas en el recipiente de aceite, evidente desgaste abrasivo en la cicatriz y partículas de Zircaloy aplastadas sobre la pista de acero. Este comportamiento se diferencia del que presenta el acero en el mismo tipo de ensayo cuyo desgaste es principalmente abrasivo. Como dato significativo se transcribe el ancho de la cicatriz de desgaste.

Atribuímos estas diferencias al mecanismo de desgaste,

ya que en el acero el desgaste por desgarramiento es mínimo en estas condiciones. Contrariamente a lo esperado, el aceite con aditivos resultó ser peor lubricante que el aceite mineral blanco (ver Tablas 1 y 2). Este efecto es debido a la reactividad de los aditivos, presumiblemente.

En general, la lubricación líquida en las condiciones ensayadas no es eficiente.

## A P E N D I C E

### COMPORTAMIENTO FRICCIONAL EN SISTEMAS CON LUBRICACION SOLIDA POR PELICULA LIGADA DE MoS<sub>2</sub>. TRATAMIENTO MATEMATICO

Durante los transitorios de arranque se verifica que la fuerza de fricción media es una función monótona decreciente del tiempo (Fig. 1), siendo  $\bar{f}_0$  su valor inicial y  $f_{p0}$  el valor (teórico) inicial para el régimen permanente.

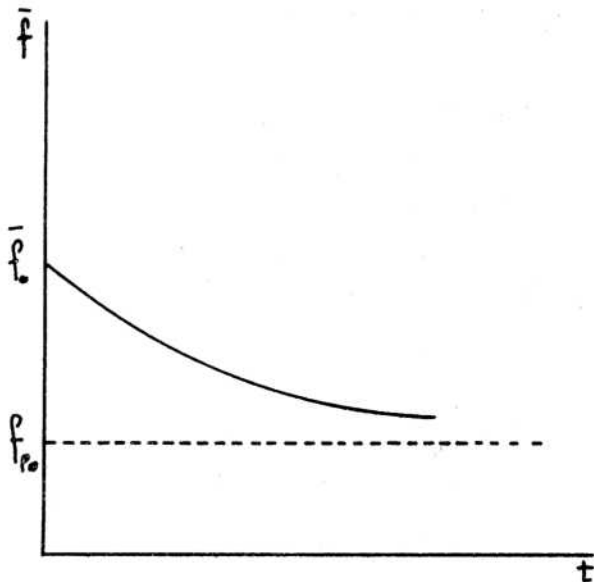


Fig. 1

Este comportamiento puede analizarse cuantitativamente con la siguiente relación:

$$\begin{aligned} \bar{f} &= \bar{f}_{\text{transit.}} + \bar{f}_{\text{perman.}} = \\ &= (\bar{f}_0 - \bar{f}_{p0})e^{-t/\bar{\tau}} - at + \bar{f}_{p0} \end{aligned}$$

siendo  $\bar{\tau}$  el tiempo de relajamiento de la película lubricante, que se define como el necesario para que  $\bar{f}(\bar{\tau}) - \bar{f}_{p0} = 1/e (\bar{f}_0 - \bar{f}_{p0})$ . Se considera

que el régimen transitorio desaparece en  $3\bar{\tau}$ .

Las constantes a determinar con  $\bar{\tau}$ ,  $a$  y  $\bar{f}_{p0}$ , donde  $\bar{\tau}$  mide la "vida" del transitorio,  $a$  se vincula con el desgaste de la película lubricante, y  $\bar{f}_{p0}$  con el espesor inicial de la película de MoS<sub>2</sub>. Pueden ser estimadas por medio de los datos medidos de fuerza de fricción media, a través de un programa numérico, solución (por incrementos finitos) de la ecuación di

ferencial

$$d\bar{f}/dt = - \bar{f}/\tau - at/\tau + (\bar{f}_{p_0}/\tau - a)$$

Asimismo, puede hallarse el coeficiente de correlación entre datos experimentales y proposición teórica para el regimen transitorio (función exponencial) y para el regimen permanente (función lineal).

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al P.P.F.A.E., quien proveyó el material utilizado en este trabajo, a los Ings. Alfredo M. Hey y Juan C. Almagro, por la lectura y discusión del manuscrito, y a los Sres. O. Carpineta y T. Peralta, por la colaboración técnica prestada.

#### REFERENCIAS

- 1) P.L. KO, Wear 55 (1979) 369-384.
- 2) A ser publicado.

COMPORTAMIENTO FRICCIONAL

(Regimen Permanente)

Tipo de lubr.	T ext (°C)	L (Kg)	F̄ (Kg)	Δf (Kg)	T bloque (°C)	μ
S/lubr.	amb.	13.6	5.5	7.4	50 N=3000	0.4
	entre 50 y 130	13.6	7	10 o más	-	0.5
C/lubr. SAE 30 HD Sup. 1	43.3	68	9.9	6.8	52	0.14
	43.3	27.2	1.1	6.5	59	0.4
Ac.Mineral blanco 64.2 Cst	43.3	68	5.9	1.8	46 N=8.50	0.086
Lub.Sol.Pel.	amb	286	9.4	1.9	54 N=10000	0.033
Ligada MoS <sub>2</sub>	amb	286	8.3	1.2	58	0.03

Tabla N°1

Tipo de lubr.	T ext. (°C)	L (Kg)	Vd (u/seg)	Tipo de desg.
S/lubr.	amb	13.6	0.21	Desgarr.
	58	136	0.33	
	60	136	0.21	
	80	136	0.1	
	100	136	0.17	
	138	136	0.16	
C/lubr. SAE 30 Suplem. 1	43.3	68	1.5	Desg. + Abr.
	43.3	27.2	1.65	
Ac.Mineral blanco	43.3	68	0.044	Desg. + Abr.
Lub.Sol.Pel. Ligada MoS <sub>2</sub>	amb	286	0.002	Desgaste Típico Película Ligada

Nota: todos los desgastes excepto el correspondiente a lub.sol.pel.lig. son medidos del gráfico registrado.

Tabla N°2

COMPORTAMIENTO DEL ZIRCALOY  
CON LUBRICANTE SOLIDO PELICULA LIGADA MoS<sub>2</sub>

T ext. [°C]	Frec. Rot. Anillo (rpm)	$\bar{f}$ (Kg)	$\Delta f$ (Kg)	$\mu$
amb.	10	5.37	1.45	0.018
	20	4.25	1.5	0.015
	30	3.12	1.25	0.011
	50	3	1	0.01
	70	3.35	0.75	0.012
	90	2.87	0.75	0.01
37.8	72	9.4	1.3	0.033
60	72	9.88	1.05	0.034
72	72	10.2	1.15	0.035
86	72	10.2	1.15	0.035
100	72	9.75	1	0.034

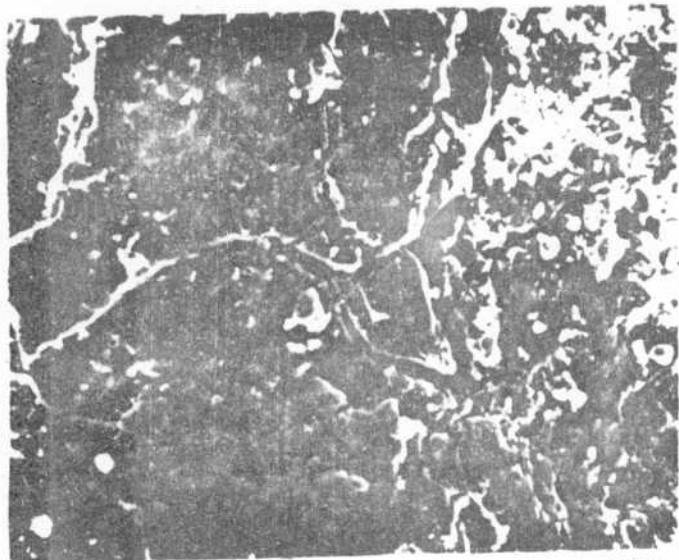
L en todo los casos es 286 Kg

Dureza de las probetas de Zircaloy: entre 170 y 190 Br.

Tabla N°3

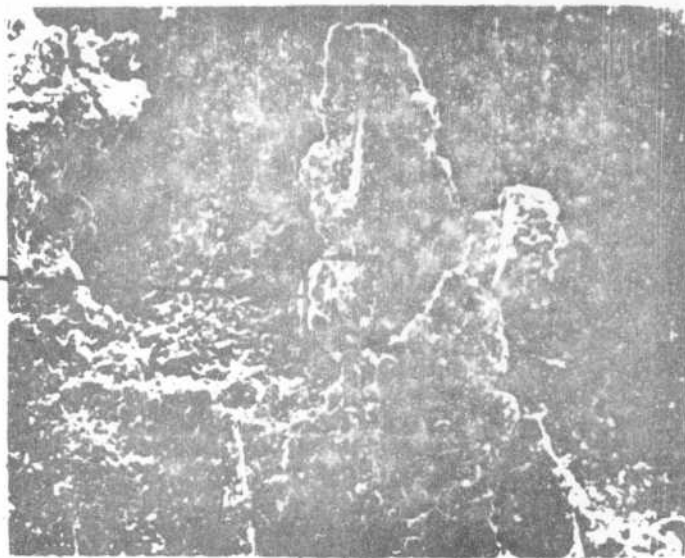
$\bar{\epsilon}$ (seg)	Correl. Reg. Transit.	a (Kg/seg)	fpo (Kg)	Correl. Reg. Perm.
16.8	0.98	-0.002	9.25	0.97

Tabla N°4



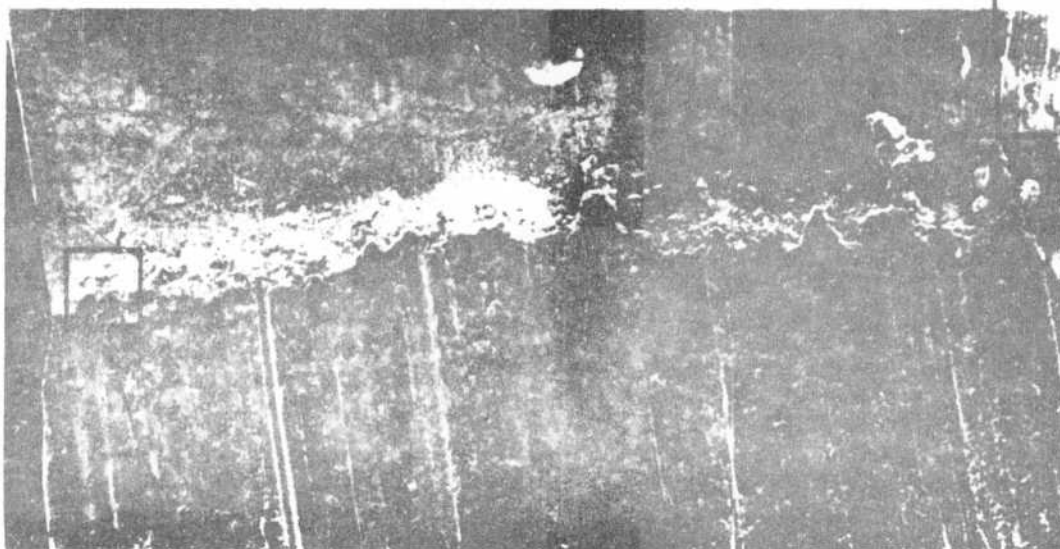
1b

x800



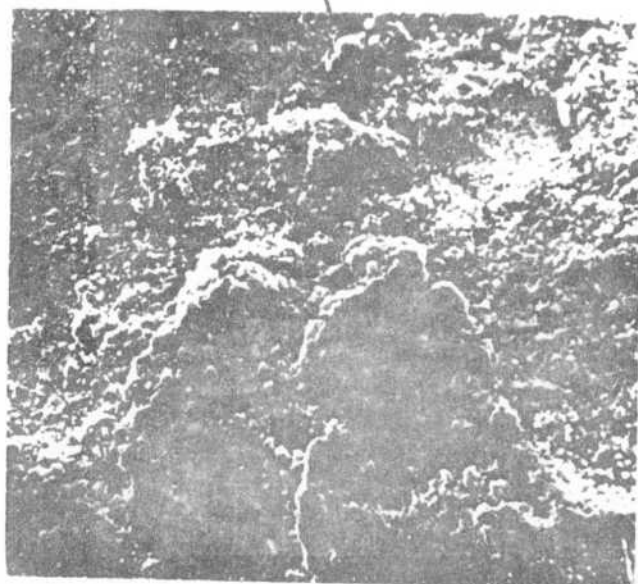
1a

x100



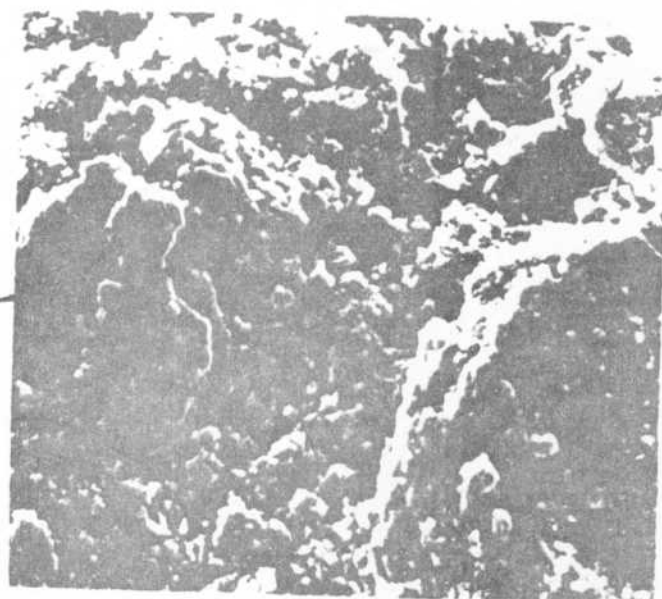
1

x25



1c

x200



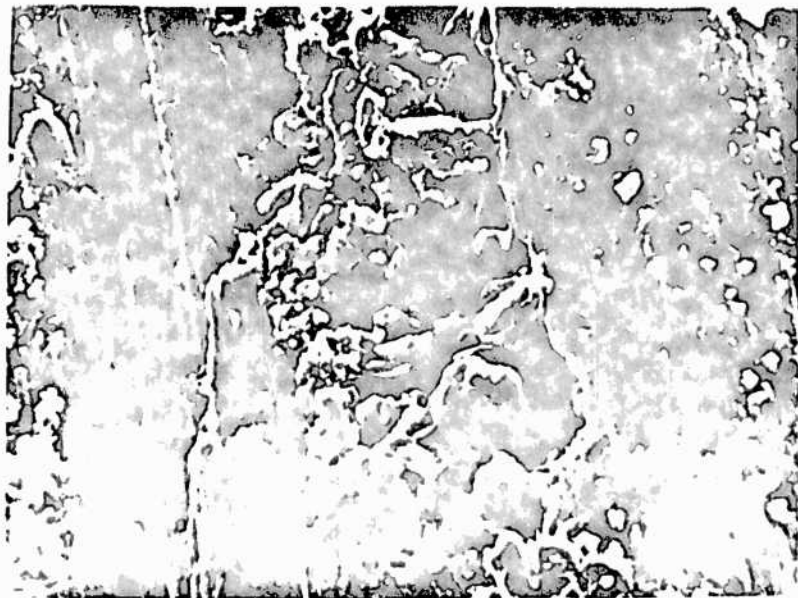
1d

x800



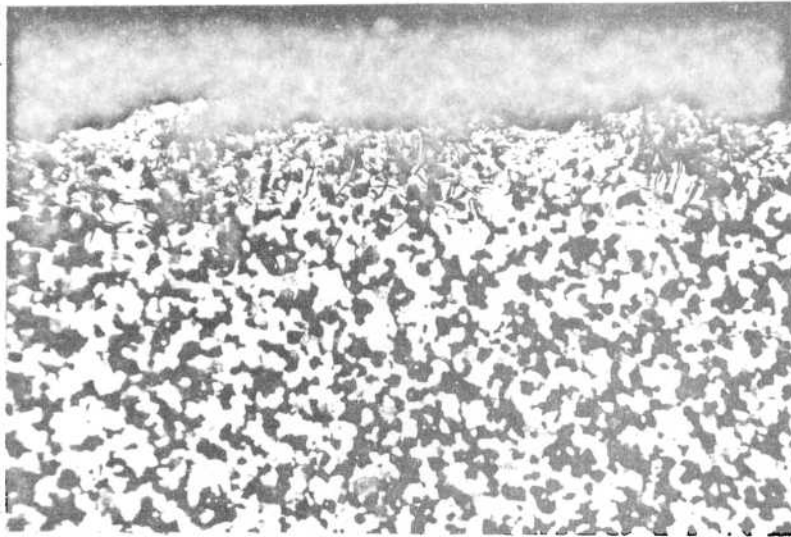
x 25

Foto 2 a



x 800

Foto 2 b



x 100

Foto 3



x 600

Foto 4



x 600

Foto 5