

Tesis de Posgrado

Transferencia de masa desde una lámina oscilante

Lombardi, José Luis

1965

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias Químicas de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Lombardi, José Luis. (1965). Transferencia de masa desde una lámina oscilante. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1265_Lombardi.pdf

Cita tipo Chicago:

Lombardi, José Luis. "Transferencia de masa desde una lámina oscilante". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1965.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_1265_Lombardi.pdf

UNIVERSIDAD NACIONAL
DE
BUENOS AIRES

- FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES -

TRANSFERENCIA DE MASA DESDE UNA LAMINA OSCILANTE

por

JOSE LUIS LONBARDI

TESIS

Presentada para optar al título de

Doctor de la Universidad de Buenos Aires

- - • - -

BUENOS AIRES

JULIO 1965

- - - - oooOooo - - - -

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

TRABAJOS DE BACHILLER EN LA MATERIA DE QUÍMICA

JOSE LUIS BARRERA

Trabajo de la tesis presentada para optar al título de Doctor de la
Universidad de Buenos Aires

1265

BUENOS AIRES
JULIO 1965

Se estudió la influencia de las oscilaciones sinusoidales sobre la transferencia de masa desde una lámina plana. Para ello, se perfora en un viniente esta última por medio de un sistema de biela y volante excéntrico. La velocidad de transferencia de masa se mide como la pérdida de peso de una muestra rectangular de material sublimante colocada en el centro de la lámina mencionada; dividida por el tiempo que dura el ensayo. Los materiales sublimantes utilizados fueron alcanfor y naftaleno.

Las variables ensayadas fueron la amplitud y frecuencia del movimiento oscilante y las dimensiones geométricas de la muestra sublimante. Se hicieron, también, medidas del coeficiente de transferencia de masa de la muestra en reposo.

Los resultados experimentales mostraron que las oscilaciones incrementaban la transferencia de masa. Se obtuvieron valores del coeficiente de transferencia de masa hasta 7 veces mayores en los ensayos oscilantes, que los respectivos para la muestra de iguales dimensiones, en reposo.

La duración de los ensayos no tuvo efecto sobre el valor del coeficiente de transferencia de masa; tanto para los ensayos oscilantes como para los en reposo. Tanto incrementos en la amplitud como en la frecuencia producen aumentos en la velocidad de transferencia. La influencia de ambas era de similar importancia.

Incrementos en el ancho de la muestra; esto es, la dimensión rectangular en el sentido del movimiento tenían un efecto negativo sobre la velocidad de transferencia de masa. No se encontró efecto al variar el largo de la muestra.

Todos los resultados experimentales en ensayos oscilantes fueron

111

correlacionadas en función de un género de Reynolds, definida tomando como longitud característica el ancho de la muestra y como velocidad característica la velocidad promedio de la oscilación, la ecuación resultante es:

$$N_{sh} = 0,41 N_{Re}^{1/2} N_{So}^{1/3}$$

Esta forma de correlación sugiere una similitud entre la transferencia de masa desde una lámina oscilante con la transferencia de masa desde una lámina en reposo a un fluido que pasa sobre ella a velocidad constante. Este último fenómeno es descrito por una ecuación de la misma forma que la presentada aquí, diferenciando el valor de la constante numérica, que en este caso vale 0,56. Se propone, entonces, un desarrollo, que explicaría la similitud mencionada, basándose en la semejanza que presentan los perfiles adimensionales de velocidad en ambos casos.

Esta similitud entre un fenómeno oscilante y una velocidad constante, se encuentra mencionada en la bibliografía para cilindros oscilantes y en reposo. Pueden considerarse cualitativamente similares, por lo menos para bajas frecuencias.



Richard Zanetti

INTRODUCCION

La tecnología moderna, a medida que necesita mejorar el rendimiento de los equipos y plantas industriales emplea nuevas técnicas. Entre ellas las vibraciones, las oscilaciones y el ultrasonido se han desarrollado como un medio de acelerar procesos en los que intervengan transferencias de calor y materia. Se encuentran en la literatura variados ejemplos de aplicación.

Smoot y Babb (36); Behmoiras, Brill y Krumholz (3); Konovalov y Romankov (21) muestran que las pulsaciones incrementan las performances de columnas de extracción líquido-líquido. Según los trabajos de Kitsov (19); Kalashnikov y Cherniken (18) se mejora la transferencia de calor y por medio de vibraciones. Burenkov (8); Ginsthing (15) en la difusión a través de materiales celulares como algodón y caña de azúcar; Bressnajder (7) y Bradford (6), en equipos de disolución; y Saint James (33), en procesos de sublimación; encuentran que las oscilaciones aceleran los respectivos procesos.

También se han estudiado sus efectos en reactores donde además de la reacción química existen procesos difusivos: v.g., Biskis (4) en la hidrogenación catalítica de metilcistireno, Siromyatnikov (35) en la combustión del carbón y Auerbach (2) en procesos heterogeneos diversos.

La indeterminación de las áreas interfaciales y la fluidodinámica de los sistemas anteriormente mencionados impide llegar a conclusiones generales. El estudio básico de estos fenómenos exige la utilización de sistemas de trabajo más sencillos con la intención de llegar a predecir la influencia de las oscilaciones sobre las velocidades de transferencia de calor y de masa. Dichos sistemas han sido, en general, sólido-fluido.

Se pueden distinguir dos grupos de trabajos. En el primero se incluyen los que estudian el efecto combinado de un flujo de fluido al que se le sobrepone una oscilación.

Se hace solo una breve mención de los mismos, porque se los considera poco relacionados con el presente trabajo. En transferencia de calor se encuentran los trabajos de Faná y Cheng (12) y Kubanskií (25) quienes producían la oscilación por medio de ondas sonoras; Sreevinasan y Ramachandran (38); Anantarayanan y Ramachandran (1) y Van der Hogge Zijnen (39) quienes vibraban un alambre calentado eléctricamente en una corriente de aire. En transferencia de masa los estudios consistieron en hacer pasar un flujo líquido pulsante a través de: un tubo vacío de pared soluble, Krasuk y Smith (22); y a través de una columna con material soluble, Shirotuka y Honda (34) y Krasuk y Smith (23).

En el segundo grupo se incluyen los trabajos dedicados al estudio del efecto de la vibración solamente, sin flujo neto del fluido. Se pueden distinguir dos métodos para la experimentación: a) el sólido se mantiene en reposo y se imprime una vibración al fluido por medio de una onda sonora, y b) el sólido es agitado en el fluido, generalmente por medio de un sistema biela-manivela. Los dos métodos tienen el mismo objeto de crear una velocidad relativa oscilante entre el sólido y el medio. En los dos casos la geometría más utilizada ha sido el cilindro circular sometido a vibraciones transversales; es decir, normales a su eje longitudinal.

La mayoría de los trabajos experimentales han sido realizados para transferencia de calor, a pesar de su mayor complejidad. En efecto, en este caso los mecanismos posibles de transporte son: conducción convección natural y convección forzada. En cambio, cuando se produce una transferencia de masa, el transporte por convección natural puede hacerse despreciable. Por otra parte; el gradiente de temperatura obliga al uso de propiedades medias, mientras que un gradiente apreciable de concentraciones puede no modificar las propiedades del medio.

Dentro del método a) se encuentran los trabajos de Kubanskii (24) (26) quien estudió el efecto de un campo de sonido estacionario sobre un cilindro horizontal, calentado, en aire. Fand y Kaye (13) estudiaron la influencia de un campo sonoro transversal sobre un cilindro horizontal. El diámetro del cilindro fué de 1,91 cm. Los datos mostraban que hasta un cierto nivel de vibración ($Af = 10,9$ cm./seg) su influencia era despreciable; a partir de $Af = 21,6$ cm/seg y para una relación amplitud a diámetro del cilindro mayor de 6 ($A/D_0 = 6$) el coeficiente de transferencia podía ser correlacionado por la ecuación

$$h_p = 0,722 \left[\Delta T (Af)^2 P \right]^{1/3} \quad (1)$$

donde P es un factor geométrico definido en (13), su valor numérico se aproxima a la unidad cuando la relación entre la media longitud de onda y el diámetro del cilindro tiende a infinito. Realizaron un estudio fluidodinámico por medio de humo, el cual les reveló la existencia de un definido tipo de flujo que llamaron termoacústico. No se han realizado trabajos en transferencia de masa siguiendo este método.

Dentro de los estudios siguiendo el método b), el primer trabajo que aparece como importante es el de Martinelli y Boelter (30) quienes estudiaron el efecto de vibraciones verticales hasta 40 c.p.s. sobre la transferencia de calor de un tubo de 1,91 cm., calentado y sumergido en un tanque de agua. Sus ensayos fueron repetidos y ampliados, usando tres diferentes diámetros de tubo, por Boelter y Mason (5); pero sólo se obtuvo una coincidencia cualitativa en los resultados. Recientemente se dió como explicación de estas diferencias la cavitación de burbujas de aire contenidas en el agua (27). Lemlich (28) estudió la transferencia desde un alambres calentados, dispuestos horizontalmente. Los diámetros que utilizó fueron 0,0642; 1,005 y 2,290 cm vibrando hasta 0,292 cm. de amplitud

y entre 39 y 122 c.p.s. de frecuencia. Llegó a correlacionar sus datos por medio de la ecuación

$$h_p = 0,75 + 0,0031 \frac{N_{Re}^{2,05} \beta \Delta T}{[N_{Gr} N_{Pr}]^{0,41}} \quad (2)$$

que era válida tanto para vibraciones horizontales como verticales. Propuso una correlación alternativa, que será discutida mas adelante.

Fand y Kaye (14) estudiaron también la transferencia desde un cilindro oscilado por medios mecánicos. En este trabajo el diámetro usado fué de 2,22 cm y el rango de trabajo era: amplitud 0- 0,407 cm; frecuencia 54 - 225 c.p.s.; intensidad de vibración 0- 1,22 pie/seg. La influencia de la vibración era despreciable hasta $A_f = 0,3$ pie/seg ; a partir de $A_f = 0,9$ pie/seg los datos eran correlacionados por la ecuación

$$h_p = 0,847 \frac{\Delta T}{D_c} (A_f) \quad (3)$$

Visualizaron el flujo por medio de humo; este ensayo indicó que el mecanismo por el cual aumentaba la transferencia de calor era una turbulencia inducida por el movimiento pulsante. El flujo que se presentaba en este caso era totalmente distinto al que habían denominado flujo termoacústico.

Deavec, Penney y Jefferson (11) hicieron vibrar un alambre delgado calentado eléctricamente, en agua. Su rango de trabajo fué de grandes amplitudes (hasta 7,01 cm.) y bajas frecuencias (entre 0 y 4,25 c.p.s.). Sus datos muestran una zona en la que predomina la convección natural, una zona de transición y una zona de convección forzada. En la primer zona el coeficiente de transferencia de calor aparece como función del producto de los numeros de Grashof y Prandtl; en cambio, en la última, los datos se correlacionan con

$$\frac{N_{Nu_p}}{N_{Pr}} = 0,35 + 0,48 N_{Re_p}^{0,52} \quad (4)$$

usando como longitud característica el diámetro del alambre y como velocidad característica, su velocidad promedio $2Af$. Como ellos hacen notar, la ecuación 4 es idéntica a la propuesta por Mc Adams (31) para la transferencia de calor desde un cilindro en reposo a un líquido pasando a velocidad constante sobre él; excepto por el coeficiente del número de Reynolds, que en este último caso es igual a 0.56. No realizaron ningún tipo de visualización de flujo.

Dentro de este método de ensayo se encuentran solo dos trabajos en transferencia de masa.

Lemlich y Levy (29) oscilaron en aire cilindros de material sublimante de 0,7 a 2,1 mm de diámetro. Usaron frecuencias entre 20 y 118 c.p.s. y amplitudes entre 0,23 a 3,78 mm. Sus resultados fueron correlacionados por la expresión

$$\frac{k_p}{k_o} = 0,038 N_{ReS}^{0,85} N_{Sc}^{1,13} \quad (5)$$

La longitud característica usada es el doble de la amplitud más el diámetro del cilindro. La ecuación 5 es análoga a la siguiente

$$\frac{h_p}{h_o} = 0,038 N_{ReS}^{0,85} N_{Pr}^{1,13} \quad (6)$$

que es la que se mencionó como correlación alternativa propuesta por Lemlich en el trabajo (28). Se propone entonces como modelo fluidodinámico una zona perfectamente agitada, inmediata al alambre, rodeada por una zona de fluido prácticamente en reposo. Este esquema sería consistente con la forma de correlacionar los datos, puesto que la dimensión característica de la zona perfectamente agitada es la usada en la definición del

N_{ReS} .- Pand y Cheng (12) discuten este modelo y el propuesto por Kubanskii (24), quien sugiere la creación de un flujo acústico en las cercanías del cilindro vibrante, basado en un desarrollo de West (40). Hacen notar que este desarrollo es válido para una relación amplitud a diámetro menor de 0,5. Proponen que la situación fluidodinámica que se presentaba en dichos experimentos podía ser mejor descripta como una convección forzada no estacionaria; que no está en desacuerdo con las hipótesis de Lemlich, pero, describiría mejor el fenómeno. Por otra parte, citan el ya mencionado artículo de Deaver, Penney y Jefferson(11), recalcando el hecho de que estos correlacionaron sus datos en los términos usuales de convección forzada sin vibración.

En un trabajo reciente Jameson (17) desarrolla una ecuación teórica para transferencia de masa desde un cilindro oscilante a partir de la fluidodinámica conocida. La ecuación propuesta es

$$N_{Sh_p} = 0,746 N_{Re_p}^{1/2} N_{Sc}^{1/3} A/R_o^{1/6} \quad (7)$$

Las aproximaciones realizadas hacen que sólo sea válida para valores altos de N_{Re_p} y R_o/A . Realizó ensayos, usando cilindros de ácido benzoico de 1,10 en de diámetro oscilados en una solución de agua y glicerina. Trabajó con valores de A/R_o iguales a 0,102; 0,198 y 0,298; en el rango del número de Reynolds entre 2 y 80. Sus datos experimentales responden a la tendencia que indica la ecuación 7, pero son mayores en un 50 % a los valores calculables según esa expresión. En la tabla I se resumen los trabajos que se hicieron oscilando cilindros en distintos fluidos. Surge de su observación la imposibilidad de hacer generalizaciones en un amplio rango de parámetros controlantes. Si bien el rango del número de Reynolds es muy similar en todos, la funcionalidad con el producto Af varía desde un medio en (11) hasta la unidad en (14).

En el presente trabajo se eligió una geometría que todavía no había sido estudiada. Se investigó la transferencia desde una superficie oscilante, horizontal y plana. Presenta una fluidodinámica bien conocida y por ende la posibilidad de un análisis teórico más sencillo que las utilizadas formas cilíndricas.

DATOS COMPARATIVOS DE TRANSFERENCIA DE MASA DESDE CILINDROS OSCILANTES

Autor	Lemlich	Deaver et al.	Fand y Kaye	Jameson
Re.	(28) (29)	(11)	(14)	(17)
D_o cm	0,064 a 0,206	0,0178	2,22	1,27
F	39 a 122	0 a 4,25	54 a 225	25 a 500
O.P.S.				
A cm		0 a 7,01	0 a 0,46	0,127 a 0,381
Longitud	$2A+D_o$	D_o	D_o	R_o
Característica				
N_{Re}	10-200	10-100	0-400	2-80
CORRELACION	$\frac{h_p}{h_o} = 0,038 N_{Re} N_{Pr}^{0,85} 1,13$	$\frac{N_{Nu}}{N_{Pr}^{0,3}} = 0,35 + 0,48 N_{Re}^{0,52}$	$h_p = 0,847 \frac{\Delta T}{D_o} (A/F)$	$N_{Sh_p} = 0,746 N_{Re}^{1/3} N_{Sc}^{1/6} (A/R_o)$ (teórica)
				$N_{Sh_p} = 1,28$ id. id. (experimental)

PARTE EXPERIMENTAL

EQUIPO

El equipo, cuyo esquema se muestra en la fig. 1a., consistió en una lámina de lucite de 30 cm de lado y 4 mm de espesor; en cuyo centro había una abertura rectangular donde se colocaba el portamuestra. La lámina estaba sostenida en su parte inferior por cuatro pilares, quienes estaban asegurados a su vez, a un marco metálico rectangular, montado en dos guías fresadas de 12 cm de largo, lo que le permitía desplazarse horizontalmente.

El marco se accionaba mediante un sistema de volante -manivela excéntrica. De este modo, el marco y correspondientemente la lámina, estaban animados de un movimiento sinusoidal puro, dentro de límites prácticos. La rotación del volante se producía por medio de un motor asincrónico de 1/5 HP cuya velocidad se variaba por medio de un reóstato. Con el objeto de comprobar la influencia de las vibraciones del motor se hicieron ensayos con un motor síncrono de 80 r.p.m.

La variación de amplitud del movimiento oscilatorio se conseguía por medio de distintas perforaciones roscadas en el volante, donde se introducía el tornillo que hacía de buje a la manivela.

Se usaron tres distintos portamuestras, los cuales consistían en láminas de bronce, exteriormente del mismo tamaño de la abertura de la lámina de lucite, de modo que podían insertarse fácilmente en esta última, quedando a un mismo nivel. Cada portamuestra poseía sendos orificios rectangulares de igual largo, 10 cm., pero, de respectivamente 0,5 ; 1,0 y 2,5 cm de ancho.

En la fig. 1b se muestra el esquema de un portamuestra.

PROCEDIMIENTO

Los ensayos se realizaron en un cuarto cerrado de doble puerta, con el objeto de prevenir corrientes de aire.

La muestra se preparaba fijando la cara expuesta del portamuestra contra un vidrio plano y vertiendo el material fundido (naftaleno e alcanfor) en el interior. Una vez solidificado, se retiraba el vidrio y se examinaba la muestra, descartando aquellas que presentaban irregularidades en su superficie o en las interfase bronce-material sublimante. Algunas muestras de alcanfor fueron preparadas por presión del material molido colocado dentro del portamuestra, reemplazando la lámina de vidrio por una de bronce pulido. En todos los casos, se dejaba la muestra suficiente tiempo de modo que alcanzara la temperatura ambiente.

El ensayo se realizaba pesando el portamuestra cargado y colocándolo en la lámina de lucite. Después de hacerla oscilar un tiempo medido; se retiraba el portamuestra y se pesaba nuevamente. La masa transferida se medía como la diferencia entre esas dos pesadas, desechando las pérdidas entre pesada inicial y puesta en marcha y parada y pesada final, porque ensayos previos mostraron que estas eran menores del 0,5 % de la pérdida total.

Se cuidó que la concentración promedio del material sublimante en el cuarto, nunca fuera mayor del 1 % de la concentración de saturación. Además, con el objeto de impedir la acumulación, el aire del cuarto se renovaba totalmente entre experiencias, por medio de un soplador.

La amplitud y frecuencia del movimiento oscilatorio se variaban como se indicó anteriormente; el ancho de la muestra, se varió por el uso de los tres distintos portamuestras. La influencia del largo se estudió, tapando la mitad de las dos muestras de mayor ancho, por medio de un papel impermeable.

Se trató de estudiar el estado de movimiento de mg

nera visual. Para ello se emplearon humos de cloruro de amonio producidos "in situ"; se observó la presencia de una película laminar, inmediata a la placa, para todo el rango de condiciones usado en los ensayos.

La temperatura del cuarto fue medida con un termómetro con una precisión de 0,1 °C. Se usó un taquímetro para medir la velocidad de rotación del motor.

En todos los casos la dirección de la oscilación fue la del ancho de la muestra. Los ensayos se hicieron de distinta duración de modo de analizar la influencia de esta variable.

También se realizaron ensayos sin movimiento, con el objeto de evaluar el incremento producido por la pulsación.

RANGO DE TRABAJO

El coeficiente de transferencia de masa fue medido en las siguientes condiciones:

Frecuencia	: 0 - 80 - 160 - 240 F.p.m.
Amplitud	: 1,2 - 2,0 - 3,0 - 4,0 - 5,0 cm
Presión	: 1 At
Temperatura	: entre 15 y 25 °C
Ancho de la muestra	: 0,5 - 1,0 - 2,5 cm
Largo de la muestra	: 5,0 - 10,0 cm
Duración	: entre 1 y 5 h
Sustancias	: alcanfor y naftaleno

CALCULOS

El coeficiente de transferencia de masa promedio en el tiempo fué calculado según la siguiente fórmula:

$$\bar{k} = \frac{\Delta m R T_s}{t p^* S H} \quad (8)$$

La ecuación 8 es válida porque la presión parcial promedio del material sublimante se mantuvo siempre menor que el 1 % de la presión de vapor p^* .

En esta expresión p^* es la presión de vapor del material sublimante a la temperatura de la superficie T_s solamente por dos términos; uno que corrige el enfriamiento debido a la sublimación y otro que tendría en cuenta el calentamiento debido a la fricción. Sus valores son menores de 0,05 °C y por consiguiente, su emisión no produce un error apreciable en la estimación de p^* .

La presión de vapor y coeficiente de difusión del naftaleno fueron tomados de la referencia (16). La presión de vapor del alcanfor fué tomada de la misma referencia; pero, el coeficiente de difusión fué estimado en base a la teoría de Chapman-Enskog (32) basando el cálculo de los parámetros en la temperatura de fusión. Es interesante destacar que estimaciones de dicho coeficiente usando la fórmula de Gilliland corregida (32) dan resultados que difieren en un 50% con el anterior.

Los valores usados han sido:

	D	cm ² /seg	H_{30}
Naftaleno (25 °C)		0,0612	2,56
Alcanfor (25 °C)		0,030	5,15

RESULTADOS

Un análisis estadístico de los datos demostró que la duración del ensayo no afectaba el valor del coeficiente de transferencia tanto para los ensayos con oscilación como para los estáticos.

Una curva típica del efecto de la amplitud y la frecuencia de la oscilación sobre el coeficiente de transferencia de masa se muestra en la figura 2. Se obtuvieron incrementos de hasta 7 veces en el valor del coeficiente de transferencia de masa en reposo. El efecto aumenta con la frecuencia y la amplitud. La influencia de las dos variables aparece de igual importancia.

En iguales condiciones de oscilación, el coeficiente de transferencia de masa disminuía con un aumento del ancho de la muestra; no afectando el resultado un cambio en el largo de la misma. En los ensayos sin oscilación también el ancho influía inversamente sobre el coeficiente de transferencia.

Todos los datos de los ensayos con oscilación son presentados en la figura 3, y pueden ser correlacionados por la ecuación 9 con una desviación media del 9,1%.

$$\bar{N}_{Shr} = \frac{k_p}{D} W = 0.41 N_{Re_p}^{1/2} N_{Sc}^{1/3} \quad (9)$$

El número de Reynolds ha sido definido teniendo en cuenta la velocidad promedio de la lámina \bar{u} que es igual cuatro veces la amplitud dividido por el período de la oscilación

$$\bar{u} = \frac{4 A}{T_0} = \frac{2}{\pi} \omega A \quad (10)$$

Como la longitud característica se tomó el ancho de la muestra W ; esto es la dimensión geométrica en el sentido de la oscilación.

Con el objeto de incluir en un gráfico todos los datos, incluso los de ensayos sin oscilación, se presenta la fig.4 en la que sólo se ha modificado el tipo de escalas. Dichos datos aparecen en el eje de ordenadas ($N_{Re_p} = 0$); en esta última fi-

gura; el número de Sherwood fué arbitrariamente definido, tomando como longitud característica, el ancho de la muestra. El exponente del número de Schmidt no está determinado experimentalmente; dada la inexactitud de los datos de difusividad del alcanfor. Su valor se justifica en el siguiente párrafo.

DISCUSION DE RESULTADOS

La fluidodinámica de una lámina infinita oscilando en un espacio infinito; ha sido estudiada extensamente. Slichting (40) presenta las soluciones teóricas para los estados transitorio y estacionario de transferencia de cantidad de movimiento. La parte transitoria de la solución se hace despreciable al cabo de un cierto tiempo; lo que permite suponer que los ensayos experimentales se realizaron prácticamente en condiciones estacionarias, debido a su relativamente larga duración. Para dichas condiciones, el perfil de velocidades responde a la ecuación

$$(u_x)_{z=z} = A \cdot \exp \left[-(\omega \rho / 2\mu)^{\frac{1}{2}} z \right] \cdot \cos \left[\omega t - (\omega \rho / 2\mu)^{\frac{1}{2}} z \right] \quad (11)$$

donde el sistema de ejes es el señalado en la figura 1; siempre que la lámina se desplace según la ecuación

$$(u_x)_{z=0} = A \cos \omega t \quad \text{de } \frac{u}{w} = \frac{u}{\omega \cdot \beta} \quad (12)$$

La expresión 11 aparece graficada en la figura 5, donde se muestran los perfiles de velocidad para distintos instantes dentro de medio período.

Pese a sus dimensiones finitas, la semilongitud de la lámina fué siempre mayor que la amplitud de la oscilación usada; de modo que es posible suponer que el perfil de velocidades en la zona donde se encontraba la muestra correspondía a la ecuación 11.

Realizando un balance de materia en un elemento de volumen del espacio que rodea a la placa, se obtiene

$$(u_x)_{z=z} \frac{\partial c}{\partial x} + D \nabla^2 c = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (13)$$

donde $(u_x)_{z=z}$ corresponde a la ecuación 11. Como es evidencia experimental, el coeficiente de transferencia de masa no es función del tiempo; es posible suponer que la transferencia de masa también se realiza en estado estacionario, de modo que el 2° miembro de 13 es nulo, convirtiéndose en

$$(u_x)_{z=z} \frac{\partial c}{\partial x} + D \nabla^2 c = 0 \quad (14)$$

La solución analítica de 14 con las adecuadas condiciones de contorno sería la solución del problema; pero, esta expresión es demasiado complicada aún como para resolverla utilizando métodos numéricos. Frente a esa imposibilidad, se puede intentar una descripción cualitativa del fenómeno. Es posible imaginar que la transferencia del material sublimante se realiza a través de dos zonas consecutivas:

la primera, mas cercana a la lámina, sería la delgada capa perturbada por el movimiento oscilatorio. Su existencia estaría sugerida visualmente por el ensayo con humos de ClNH_4 . Admitiendo que esta zona es muy delgada, surge que la transferencia en el sentido del eje y será despreciable. Además, el mecanismo de transporte debe ser esencialmente convectivo, de modo que en el sentido del eje x la transferencia por difusión puede ser despreciada. Por consiguiente el balance de materia será una forma reducida de la ecuación 14

$$(u_x)_{z=z} \frac{\partial c}{\partial x} + D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} = 0 \quad (15)$$

La segunda de las zonas mencionadas anteriormente, estaría más alejada de la lámina y no perturbada por el movimiento oscilatorio, prácticamente en reposo. La transferencia se realizaría por un mecanismo difusional puro y por consiguiente, valdría una expresión de la forma

$$\nabla^2 c = 0 \quad (16)$$

con una simetría aproximadamente esférica. En el apéndice se demuestra que este tipo de transferencia tiende a un estado estacionario; justificándose así los hechos experimentales.

Resumiendo, se puede describir el fenómeno de la siguiente manera: el material sublimante se transfiere por un mecanismo convectivo en flujo laminar a través de una delgada

capa de fluido adyacente a la lámina, para luego difundir por un medio en reposo, en las tres direcciones del espacio. La primera de estas dos etapas debe ser la más lenta puesto que, la oscilación tiene un marcado efecto sobre la velocidad de transferencia de masa y la única variable geométrica importante es la dimensión de la muestra en el sentido del movimiento oscilatorio. Se alcanza un estado estacionario por las características de la zona de difusión pura.

De lo antedicho, surge que la solución de la ecuación 15 debe interpretar los datos experimentales. Desafortunadamente, se tropieza con el mismo problema que frente a la ecuación 14. (Nota 1).

(Se hicieron algunas tentativas para resolver la ecuación 15 por métodos numéricos, pero su realización excedía la capacidad de la computadora del Instituto del Cálculo).

El único camino que aparece viable es realizar la siguiente aproximación. En la fig. 5 se han marcado los puntos de máxima velocidad más cercanos a la lámina. Si ahora se interpreta el sistema como si el aire estuviera fluyendo sobre la lámina y esta permaneciera en reposo; sería posible expresar una velocidad del aire relativa a la lámina quieta como

$$(u_x)'_{z=z} = (u_x)_{z=z} - (u_x)_{z=0} \quad (17)$$

Si $z=Z$ en los puntos de máximo anteriormente mencionados, la velocidad en dichos puntos será

$$(u_x)'_{z=Z} = (u_x)_{z=Z} - (u_x)_{z=0} \quad (18)$$

En la fig. 6 se grafica $(u_x)'_{z=z} / (u_x)'_{z=Z}$ vs. z/Z para distintos instantes del período; comprobándose que existe un solo perfil generalizado. En este caso, el espesor Z , que puede ser asimilado a una capa límite, no es función de la posición, ya que para un instante dado es igual en toda la zona central de la

lámina; sino que depende del instante del período considerado, es decir del tiempo.

Es interesante comparar el perfil generalizado descrito anteriormente con el ya conocido perfil para el caso de un fluido de velocidad de aproximación constante fluyendo sobre una lámina plana en reposo. En este caso el espesor de capa límite no varía con el tiempo, sino con la distancia a medida que el perfil va desarrollándose desde el borde de entrada. Para regular esta comparación, se grafica en la misma fig. 6 la relación $(v_x)_{z=\delta} / (v_x)_{z=\delta} vs. x/\delta$ obtenido en Knudsen y Katz (20). La coincidencia entre ambos perfiles es bastante buena, prescindiendo de la diferente forma en que se desarrollan ambos; uno en la distancia y el otro en el tiempo. El problema de transferencia de masa desde una lámina plana sobre la cual fluye un fluido de velocidad de aproximación constante está descrito por el siguiente balance de materia

$$v_x \frac{\partial c}{\partial x} + v_z \frac{\partial c}{\partial z} = D \frac{\partial^2 c}{\partial z^2} \quad (19)$$

Teniendo en cuenta que para zonas muy cercanas a la lámina v_z es muy pequeña la ecuación 19 se reduce a la forma de la ecuación 15. La solución teórica de la ecuación 19 ha sido dada por Polhausen (20) para el problema análogo de la transferencia de calor y confirmada experimentalmente por Christian y Kexios (9). Esta es:

$$N_{Sh_L} = 0,66 N_{Re_L}^{1/2} N_{Sc}^{1/3} \quad (20)$$

En esta ecuación se usa como longitud característica la longitud de la superficie transfiriente en el sentido del flujo de aire y como velocidad característica, la de aproximación. Se observa una bien marcada similitud funcional entre la ecuación 20 y la correlación experimental 9. La similitud entre las ecuaciones representativas de los dos fenómenos (Ecuaciones 15 y 19), unido al hecho anteriormente señalado de que los perfiles generalizados de velocidad son similares; permite aclarar porqué la transferencia

en el sistema pulsante es cualitativamente similar a la que produciría un flujo de aire de velocidad constante igual a la velocidad promedio de la lámina, fluyendo sobre la muestra en reposo. No es posible encontrar una coincidencia absoluta debido a la desigualdad existente entre ambos mecanismos. Además del error introducido como consecuencia de promediar la velocidad, la analogía total con la ecuación 20 implicaría que al comienzo de cada ciclo los perfiles de velocidad y concentración fueran planos; una inspección a la fig. 5 indica que eso no es cierto. Estas discrepancias explicarían las diferencias entre los valores de las constantes numéricas de las ecuaciones 9 y 20. Esta transformación del problema pulsante en una convección forzada es análoga a la encontrada por Deaver, Penney y Jefferson (11), como ya se señaló en la introducción. Pese a la escasa información existente, se puede pensar que esta similitud es debido a la baja frecuencia empleada en ambos trabajos. Las discrepancias que se señalaron al comentar la tabla I, aparecerían porque las altas frecuencias inducen turbulencias que dificultan la expresión cuantitativa del fenómeno. Para el caso de cilindros en aire este hecho no es sorprendente, dado que para el sistema más simple de un flujo constante de aire sobre un cilindro en reposo, se encuentra para transferencia de calor una relación de la forma

$$N_{Nu} = B (N_{Re})^n \quad (21)$$

donde B y n son valores que dependen a su vez del N_{Re} . (Mc Adams (31)) El razonamiento desarrollado hasta aquí es coherente con la siguiente descripción cualitativa de la fig. 4: para número de Reynolds nulo la transferencia se realiza exclusivamente por difusión; seguiría una zona de transición no analizada experimentalmente, dibujada con una línea de puntos. A partir de número de Reynolds igual a 24 el mecanismo es predominantemente convectivo.

CONCLUSIONES

- 1) Las oscilaciones de una lámina plana, aumentan la transferencia de masa desde su superficie; llegando a incrementarse siete veces el valor del coeficiente de transferencia en reposo.
- 2) Los datos experimentales con oscilación pueden correlacionarse como función de la velocidad promedio de la lámina y de la dimensión geométrica de la muestra en el sentido del movimiento.
- 3) Este último hecho es coherente con una descripción del fenómeno como una convección forzada en la zona inmediata a la lámina, seguida de una difusión pura en una zona adyacente en reposo.
- 4) La transferencia desde una superficie oscilante puede considerarse cualitativamente similar a la que produce un flujo de velocidad constante sobre una superficie en reposo; por lo menos, para bajas frecuencias de oscilación.

APENDICEINFLUENCIA DEL TIEMPO EN EL COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE MASA.

Una lámina rectangular sublimando en un fluido en reposo; presentará perfiles de concentración diferentes en los tres ejes del espacio. La solución de las ecuaciones matemáticas que representan este fenómeno, no es asequible, ni en forma analítica, ni por métodos numéricos. Como una aproximación se puede suponer que dichos perfiles son similares los que produciría una esfera sublimando en un fluido en reposo; es decir que el primitivo sistema tiene una geometría esférica. La ecuación que brinda el balance de materia en un sistema de este último tipo es:

$$D \left[\frac{\partial c^2}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial c}{\partial r} \right] = \frac{\partial c}{\partial t} \quad (1a)$$

Con las condiciones de contorno e inicial:

$$C.I. I \quad t=0 ; c=0 ; r > R_1$$

$$C.C. I \quad t > 0 ; c=c_s ; r=R_1 \quad (2a)$$

$$C.C. II \quad t > 0 ; c=0 ; r=\infty$$

La solución de esta ecuación puede ser obtenida de Crank(10) para el perfil de concentraciones. Si esta solución es expresada en términos del coeficiente de transferencia de materia y promediada en el tiempo, se obtiene :

$$\frac{2 k_0 R_1}{D} = \bar{N}_{Sh} = 2 + \frac{4 R_1}{(\bar{\pi} D t)^{1/2}} \quad (3a)$$

Se observa que el 2° miembro de la ecuación 3a. tiene un término constante y uno transitorio, pero que tiende a un valor despreciable a medida que la duración de la experiencia aumenta.

Los valores del producto $\bar{\pi} D t$ son calculables para todos los ensayos realizados. El valor de R_1 no es medible

por la diferencia de geometría; pero, si se toma como valor estimativo del orden de algunos centímetros, el término $4 R_1 / (\bar{\pi} D t)^{1/2}$ sólo representa como máximo un 5 % del valor 2; es decir, es menor que el error experimental.

Esto explica porque el coeficiente de transferencia de masa no ha sido afectado por la duración de los ensayos, tanto para los oscilantes como para los estáticos.

Roberto Zanetti



NOMENCLATURA

A	= amplitud	cm
c	= concentración	gmol/cm ³
c_s	= concentración de saturación	gmol/cm ³
D	= difusividad	cm ² /seg
D₀	= diámetro del cilindro oscilante	cm
f	= frecuencia	1/seg
N_{Gr}	= n° de Grashoff	-
h₀	= coef. de transf. de calor en reposo	cal/cm seg °C
h_p	= " " " " " con oscilaciones	cal/ cm seg °C
k₀	= " " " " masa en reposo	cm/seg
k_p	= " " " " " con oscilaciones	cm/seg
L	= longitud característica	cm
M	= molécula gramo	g/gmol
m	= pérdida de peso	g
N_{Nu₀}	= n° de Nusselt en reposo =	-
N_{Nu_p}	= n° de Nusselt con oscilaciones	-
N_{Pr₀}	= n° de Prandtl	-
p	= presión de vapor	at
R	= constante universal de los gases = 0,082	at l / °K gmol
R₀	= radio del cilindro oscilante	cm
R₁	= radio de la esfera	cm
r	= radio (distancia)	cm
N_{Re_L}	= n° de Reynolds en flujo laminar = $L \bar{v} /$	-
N_{Re_p}	= n° de Reynolds con oscilaciones = $W \bar{u} /$	-
N_{ReS}	= n° de Reynolds definido por Lemlich = $(2A+D_0) \bar{u} /$	-
S	= superficie de la muestra	cm ²

N_{Sc}	= n° de Schmidt	:
N_{Sh_L}	= n° de Sherwood en flujo laminar = $k L / D$	-
N_{Sh_0}	= n° de Sherwood en reposo = $k_0 W / D$	-
N_{Sh_p}	= n° de Sherwood con oscilaciones = $k_p W / D$	-
t	= tiempo	seg
T	= temperatura	°C
T_s	= temperatura de la superficie	°C
T_0	= período	seg
u	= velocidad del aire referida a ejes fijos	cm/seg
u'	= velocidad del aire relativa a la velocidad de la lámina	cm/seg
v	= velocidad del aire en flujo laminar sobre una lámina en reposo	cm/seg
V	= velocidad de aproximación = velocidad en un punto alejado de la lámina	cm/seg
W	= ancho de la muestra	cm
x	= coordenada en el sentido del ancho de la muestra	cm
y	= " " " " " largo " " "	cm
z	= " " normal al plano de la muestra	cm

LETRAS GRIEGAS

ρ	= densidad	g/cm^3
δ	= espesor de capa límite	cm
μ	= viscosidad	$g/cm \text{ seg}$
ω	= velocidad angular	1/seg

SUPER INDICES

-- = promedio en el tiempo

SUBINDICES (Ver cada número en la lista precedente).

BIBLIOGRAFIA

- (1) R. Anantarayanan - A. Ramachandran
Trans. Amer. Soc. Mech. Engrs. 80 1426-32 (1958).
- (2) R. Auerbach
Che. Ing. Tech. 24 259-61 (1952)
- (3) J. Behnoiras - K.J. Brill - P. Krumholz
I.E.C. Fundamentals 1 64 (1952)
- (4) J. Biskis
Northwestern University - Ph. D. Thesis (1962)
- (5) L.M.K. Boelter - W.E. Mason
Power Plant Eng. 34 43 (1940)
- (6) E. Bradford
Princeton University - Ph. D. Thesis (1960)
- (7) S. Besznajder - L. Lesniewicz - W. Pasink
Che. Stos. 3 275 (1958)
- (8) N.A. Burenkov
Sugar Ind. Abstr. 18 N° 609 (1956)
- (9) W.J. Christian - S.P. Kogios
A.I. Ch.E Journal 5 N° 1 61 (1959)
- (10) J. Crank "The mathematics of diffusion"
Oxford (1957) p. 98
- (11) F.K. Deaver - W.R. Penney - T.B. Jefferson
Journal of Heat Transfer 251 (1962)
- (12) R.M. Fand - P. Cheng
INT. Journal of Heat Mass Transfer 6 N° 7 571 (1963)
- (13) R.M. Fand - J. Kaye
J. Heat Transfer 84 N° 3 245 (1962)
- (14) R. M. Fand - J. Kaye
Int. Developments in Heat Transfer - Part II 490-98(1961)
- (15) A.M. Ginsthing - A. P. Gnokhin
Khim. Technol. 3 522-6 (1960)

- (16) International Critical Tables
N.York (1926-1933)
- (17) G.J. Jameson
Chem. Eng. Science 19 794-800 (1964)
- (18) N.V. Kalashnikov - V.I. Cherniken
Doklady Akad. Nauk. USSR 119 735-6 (1958)
- (19) H. Kitsov
Pat. Alemana 1.020.922 (Dic. 12, 1957)
- (20) J.G. Knudsen - D.L. Katz
"Fluid dynamics and heat transfer" Mc Graw Hill (1958)
p. 476.
- (21) V.I. Konovalov - P.I. Romankov
Journal of Applied Chemistry USSR 2105 (Oct. 1961)
- (22) J.H. Krasuk - J.M. Smith
Chem. Eng. Sci. 18 591 (1963)
- (23) J.H. Krasuk - J.M. Smith
A.I. Ch.E. Journal (60 759 (1964)
- (24) P.N. Kubanskiĭ
J. Tech Phys. (Moscu) 22 585 (1952)
- (25) P.N. Kubanskiĭ
Dokl. Akad. Nauk. 82 585 (1952)
- (26) P.N. Kubanskiĭ
J. Tech. Phys. (Moscu) 22 593-601 (1952)
- (27) M.B. Larson - A.L. London
A.S.M.E. Paper N° 62-HT-44
- (28) R. Lemlich
Ind. Eng. Che. 47 1175 (1955)
- (29) R. Lemlich - M.R. Levy
A.I. Ch.E. Journal I N° 2 240 (1961)
- (30) R.C. Martinelli - L.M.K. Boelter
Proc. of the Fifth Congress of Applied Mechanics (1938)
p. 578.

- (31) W.H. Mc Adams
"Heat Transmission" 3a. Ed. Mc Graw Hill(1954)p.266-8.
- (32) W.S. Norman
"Absorption, distillation and cooling towers" Logmane
(1961) p. 10.
- (33) R. Saint James - G. P. Graham
Genie Chimique 86 1 (1961)
- (34) T. Shiotsuka - N. Honda - T. Oba
Kagaku Kogaku 22 2 (1958)
- (35) N.I. Sironyatnikov
Trudy. Ural. Politekh. N° 41 5-10 (1955)
- (36) L.D. Smoot - A.L. Babb
I.E.C. Fundamentals 1 N° 2 (1962)
- (37) H. Schlichting
"Boundary Layer Theory" 4a.Ed. Mc Graw Hill (1960)p.75.
- (38) K. Sreevinasan - A. Ramachandran
Int. J. Heat Mass Transfer 3 60-67 (1961)
- (39) B.G. Van der Hegge Zijnen
Appl. Sci. Res 47 205-223 (1958)
- (40) G.D. West
Proc. Phys. Soc. London B 64 483 (1951)

- DATOS EXPERIMENTALES -

SUSTANCIA: NAFTALENO

Nº	AMP. cm.	FREC. c.p.m.	V. cm.	L. cm.	TEMP. °C.	N. áng.	TIEMPO min.	\bar{k} cm/seg.
10	2.0	240	1	10	25.0	240	126	0.53
11	3.0	160	"	"	"	195	110	.49
12	1.2	160	"	"	"	124	105	.33
13	1.2	240	"	"	"	155	123	.35
14	3.0	80	"	"	"	150	112	.37
15	3.0	160	"	"	"	355	203	.48
16	3.0	240	"	"	"	280	115	.63
18	2.0	160	"	"	"	172	129	.37
19	1.2	160	"	"	"	130	110	.33
20	3.0	240	"	"	"	199	81	.69
21	1.2	240	"	"	"	121	111	.30
22	2.0	240	"	"	"	135	95	.51
23	2.0	160	"	"	24.5	377	307	.34
24	2.0	80	"	"	"	255	240	.30
25	3.0	160	"	"	"	424	246	.48
26	3.0	80	"	"	"	274	228	.34
27	1.2	160	"	"	"	265	253	.29
28	1.2	240	"	"	"	342	249	.38
29	1.2	240	"	"	"	199	154	.36
30	2.0	240	"	"	"	560	211	.72
31	2.0	240	"	"	"	435	208	.58
32	2.0	80	"	"	25.0		120	.27
33	2.0	80	"	"	"		130	.28
34	2.0	80	"	"	"		140	.28
41	2.0	160	2.5	10	25.0	232	116	.24
42	2.0	240	"	"	"	320	125	.28
43	3.0	160	"	"	"	305	118	.29
44	3.0	80	"	"	"	213	118	.22
45	3.0	240	"	"	"	420	123	.39
46	2.0	80	"	"	"	200	120	.18
47	1.2	160	"	"	"	200	120	.18
48	1.2	240	"	"	"	223	120	.20
52	1.2	240	"	"	"	360	227	.18
54	5.0	160	"	"	"	600	133	.42
55	5.0	80	"	"	24.0	260	120	.27
56	1.2	160	"	"	"	327	221	.18
58	1.2	80	"	"	24.2	271	250	.13
59	2.0	80	"	"	"	217	147	.18
60	1.2	80	"	"	20.9	133	139	.16
61	1.2	80	"	"	20.6	220	258	.15
63	2.0	80	"	"	22.0	300	271	116
64	2.0	160	"	"	"	275	150	.27
66	3.0	160	"	"	23.0	256	121	.28

Nº	AMP. cm.	FREQ. c.p.m.	V. cm.	L. cm.	TEMP. °C.	N. áng.	TIEMPO min.	\bar{k} cm/seg.
67	3.0	80	2.5	10	23.0	212	118	.24
68	4.0	160	"	"	17.0	954	628	.36
69	4.0	160	"	"	"	400	250	.38
81	1.2	80	0.5	"	18.7	69	200	.35
82	2.0	80	"	"	18.9	157	257	.71
83	1.2	80	"	"	17.8	101	349	.31
84	2.0	80	"	"	18.0	159	305	.58
85	1.2	80	"	"	18.5	155	356	.46
91	3.0	160	1.0	5.0	21.0			.52
92	3.0	240	"	"	21.1			.67
93	3.0	80	"	"	21.2			.33
94	2.0	80	2.5	"	15.4	107	331	.21
95	2.0	80	"	"	15.1	87	384	.17
96	2.0	80	"	"	14.6	304	797	.20
97	1.2	80	"	"	14.9	121	514	.14

SUSTANCIA: ALCANFOR

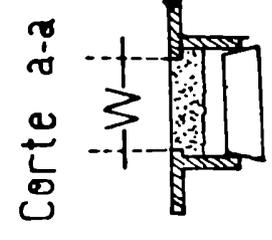
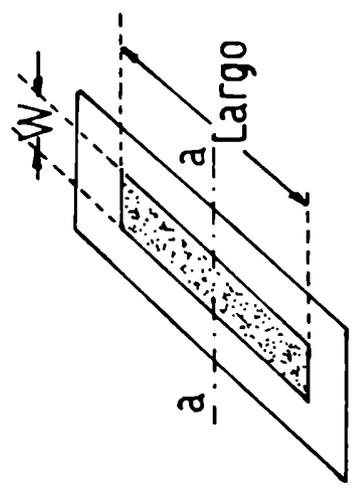
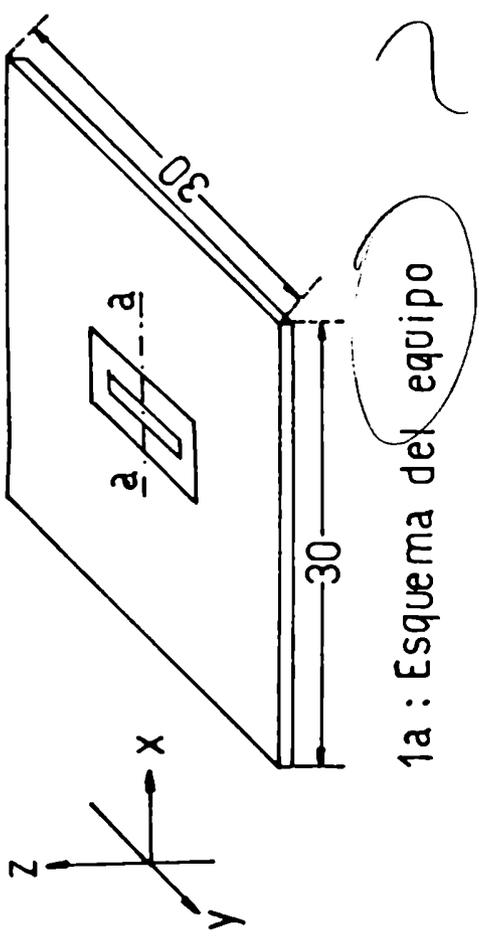
71	1.2	240	1.0	10	20.3	417	143	.32
72	2.0	160	"	"	23.2	162	60	.29
73	1.2	240	"	"	21.0	190	77	.26
74	1.2	80	"	"	19.5	215	148	.16
75	1.2	80	"	"	19.6	155	101	.17
77	2.0	80	"	"	19.8	200	110	.20
78	2.0	80	"	"	"	200	103	.21

ENSAYOS SIN MOVIMIENTO

SUSTANCIA: NAFTALENO

Nº	V cm.	L cm.	TEMP. °C.	N áng.	TIEMPO min.	\bar{k} cm/seg.
101	1.0	10	25.0	58	109	.140
102	2.5	"	"	1080	1440	.086
103	"	"	"	95	144	.080
104	1.0	"	19.0	77	291	.250
105	0.5	"	"	68	291	.220
106	2.5	"	"	92	276	.076
107	1.0	"	"	321	1059	.150
108	0.5	"	"	204	1057	.210
109	2.5	"	"	510	1056	.092

→ sentido del movimiento



1b : Esquema del portamuestra

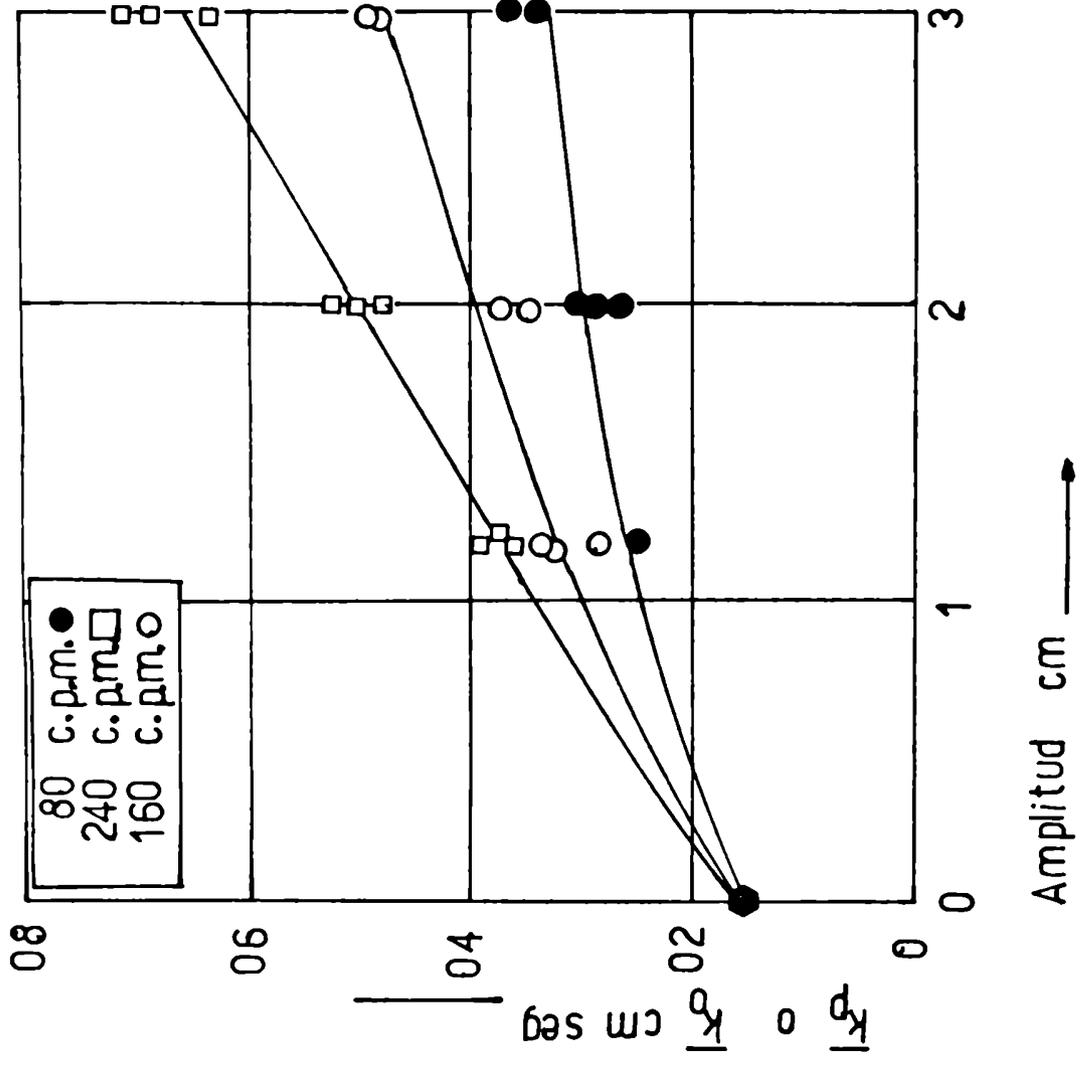


FIGURA Nº 2 : Resultados típicos con naftaleno

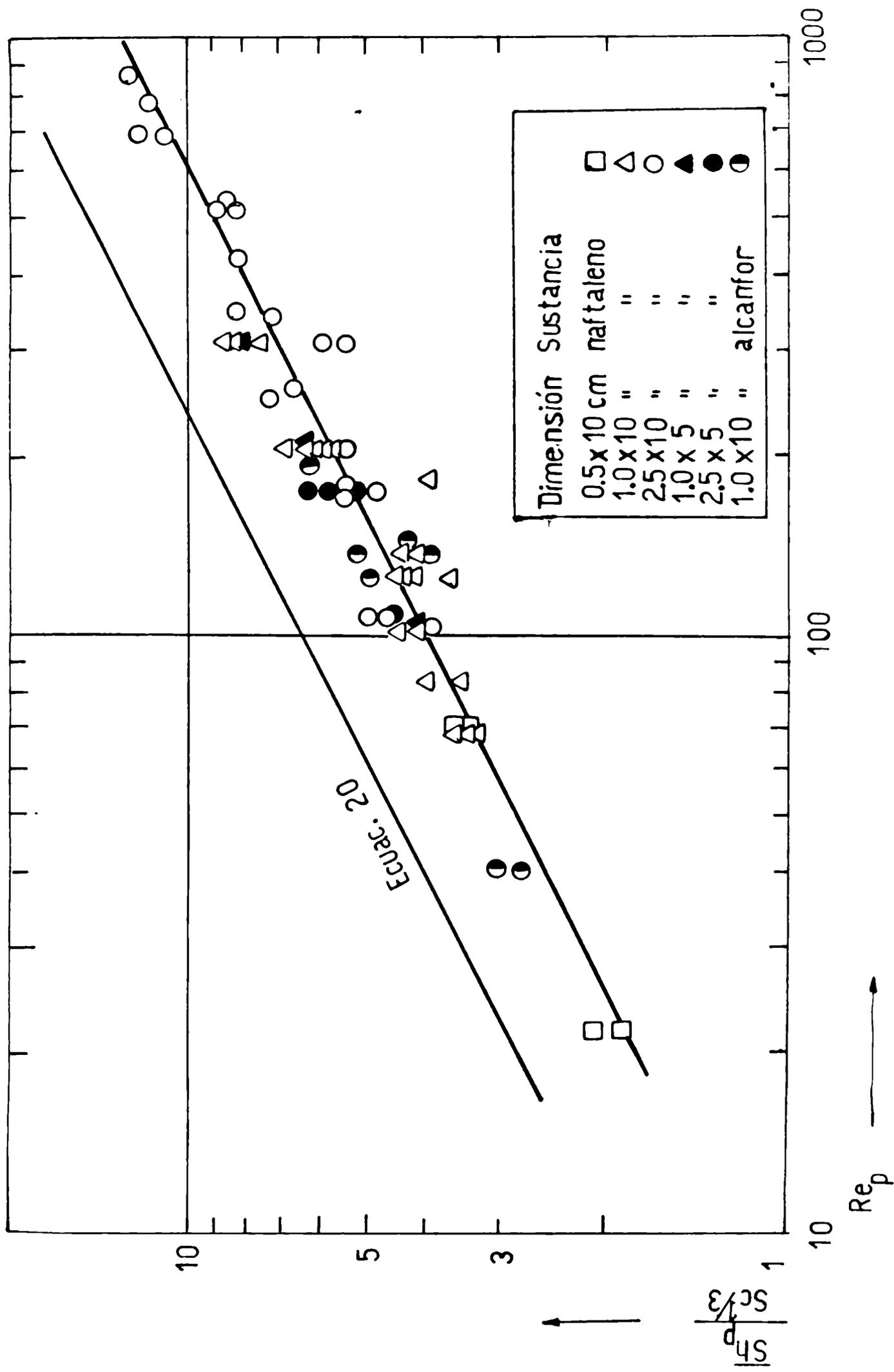


FIGURA N° 3 : Datos experimentales [ensayos oscilantes]

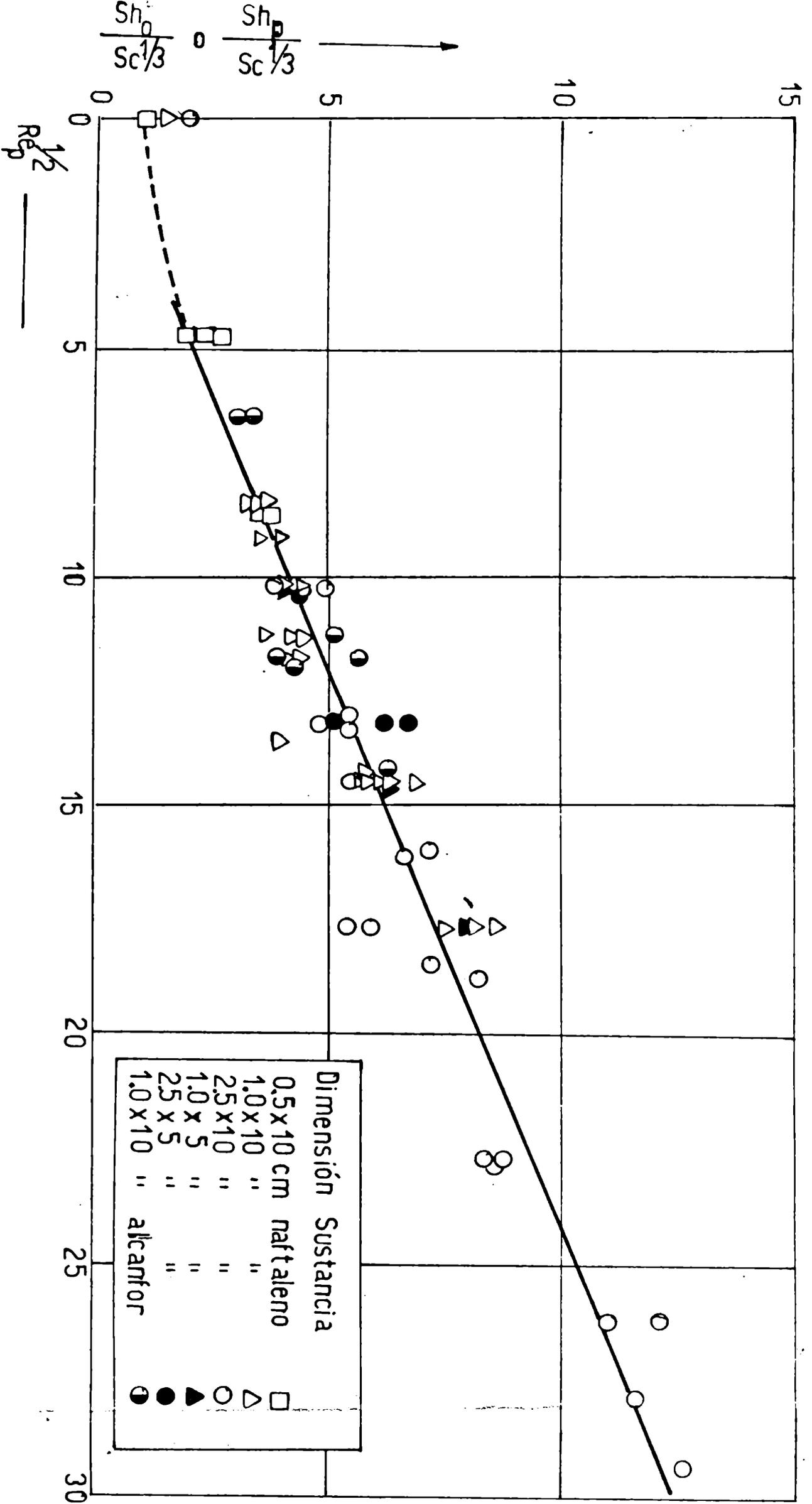


FIGURA N° 4: Datos experimentales

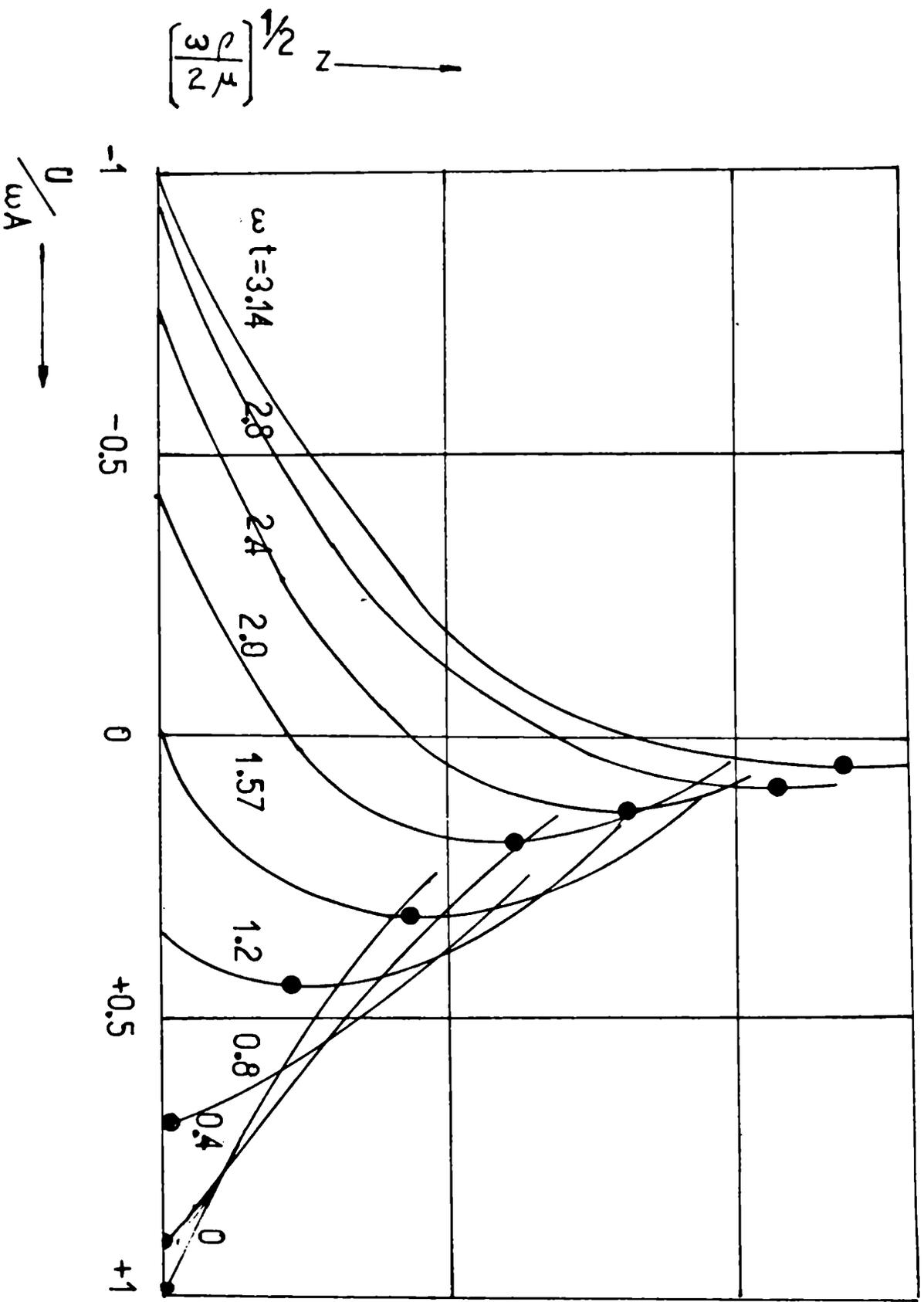


FIGURA Nº 5: Perfiles de velocidad

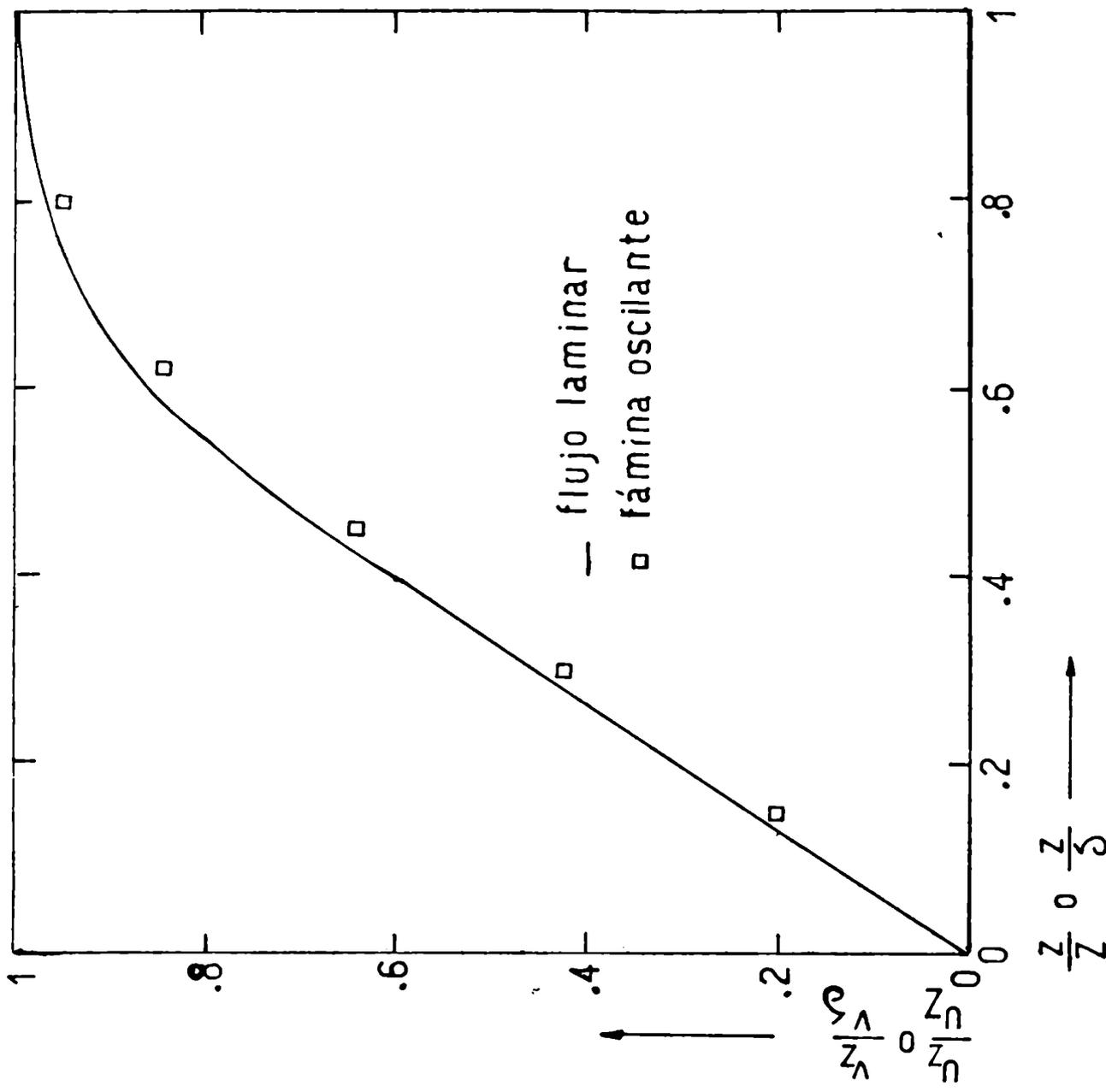


FIGURA N°6 : Comparación de perfiles de velocidad