

C.N.E.A. Biblioteca	
ARCHIVO PUBLICACIONES	
Nº 1	AÑO 1972

04.72.09

PMM/R-83

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

PROGRAMA MULTINACIONAL DE METALURGIA

(Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico - OEA)

COLADA CONTINUA DE NO FERROSOS - UTILIZACION DE SOLUCIONES
APROXIMADAS SIMPLIFICADAS PARA EL CALCULO DE LINGOTERAS

M. Prates, R. Morando y H. Biloni

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina
1972

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

PROGRAMA MULTINACIONAL DE METALURGIA

(Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico - OEA)

COLADA CONTINUA DE NO FERROSOS - UTILIZACION DE SOLUCIONES
APROXIMADAS SIMPLIFICADAS PARA EL CALCULO DE LINGOTERAS

M. Prates, R. Morando y H. Biloni

Departamento de Metalurgia
Buenos Aires - Argentina
1972

COLADA CONTINUA DE NO FERROSOS - UTILIZACION DE SOLUCIONES APROXIMADAS SIMPLIFICADAS PARA EL CALCULO DE LINGOTERAS

I) INTRODUCCION:

El interés en el desarrollo del proceso de colada continua se basa en la posibilidad de sustituir los procesos de colada estática con el objeto de mejorar y uniformar la calidad de los productos (1). Los primeros esfuerzos en este sentido datan del siglo pasado, cuando Laing en 1843 (2) y Bessemer en 1858(3) obtuvieron las primeras patentes de colada continua. Sin embargo, solamente en la década del 30 de este siglo el proceso de colada continua comenzó a ser utilizado en escala industrial. El estudio sistemático de este proceso fué realizado por primera vez por Roth (4) en 1943, al que siguieron importantes trabajos de investigación entre los cuales se destacan los de Korotkov (8), Boichenko (9), Boulier (10), Kraimer & Bungeroth (11), Savage & Pritchard (12), Speith & Bungeroth (13), Halliday (14), y Hills (15).

La lingotera es el elemento fundamental del sistema por lo que los mayores esfuerzos se han centrado en la obtención de un diseño óptimo de la misma. El objetivo fundamental de la lingotera es crear una capa solidificada con una resistencia mecánica capaz de soportar las tensiones generales durante la extracción. En efecto, la solidificación del lingote no ocurre íntegramente en la lingotera sino que se completa en un sistema de enfriamiento secundario generalmente constituido por una lluvia de agua que incide sobre la capa que ha solidificado en la lingotera. Ver esquema de la Fig.1.

Debido a la continuidad del proceso de colada continua las lingoteras son siempre refrigeradas por agua. Se emplean tres tipos de modelos:

- i) Consiste en un bloque metálico, generalmente de cobre el cual posee una cavidad correspondiente a la forma del lingote. La refrigeración se realiza por medio de canales paralelos a la cavidad y construidos dentro del mismo bloque.
- ii) Otro modelo consiste simplemente en una pared fina que modela la forma del lingote y en una camisa exterior que provee la refrigeración, lo que se lleva a cabo por una lluvia de agua que incide sobre la pared fina.
- iii) El tercer modelo es constructivamente similar al anterior pero la diferencia radica en que en la camisa circula agua de refrigeración a presión. Según Halliday (14-15) este modelo es el que asegura una mejor extracción calórica, y es el que será empleado en el presente trabajo.

Desde el punto de vista constructivo existen ciertos aspectos que solamente pueden ser evaluados por medio de la experiencia acumulada en el proceso de la colada continua. Uno de los más importantes se refiere al material de molde de la lingotera, la que va a depender fundamentalmente del metal a colar. Por ejemplo en la colada de Aluminio y sus aleaciones se emplea con éxito el Cobre o el latón, mientras que en el caso del Cobre y sus aleaciones el material más adecuado es el grafito (1). Una vez definido el metal a colar y los materiales que han de constituir la lingotera el problema fundamental de diseño consiste en determinar el largo

mínimo de la lingotera en función del espesor de la capa solidificada que se desea obtener a la salida de la lingotera. Otra variable fundamental a considerar es la velocidad de extracción del lingote, lo que configura la velocidad de producción. El presente trabajo tiene como principal objetivo presentar un método simplificado para el cálculo de lingoteras de colada continua el que ha de aplicarse al caso específico de lingotes de materiales no ferrosos de pequeño diámetro.

II) Métodos de Análisis del Proceso de colada continua

El análisis de la transmisión calórica, en la colada continua puede ser hecho por métodos Analíticos, No-Analíticos y Experimentales. Los métodos experimentales (11-12) consiste fundamentalmente en establecer ecuaciones empíricas que relacione el espesor solidificado con la velocidad de extracción del lingote sobre la base de mediciones hechas para casos específicos. Esto impide su aplicación generalizada. Los métodos No-Analíticos (16) pueden ser Numéricos, Gráficos, Analógicos, Digitales, etc. y evitan las mediciones experimentales pero son extremadamente laboriosos y solamente aplicables a casos específicos, lo que también impide cualquier tipo de generalización. Por su parte los métodos Analíticos (17-18) pretenden ser generales, es decir aplicables a cualquier tipo de metal o aleación. Estos métodos se subdividen en métodos Analíticos Exactos y Analíticos Aproximados.

Los métodos Analíticos Exactos (17) se caracterizan por su origen matemático y entre sus hipótesis fundamentales de aplicación se destaca la que se refiere al contacto térmico entre metal y molde el que es considerado perfecto, es decir se considera que el coeficiente de transmisión térmica de la interface metal molde, " h_i ", es infinito. En los sistemas de colada continua tal hipótesis es totalmente inaplicable toda vez que una de sus características principales es que la interface metal-molde posee un valor de " h_i ", generalmente, bajo, es decir una alta resistencia térmica que es la que comanda el proceso de transmisión calórica en la lingotera (11) (15). A su vez las hipótesis correspondientes a los métodos Analíticos Aproximados (18) se acercan bastante a las condiciones de borde reales del Sistema metal-molde de la colada continua, es decir i) existencia de un coeficiente de transmisión de valor finito en la interface metal-molde. ii) Molde considerado como un sumidero perfecto de calor (resistencia térmica nula) que corresponde al caso de una lingotera eficientemente refrigerada por agua. La aplicación de las soluciones analíticas aproximadas exige el uso de los parámetros adimensionales definidos en el Apéndice I. Asimismo el manejo de sus ecuaciones es generalmente complejo y exige el empleo de programación computacional. Sin embargo se ha demostrado (18) que es posible hacer una simplificación de estas soluciones de manera de utilizarlas en cálculos de lingoteras con un error no mayor del 8%. En efecto: las soluciones analíticas aproximadas pueden ser representadas por la siguiente ecuación general:

$$X^+ = F_0 \left[(1 + 2t^+)^{1/2} - 1 \right] \quad (1)$$

que relaciona la posición adimensional del frente de solidificación " X^+ " y el tiempo adimensional " t^+ ". El parámetro adimensional " Fo " también llamado "factor de corrección" de las soluciones aproximadas varia en una gama determinada por los valores límites dados por

$$1 \leq Fo \leq \phi (2H^+)^{1/2}$$

donde " ϕ " es la constante de solidificación de Stefan (17-18), la que se encuentra graficada en la Fig.2, y H^+ es el calor latente adimensional del metal que solidifica. En esta gama " Fo " varia en función de " X^+ " y de " H^+ ". La simplificación consiste en admitir una variación "log-lineal" del siguiente tipo:

- Para $X^+ \leq 10^{-2}$ $Fo = 1$ (valor límite de London y Seban)
- Para $X^+ \geq 1$ $Fo = \phi (2 H^+)^{1/2}$ (Valor límite de Stefan)
- En el intervalo definido por $10^{-2} < X^+ < 1$, los valores de " Fo " varían linealmente con el logaritmo decimal de los valores de X^+ , entre los valores límites anteriormente definidos.

La Fig.3 ilustra la Simplificación ante dicha. El Grado de aplicabilidad de este método Simplificado puede ser apreciado en la Fig.4 en donde se correlaciona los resultados obtenidos por este método con los datos experimentales existentes en la literatura. En la Fig.4a se comparan los datos experimentales obtenidos por Kraimer y Tarmann en aceros (11). En la Fig. 4b se hace una comparación similar con los resultados de Savage y Pritchard (12), obtenidos con un simul estático. Finalmente en la Fig.4c se hace una comparación con los resultados de Hills y Moore (19) obtenidos para el Plomo Solidificado en una lingotera especial refrigerada por aire.

III) Aplicación del método a la colada continua de Aluminio y Bronce.

Se ha de aplicar el método de cálculo de la lingotera al caso de la colada continua de Aluminio y Bronce. El objetivo que se buscó es determinar las curvas de variación del largo de la lingotera en función de : a) la capa Solidificada a ser extraída, b) Velocidad de extracción del lingote.

La secuencia del diseño es la siguiente:

- i) Selección del material de molde en función del metal o de la aleación a colar. Para el caso del Aluminio la experiencia aconseja el latón mientras que para el caso del Bronce se aconseja el grafito.
- ii) Determinación del coeficiente de transmisión calórica de la interface metal-molde del sistema, en función del item anterior. Para el caso de la colada de Aluminio existen datos en la literatura (20). Para el caso del Bronce la literatura no pre-

senta datos por lo que se ha de utilizar el método experimental de Savage y Pritchard (12) (15) que considera la determinación del coeficiente de transmisión calórica global de lingoteras refrigeradas por agua, conociéndose el caudal de agua y la variación de temperatura del agua de entrada y salida. Esta es una aproximación, pero es adecuada para los cálculos (15).

iii) Cálculo de los coeficientes que relacionan las variables "X" y "t" con sus respectivos parámetros adimensionales "X⁺" y "t⁺", es decir los coeficientes C1 y C2 de las siguientes ecuaciones.

$$t^+ = C_1 \cdot t \quad ; \quad C_1 = \frac{h_c^2 \cdot a_s}{K_s^2 \cdot H^+} \quad (3)$$

$$X^+ = C_2 \cdot X \quad C_2 = h_c / K_s$$

IV) Seleccionar la gama de variación del espesor solidificado a ser analizado (X). Para el caso del Aluminio y Bronce se eligió la gama 0-2,0 cm.

V) Determinación, para cada valor de "X", del valor correspondiente del parámetro adimensional X⁺, a partir del cual se ha de determinar el valor correspondiente del coeficiente adimensional "Fo" en los gráficos de la Fig.3 (curvas del Aluminio y del Bronce).

VI) Cálculo del tiempo "t" necesario para solidificar la capa "X". Ello puede obtenerse a partir de la ecuación (1)

$$X^+ = F_o (1 + 2t^+)^{1/2} - F_o$$

$$1 + 2t^+ = \left(\frac{X^+ + F_o}{F_o} \right)^2 = \left(1 + \frac{X^+}{F_o} \right)^2 \quad (6)$$

$$1 + 2t^+ = 1 + 2 \left(\frac{X^+}{F_o} \right) + \left(\frac{X^+}{F_o} \right)^2 \quad (7)$$

donde considerando la ecuación (3)

$$t = \frac{\frac{X^+}{F_o} + \frac{1}{2} \left(\frac{X^+}{F_o} \right)^2}{2 C_1} \quad (8)$$

VII) Se establece graficamente la variación X=F (t) en base a los resultados del cálculo.

VIII) Finalmente a partir de las curvas $X = f(t)$ se determina para el coeficiente "hi" impuesto por el sistema, la curva de variación del espesor solidificado "X" en función de la Velocidad de extracción del lingote y del largo de la lingotera. Por lo tanto hay que considerar $t = L/V$ donde "L" es el largo de la lingotera y "V" es la velocidad de extracción.

Las propiedades físicas necesarias para los cálculos se encuentran en el Apéndice II (21)

IV) Resultados

a) Aluminio:

La Fig. 5 ilustra la variación $X = f(t)$ para diferentes valores del coeficiente de transición calórica de la interface metal-molde (h_i). En la misma figura se ilustran los resultados experimentales obtenidos por medio del método de "pouring out" para el caso de un símil estático. El símil estático estaba constituido por un molde de latón de pared fina eficientemente refrigerado por agua. La Fig. 6 muestra el aparato utilizado. Puede observarse en la Fig. 5 que el cálculo basado en el método simplificado coincide muy bien con los resultados experimentales obtenidos con el símil estático y diferentes condiciones de la interface metal-molde, las que se tradujeron en diferentes valores de " h_i ". Para el cálculo del largo de lingotera necesario para la colada continua del Aluminio se utilizó el gráfico de la Fig. 7. Se utilizó como valor de " h_i " el de $0,045 \text{ cal/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C seg.}$ que corresponde al de lingotera pintada con negro de humo, valor que es muy aproximado al valor promedio dado por la literatura para los procesos de colada continua y que es del orden de $5 \cdot 10^{-2} \text{ cal/cm}^2 \text{ } ^\circ\text{C seg.}$ (11) (12) (14) (15). Este valor promedio tiene en cuenta las condiciones reales encontradas en los sistemas metal-molde (superficie del molde oxidada, existencia de un gap de aire, etc.). En lo que se refiere al espesor solidificado extraído de la lingotera y a la velocidad de extracción del lingote, la literatura recomienda espesores del orden de 1 cm y velocidades no mayores de 1 cm/seg. Ello da, en la Fig. 7 un largo de lingotera de 10cm.

b) Bronce

La Fig. 8 indica la variación $X = f(t)$ para el caso del bronce. La no existencia de valores específicos de " h_i " ha llevado a adoptar el valor de 0,05 dado como promedio en la literatura. Analogamente al caso del Aluminio, la Fig. 9 indica, el cálculo del largo de la lingotera para las condiciones consideradas óptimas. La Fig. 10 indica, la máquina de colada continua horizontal diseñada para, Aluminio y Bronce según los cálculos anteriores.

V) Conclusiones

El método simplificado de diseño de lingotera para colada continua utilizado en el presente trabajo es confiable al mismo tiempo que no exige operaciones complejas de programación y computación por lo que, la estimación de los pará-

6.

metros de diseño es una operación rápida y sencilla.

Agradecimientos:

A la dirección de la firma E.C.A. dependiente de Fabricaciones Militares en la persona del Teniente Coronel Longo por su apoyo al desarrollo de métodos de colada continua y permitir presentar estos resultados.

REFERENCIAS

- (1) M. C. BOICHENKO - Continuous Casting of Steel, Butterworths y Co. , Londres, 1961.
- (2) U. S. Patent 3023
- (3) U. S. Patent 49053
- (4) W. ROTH - Aluminium , vol. 24 , tirage a parte de 10 pag.
- (5) T.W. LIPPERT - Iron Age, agosto de 1948
- (6) E. HERMANN - Handbuch des Stranggiessens, Aluminium - Verlag. Dusseldorf , 1958.
- (7) O. CHAABER - Zeit. Metallkde, v. 43, p. 181 y 252, 1952
- (8) K. P. KOROTKOV et al. - The Continuous Casting of Steel in Commercial Use, Pergamon Press, Londres , 1960.
- (9) M. C. BOICHENKO et al. - J.I.S.I., v. 191, p. 109, 1959.
- (10) L. BOULIER - La Coulee Continue de l Acier, Public . I.R.S.I.D. 2 vol. 1960.
- (11) H. KRAINER & B. TARMANN- J.I.S.I., v. 190, p. 105, 1958.
- (12) J. SAVAGE & W.H. PRITCHARD - J.I.S.I. v. 178, p. 269, 1954.
- (13) K.G. SPEITH & A. BUNGEROTH - J.I.S.I., v. 190, p. 158, 1958.
- (14) M. D. HALLIDAY - J. I. S. I. , v. 191, p.121, 1959.
- (15) A. W. D. HILLS - J. I. S. I. , v. 203, p. 18, 1965
- (16) P. J. SCHEIDER - "Conduction Heat Transfer", Addison - Wesley Co. , Reading , 1957 .
- (17) M. PRATES & H. BILONI - Publicación no. PMM/R-59, C.N.E.A., Buenos Aires , 1971.

- (18) M. PRATES & H. BILONI - Publicación No. PMM/R-59, C.N.E.A., Buenos Aires , 1971.
- (19) A.W. D. HILLS & M. R. MOORE - Trans. Met. Soc. AIME, v.245, ; p. 1481, 1971.
- (20) M. PRATES & H. BILONI - Publicación no. PMM/C-31a, C.N.E.A. Buenos Aires, 1971.
- (21) C. J- SMITHELLS, "Metals Reference Book", vol, I y II, 3a. edición, Butterworths Inc. Washington, 1962.

APENDICE - I : Símbolos

a) Parámetros dimensionales

a	=	coeficiente de difusidad térmica = k/cd ($\text{cm}^2 / \text{seg.}$)
b	=	coeficiente de difusidad calórica = $(kcd)^{\frac{1}{2}}$ (cal / cm^2 $\text{° C. seg.})^{\frac{1}{2}}$
c	=	calor específico ($\text{cal} / \text{g. ° C}$)
d	=	densidad (g/cm^3)
h_i	=	coeficiente de transmisión calórica ($\text{cal} / \text{cm}^2 \cdot \text{° C, seg}$)
H	=	calor latente de fusión (cal/g)
k	=	coeficiente de conductividad térmica (cal/cm ° C. seg.)
T_f	=	temperatura de fusión (° C)
X	=	espesor de la capa solidificada (cm)
t	=	tiempo de solidificación (seg.)

b) Parámetros adimensionales

X^+	=	espesor solidificado = $(h_i / k_s) \cdot X$.
t^+	=	tiempo = $(h_i^2 \cdot a_s / k_s^2 \cdot H^+) \cdot t$
H^+	=	calor latente = $H/c \cdot T_f$
X^+	=	velocidad de solidificación = $dX^+ / dt^+ = (k_s \cdot H^+ / h_i \cdot a_s) \cdot X$
M	=	constante del molde = b_s / b_m

c) Correspondencia de los subíndices

(m)	molde
(i)	interface metal / molde
(s)	metal solidificado
(l)	metal líquido

APENDICE II : Propiedades Físicas

(sistema cgs)

Propiedades	Aluminio	Bronce (95-5)
k_s	0,30	0,85
d_s	2,37	8,25
c_s	0,26	0,12
T_f	660	1.050
H	93	45
b_s	0,43	0,91
a_s	0,49	0,87

Observación : Las propiedades físicas están dadas para temperaturas muy cercas a la temperatura de fusión (21) .

Leyendas de las Figuras

- Fig. 1 Esquema de la solidificación en el sistema de colada continua horizontal.
- Fig. 2 Valores de la constante de Solidificación según la Solución Analítica Exacta de Stefan (17-18) (caso límite para $h_i = \infty$).
- Fig. 3 Variación Simplificada (log-linial) del coeficiente de corrección adimensional "Fo" que se aplica, a la solución Analítica Aproximada de London y Seban (18) (caso límite para $H+ \gg 1$).
- Fig. 4 Comparación de los resultados del cálculo simplificado con los datos experimentales existentes en la literatura.
a) Comparación con los resultados de Krainer y Tarman (11)
b) Composición con los resultados de Savage y Pritchard (12)
c) Comparación con los resultados de Hills y Moore (19)
- Fig. 5 Aplicación del cálculo para el caso de la colada de Aluminio en lingoteras de latón (pared fina refrigerada por agua), para diferentes valores de "hi" (20). Variación del espesor solidificado en función del tiempo. Comparación con resultados experimentales (0) obtenidos con el método de "pouring out" en un simul estático del tipo utilizado por Savage y Pritchard (12).
- Fig. 6 Instalacion para la colada continua utilizando un simul estático.
- Fig. 7 Variación del largo de lingotera en función del espesor de la capa Solidificada y de la velocidad de extracción del lingote , para el caso del Aluminio.
- Fig. 8 Aplicación del cálculo para el caso de la colada de Bronce en lingoteras de grafito refrigerado por agua. Variación de la capa solidificada en función del tiempo para diferentes valores del coeficiente "hi".
- Fig. 9 Variación del largo de lingotera en función del espesor de la capa solidificada y de la velocidad de extracción del lingote para el caso del Bronce.
- Fig. 10 Vista general de la máquina de colada continua desarrollada indicando sus - partes componenetes.

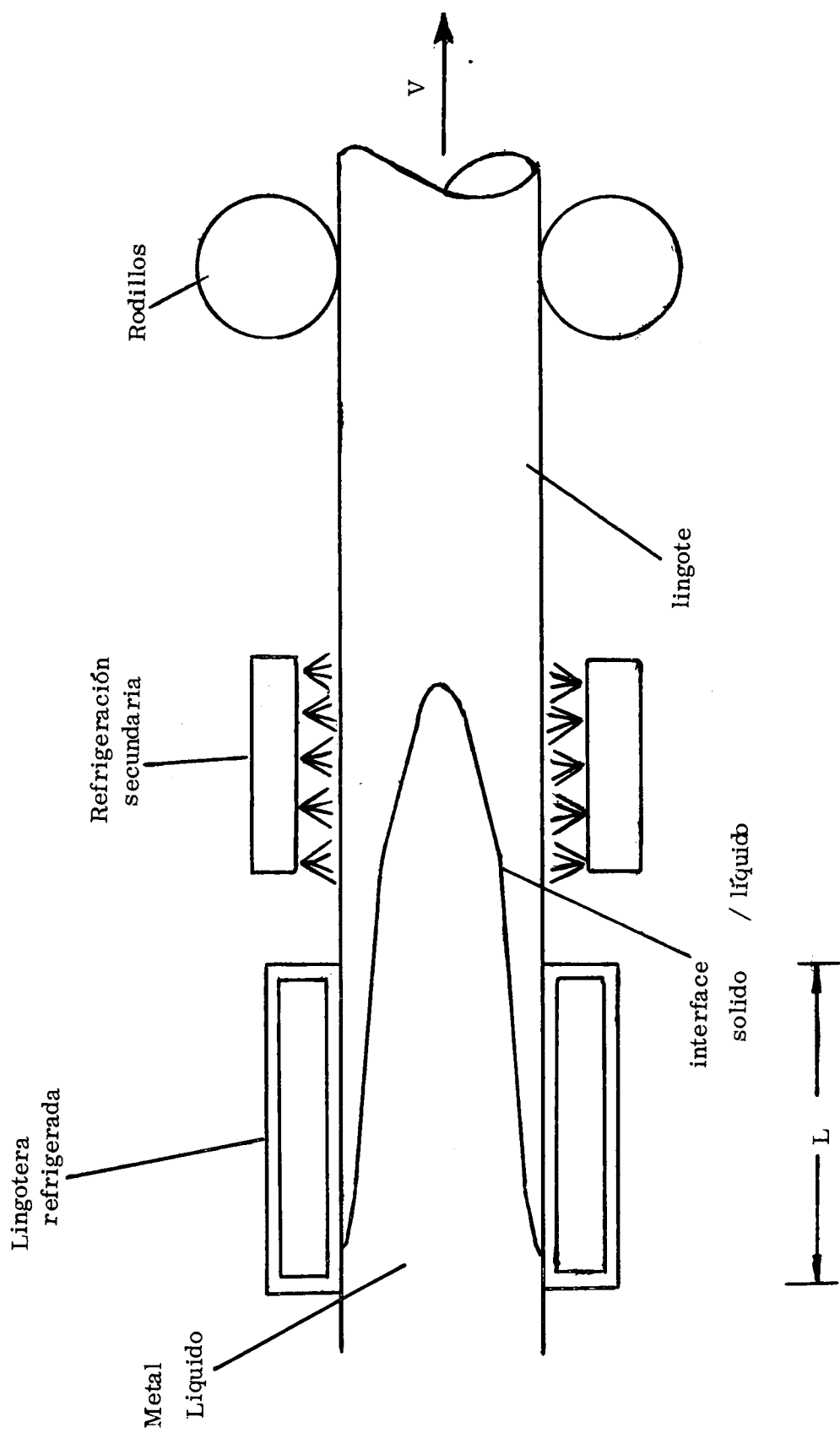


Fig. 1

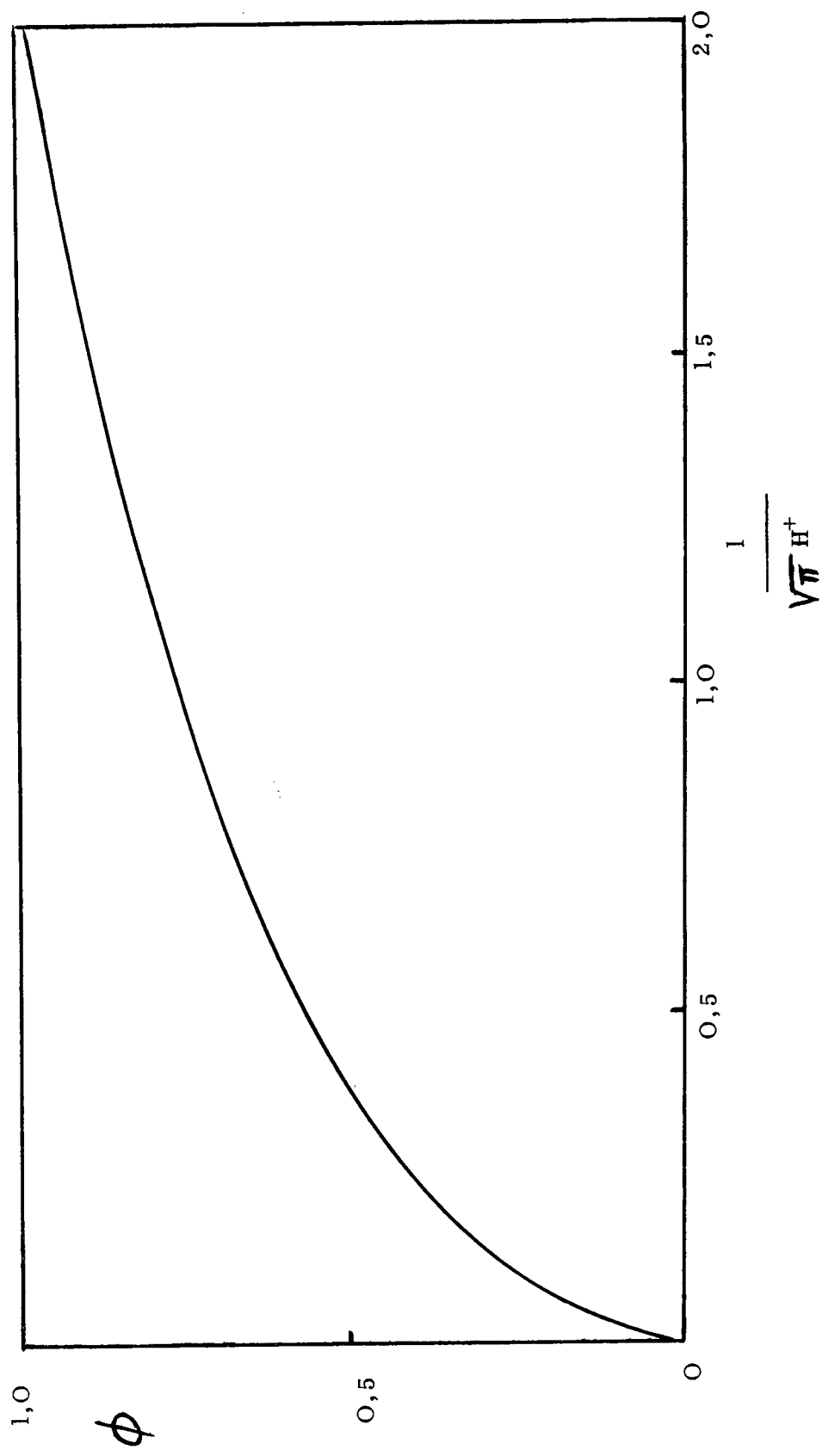


Fig. 2

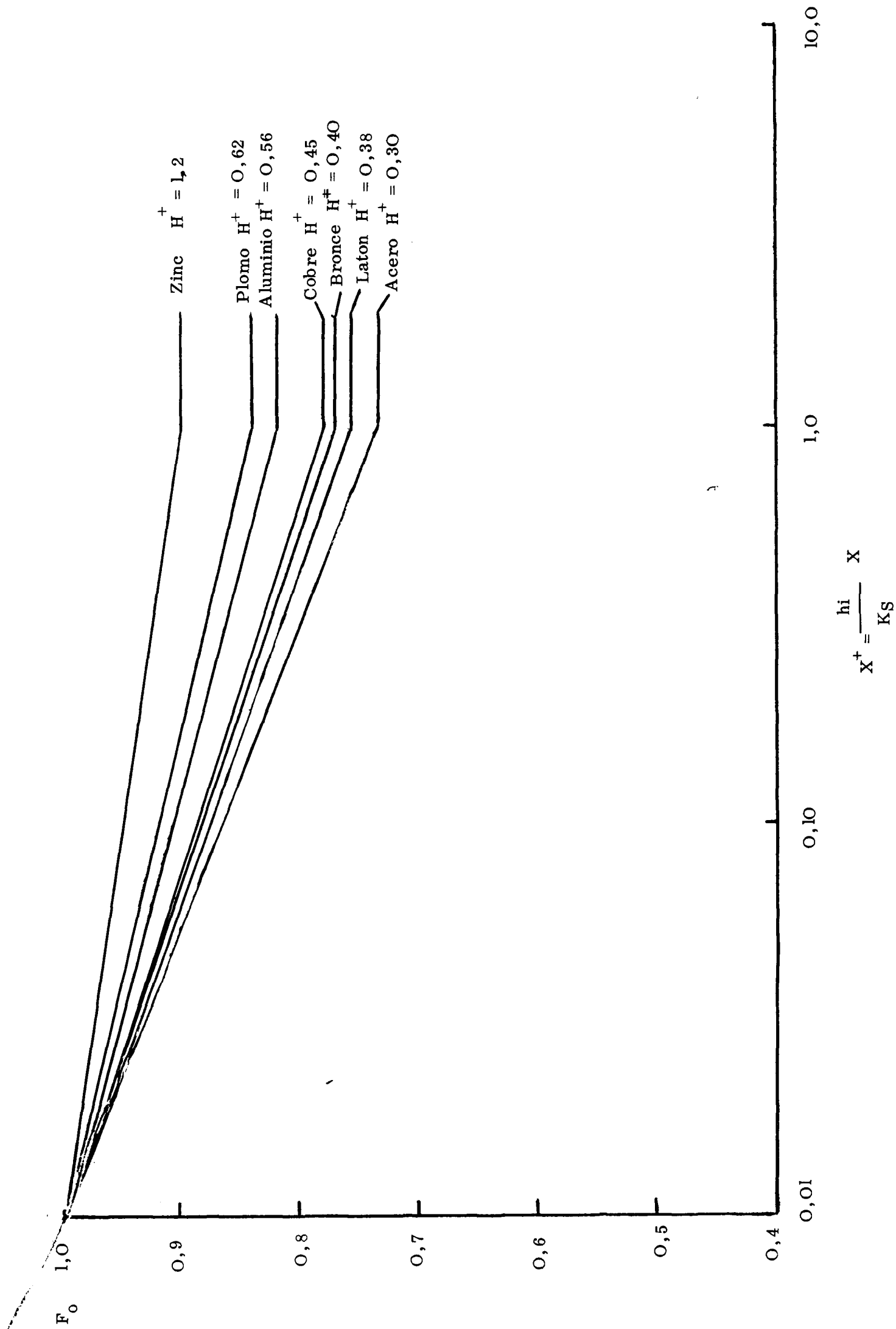


Fig. 3

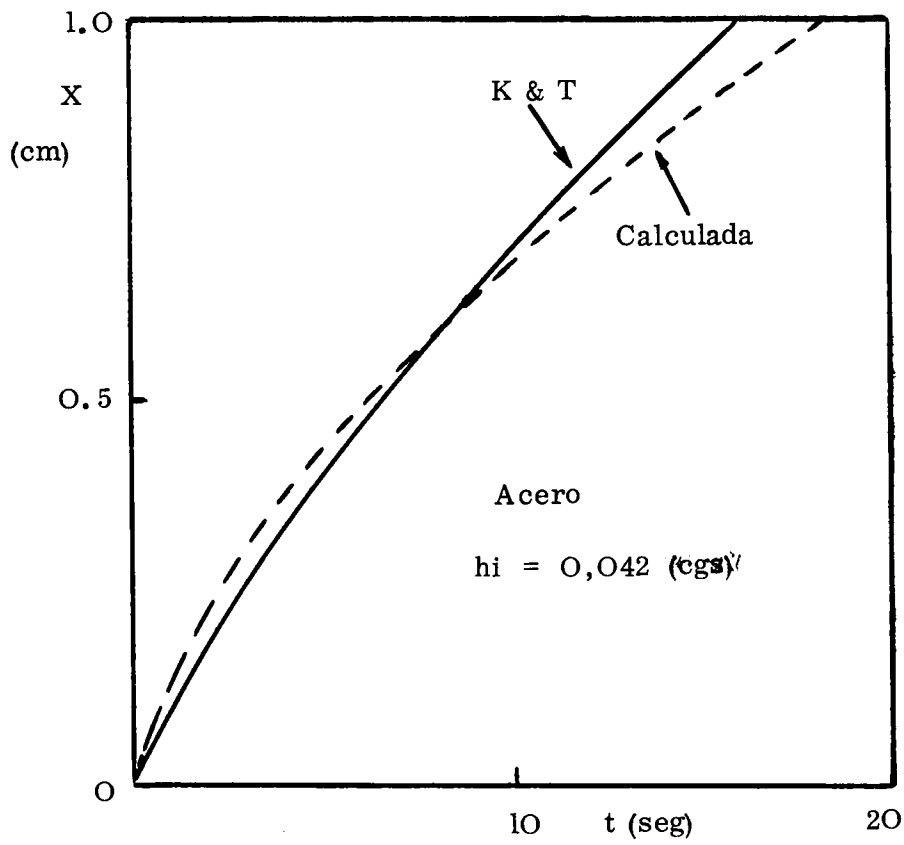


Fig. 4 a

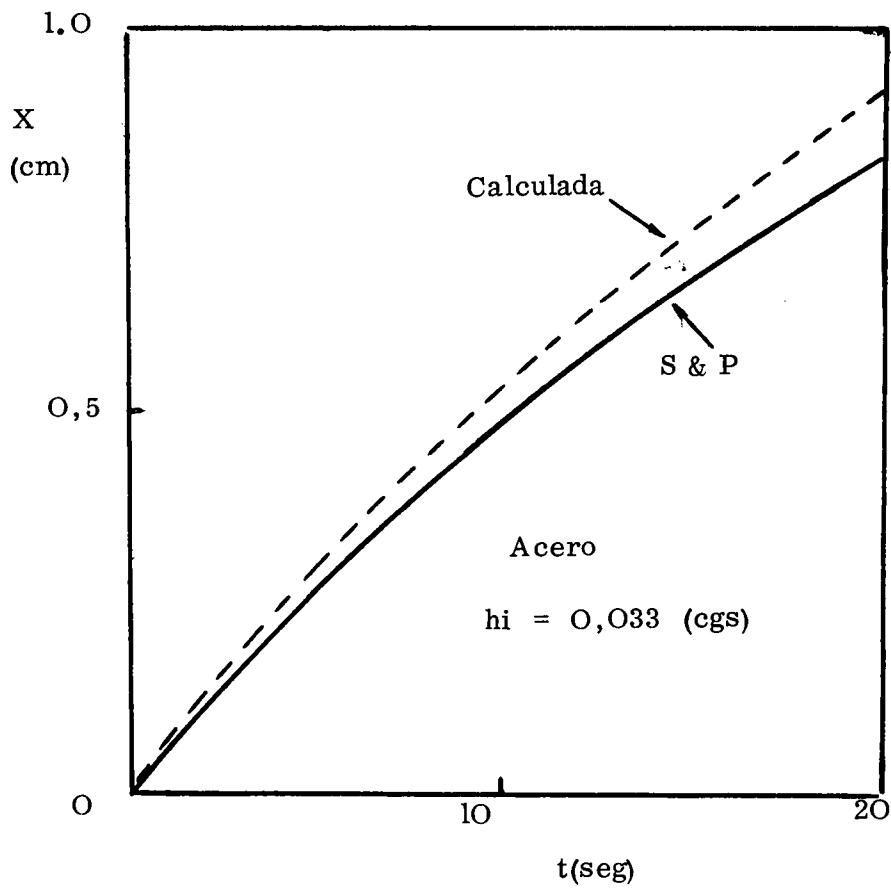


Fig. 4 b

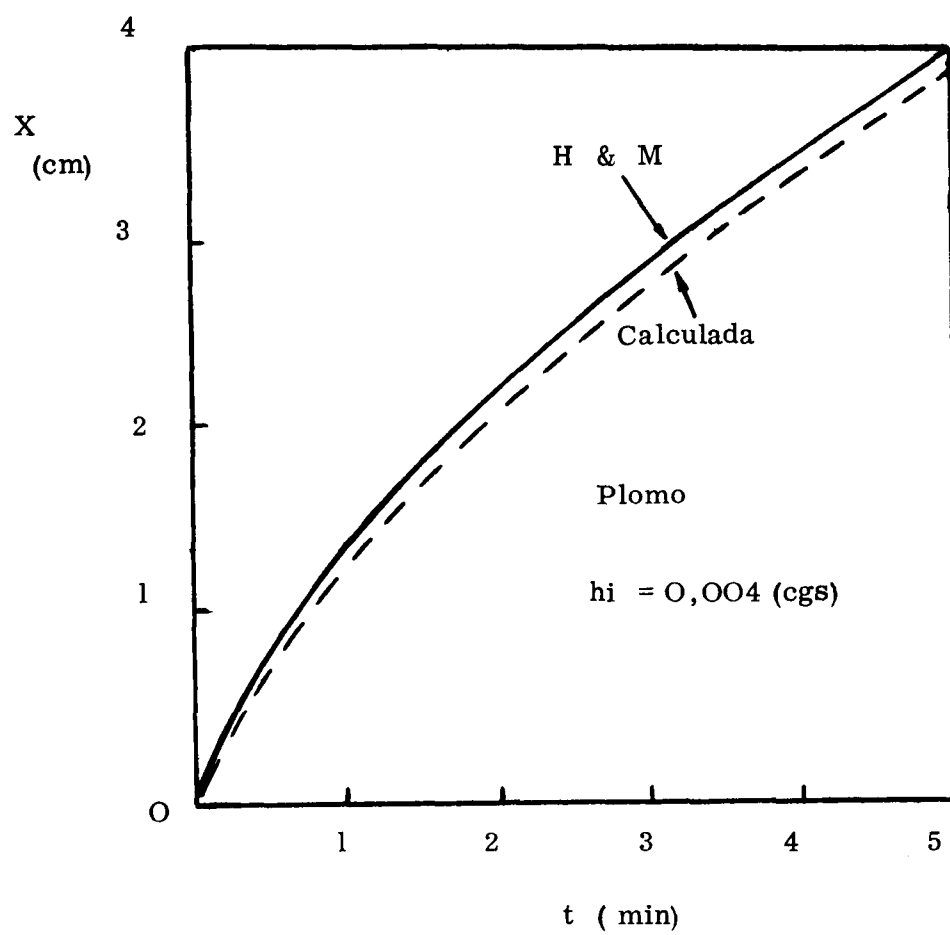


Fig. 4 c

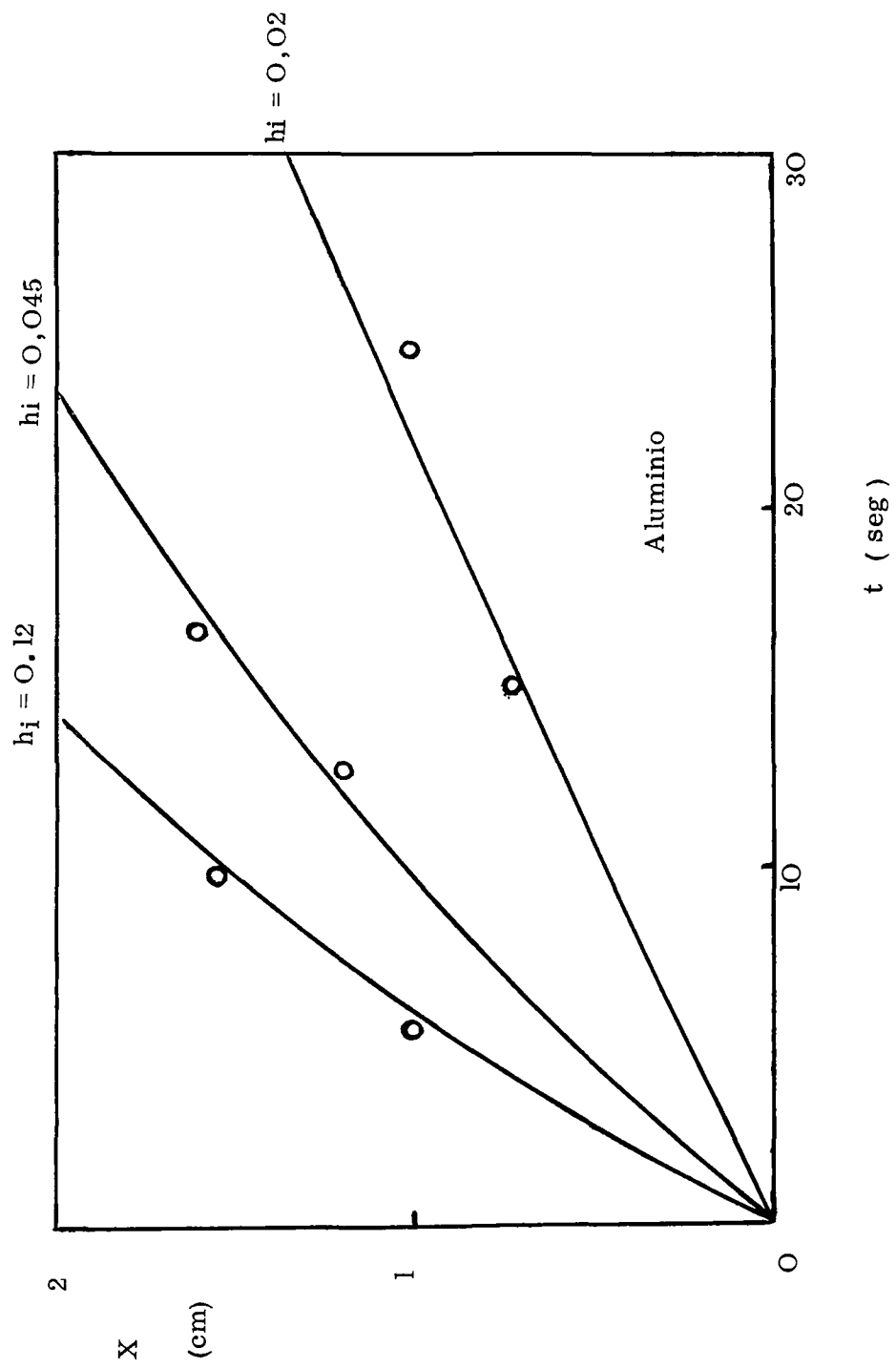


Fig. 5

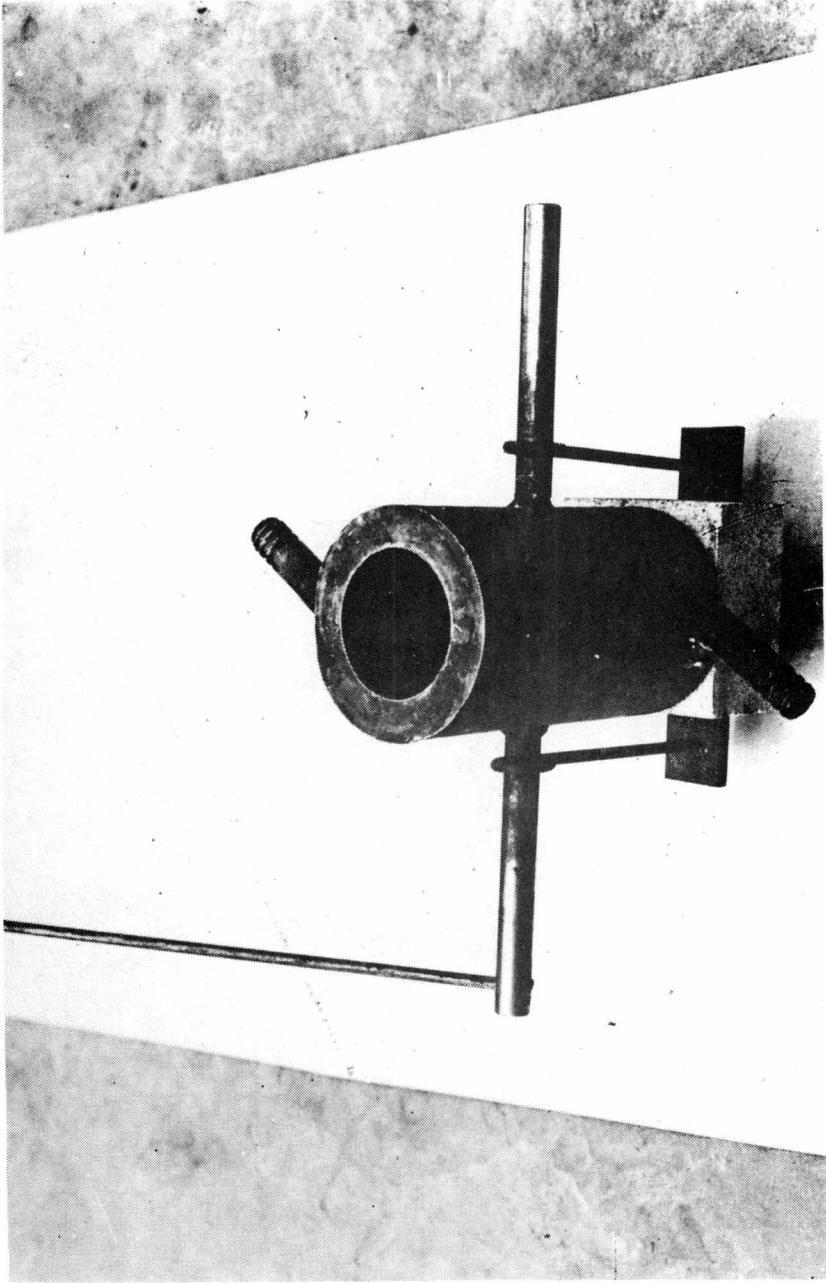


Fig. 6

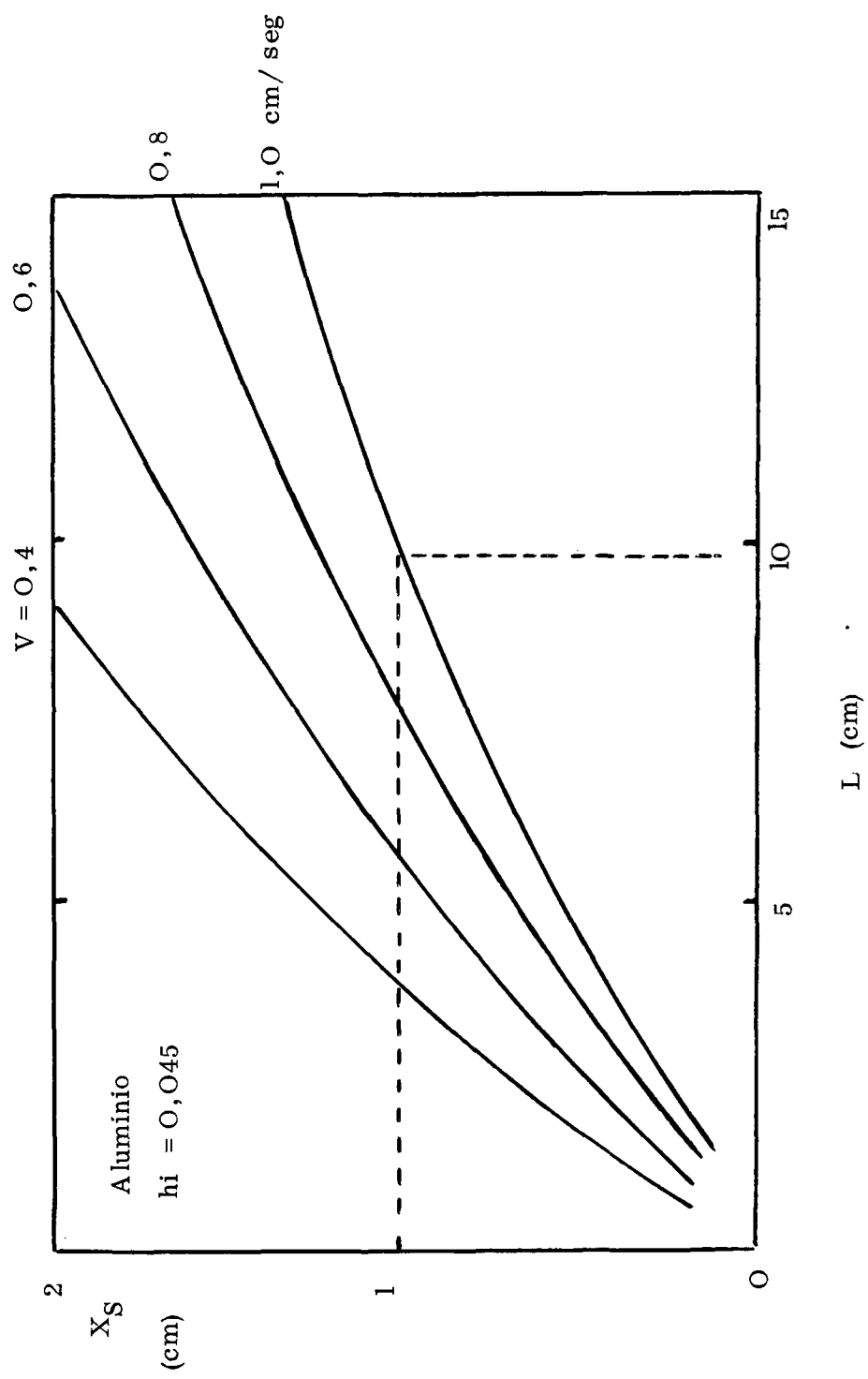


Fig. 7

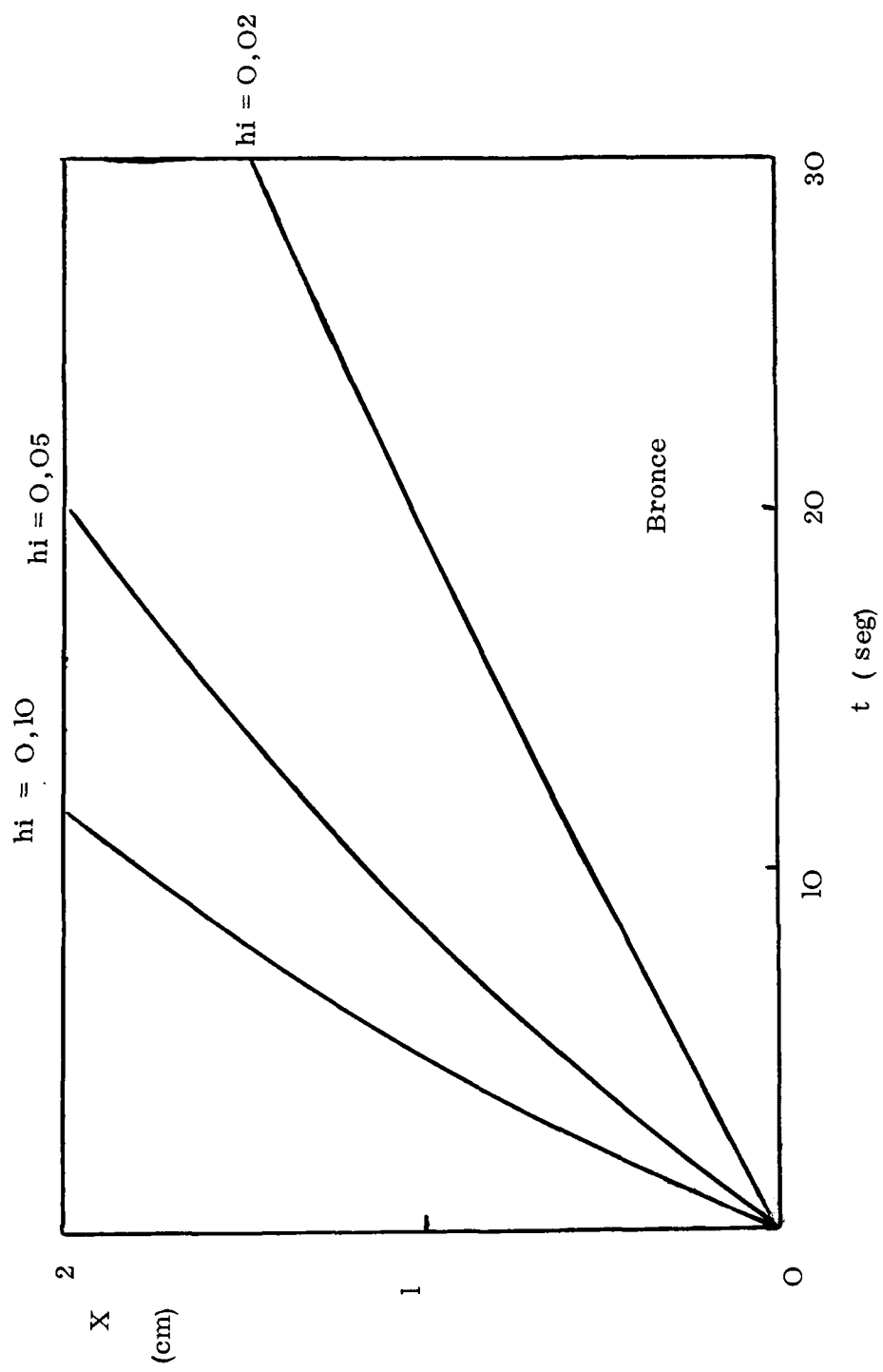


Fig. 8

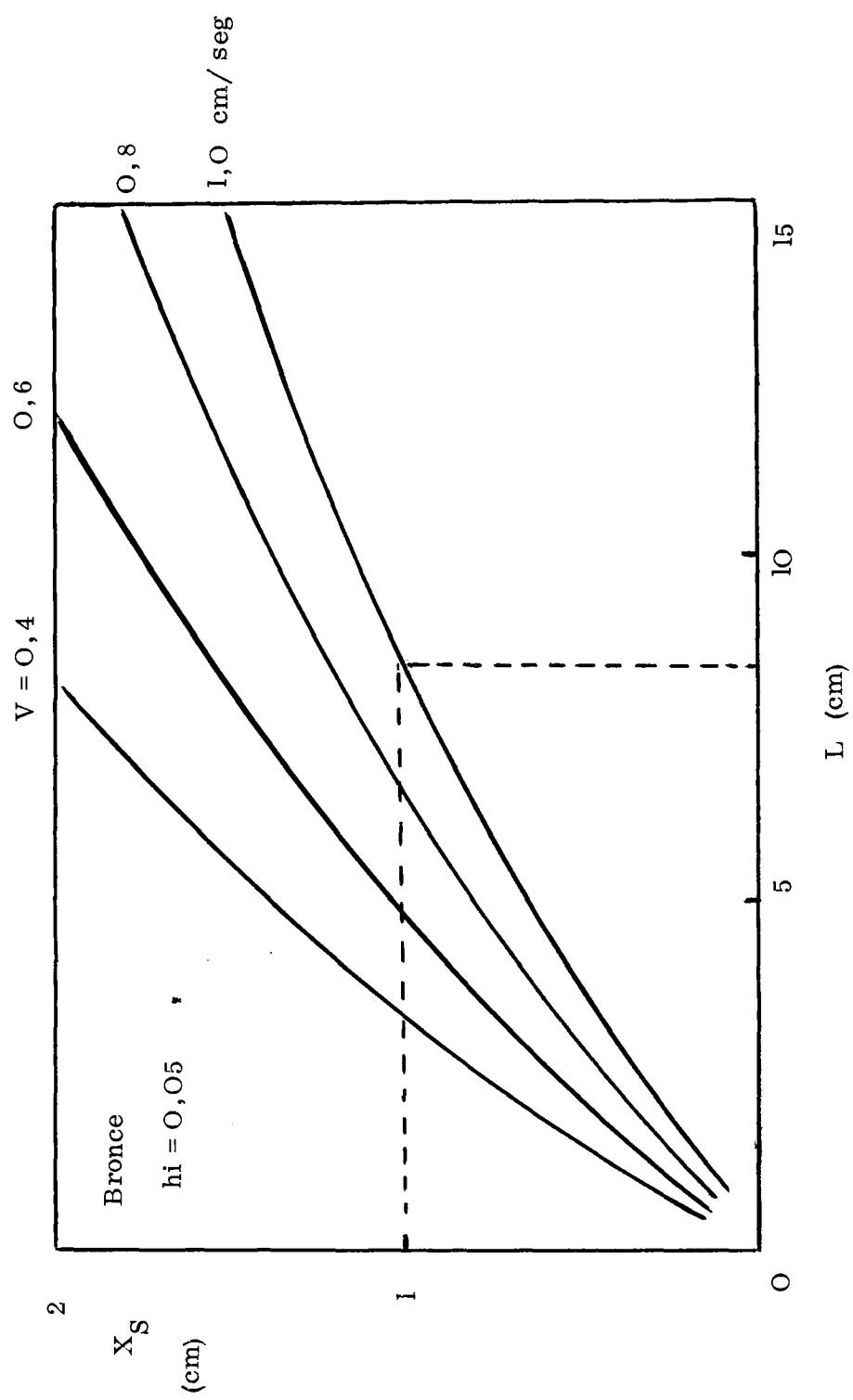


Fig. 9

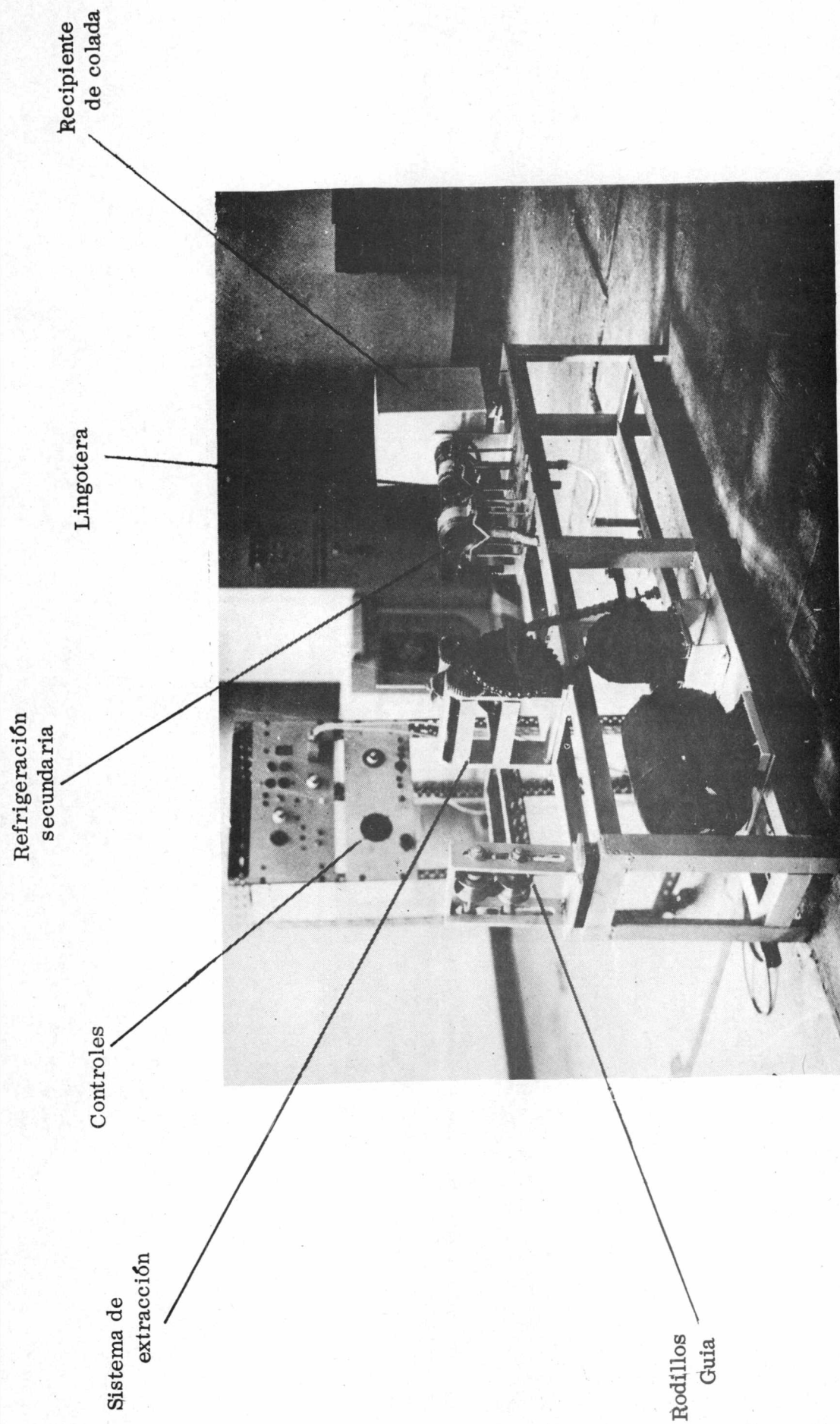


Fig. 10