11535

/36

355



CONSEJO FEDERAL DE INVERSIONES

PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO



# P L A N   A G U A   S U B T E R R A N E A

## RESUMEN DE ALGUNOS METODOS PARA LA INTERPRETACION DE ENSAYOS DE BOMBEO

DR. ING. AGUSTIN NAVARRO
Hidrogeólogo
Naciones Unidas

Este informe se eleva al Consejo Federal de Inversiones previo a su aprobación por las Naciones Unidas o por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo y por lo tanto no representa necesariamente los puntos de vista de estas organizaciones.

JUNIO 1969

Impreso en Argentina - Printed in Argentine
Hecho el depósito que marca la ley 11.723

Alsina 1401 Buenos Aires República Argentina

RESUMEN DE ALGUNOS METODOS PARA LA INTERPRETACION DE ENSAYOS DE BOMBEO

# INDICE

# I) FINALIDAD DE LOS ENSAYOS DE BOMBEO

Los ensayos de bombeo sirven para tres propósitos principales: 1) Definir las características puntuales del acuífero en el entorno del pozo utilizado; 2) Definir las características del funcionamiento del pozo de bombeo, y 3) Aproximar las características zonales del acuífero.

1) Características puntuales del acuífero:

- Acuífero libre
- Acuífero confinado
- Acuífero semi confinado
- Permeabilidad, K (m/día)
- Transmisividad, horizontal T, ($m^3$/m.día); vertical T', ($^1$/día)
- Coeficiente de almacenamiento S (%)
- Presencia o ausencia de límites laterales cercanos (barreras, río, etc.)

2) Características del pozo de bombeo

- Curva depresión-tiempo-tiempo (a caudal constante)
- Curva depresión-caudal
- Capacidad específica $C_S$ $(\frac{l/hora}{m})$
- Pérdidas de carga, C $(\frac{día^2}{m^5})$

3) Características zonales del acuífero

- K
- T, T'
- S

# II) CRITERIO GENERAL PARA LOS ENSAYOS

Las anteriores características pueden obtenerse con un ensayo de 1 hora de duración, o requerir un ensayo de un mes de duración.

Las particularidades del acuífero y las propias de la construcción del pozo y del equipo de bombeo pueden hacer necesario un sólo caudal de prueba o tres o mas caudales diferentes.

Por todo ello, un ensayo necesita gran flexibilidad en el proyecto y en la operación. Sólo una buena experiencia personal y un buen conocimiento general de la región pueden ayudar a resolver cada caso concreto.

## III) TIPOS DE ENSAYOS DE BOMBEO A CAUDAL CONSTANTE

Los ensayos en la mayoría de los casos prácticos se realizan con caudal constante, midiendo tiempos y depresiones. Dentro del tipo de ensayos a caudal constante hay dos clases importantes de pruebas: 1) Régimen permanente, y 2) Régimen transitorio .

1) Régimen permanente +

Se requiere un pozo de bombeo y dos pozos de conservación. Sólo en el caso de conocer las pérdidas de carga, C, en el pozo de bombeo, puede éste utilizarse como uno de los pozos de observación (en este caso se corrige la depresión s en $s - C.Q^2$ y se hace $r_1$ = r pozo).

El ensayo consiste en bombear durante un cierto tiempo con caudal, $Q_{(\frac{m^3}{dia})}$ hasta que las depresiones $s_1$ (m) y $s_2$ (m) en dos pozos de observación a distancias respectivas $r_1$ (m) y $r_2$ (m) del pozo de bombeo se estabilicen.

Con este ensayo se obtiene solamente el valor de la K o de la T del acuífero (m = espesor saturado (m); log = logaritmo decimal)

Acuífero confinado (Dupuit):

$$K = \frac{0{,}366\ Q}{m} \qquad \frac{\log \frac{r_2}{r_1}}{s_1 - s_2}$$

Acuífero libre (Thiem)

$$K = \frac{0{,}732\ Q \cdot \log \frac{r_2}{r_1}}{(m - s_2)^2 - (m - s_1)^2}$$

El ensayo en régimen permanente tiene la ventaja de dar valores de K sólidos, pero requiere a veces largos tiempos de bombeo y la ejecución de al menos un piezómetro. Por ello, en la práctica representa un lujo, y pocas veces se puede aplicar.

2) Régimen transitorio

Se bombea con caudal Q y se miden tiempos-presiones. No se requieren necesariamente pozos de observación, aunque en la práctica se utilicen para ganar seguridad en los resultados, y el tiempo necesario de bombeo suele ser más corto que en regimenes permanentes.

+ Ver referencia en Bibliografía (1)

La fórmula general dela depresión es:

$$s = F(r,\ t,\ T,\ S,\ T') \cdot Q + C \cdot Q^2 \qquad (1)$$

siendo

$s$ = depresión en el punto de observación

$F$ = función de las variables indicadas entre paréntesis

$r$ = distancia entre el punto de bombeo y el de observación. Si el pozo de bombeo es el mismo de observación, $r = r_p$, radio del pozo de bombeo (m)

$t$ = tiempo de observación (días), ( horas x 24 ), (minutos x 1.400), (segundos x $8{,}64 \times 10^4$).

$T = K.m$ = transmisividad horizontal ($m^3$/día.m)

$S$ = coeficiente de almacenamiento = $S_e + S_y$ (sin dimensiones)

$T' = K/m$ = transmisividad vertical ($^1$/día)

$Q$ = caudal de bombeo ($m^3$/día)

$C$ = constante de pérdidas de carga del pozo ($\frac{día^2}{m^5}$)

$C_s$ = capacidad específica

Y de donde pueden obtenerse en el caso mas general $T$, $T'$, $S_e$ , $S_y$ , $C$ y $C_s$.

La función F es distinta según el tipo de acuífero que estemos ensayando. Antes de aplicar esta función es preciso reconocer cual es ese tipo de acuífero, de forma que se utilice la F apropiada.

Todo el resto de este informe se dedica a la utilización de la función F y el régimen transitorio.

## IV) DEFINICION DE PARAMETROS Y CONSTANTES

K (m/día) ($m^3$/día.$m^2$), permeabilidad o conductividad hidráulica, es la cantidad de agua ($m^3$/día) que puede circular a través de una sección del acuífero de un metro cuadrado ($m^2$) bajo un gradiente de uno (100/100).

T ($m^2$ /día) ($m^3$/día), transmisividad horizontal, es la cantidad de agua ($m^3$/día) que circula a través de una sección del acuífero de altura igual a la total saturada del acuífero y anchura 1 metro (m) bajo un gradiente de uno (100/100).

T' ($^1$/día) ($\frac{m^3}{día.m^2.m}$) transmisividad vertical, es la cantidad de agua ($m^3$/día) que atraviesa una superficie de 1 metro cuadrado ($m^2$) en el techo o en la base de un acuífero cuando la diferencia de altura de agua respecto a dicha superficie (carga hidráulica) es un metro (m).

S (%) coeficiente de almacenamiento, es la cantidad de agua ($m^3$) cedida por un prisma vertical del acuífero, de sección un metro cuadrado ($m^2$) y altura la del acuífero, cuando la carga hidráulica (altura de agua) del acuífero disminuye un m:tro (m). En general, S se compone de dos sumandos:

$$S = S_e + S_y$$

$S_e$ (%) corresponde a una reacción elástica del acuífero frente a la disminución de carga. Una parte es debida a expansión elástica del agua, $S_{ea}$ y otra a compresión elástica del esqueleto del acuífero, $S_{ee}$.

$$S_{ea} = \beta . \theta . \gamma . m$$

$$S_{ee} = \sigma . \gamma . m$$

$$S_e = m \, \gamma . (\sigma + \theta \beta)$$

siendo

m = espesor saturado del acuífero (m)

$\gamma$ = peso específico del agua $(\frac{Kg}{m^3})$

$\beta$ = inverso del módulo de elasticidad del agua $(\frac{m^2}{Kg})$

$\sigma$ = inverso del módulo de elasticidad del armazón sólido del acuífero $(\frac{m^2}{Kg})$

$\theta$ = porosidad del acuífero (%)

$S_y$ (%) corresponde a la porosidad eficaz del acuífero $\theta_e$, y es la cantidad de agua ($m^3$) suministrada por un prisma de acuífero de sección un metro cuadrado ($m^2$) y altura igual a un metro (m) cuando se vacía por gravedad durante un tiempo infinito. La fórmula de vaciado o de la cantidad de agua suministrada por el vaciado tiene una forma de exponencial con el tiempo y puede ser variable según tipos de acuíferos Hay acuíferos en que el vaciado es casi instantáneo, y en otros se requieren varios días y aún meses para conseguir que escurra casi toda el agua. Cuando se trata de acuífero en carga confinado, evidentemente no hay vaciado, y $S_y$=0, de dónde $S=S_e$.

El valor de S varía generalmente entre

$1 - 10^{-2}$ para acuíferos libres

$10^{-2} - 10^{-3}$ para acuíferos semiconfinados

$10^{-3} \div 10^{-6}$ para acuíferos confinados

$C_s$ $(\frac{m^3/hora}{m})$ es la cantidad de metros cúbicos (o litros) por hora que puede suministrar el pozo de bombeo con una depresión de 1 metro. Utilizando un sistema conveniente de unidades puede escribirse, de la fórmula general de la depresión:

$$C_s = \frac{Q}{s} = \frac{1}{F\ (r,\ t,\ T,\ S,\ T')\ +\ C.Q}$$

Puede verse que $C_s$ depende de gran número de variables. No obstante, para valores prolongados de bombeo, cuando la depresión está prácticamente estabilizada, F es casi constante (Cte.) y también lo es C. Si C.Q es pequeño con relación a lación a F, se puede despreciar, resultando:

$$C_s = \frac{Q}{s} = \frac{1}{Cte.}$$

En estas condiciones, Logan (+) da la relación aproximada:

Acuíferos confinados: $\frac{Q}{s} = \frac{T}{1,22}$

Acuíferos libres: $\frac{Q}{s} = \frac{T(2m - s)}{2,43\ m}$

C, $\left(\frac{día^2}{m^5}\right)$, es la constante de pérdida de carga de agua en el pozo de bombeo. $C.Q^2$ corresponde al exceso de depresión s que se produce en el pozo, además de la depresión teórica, debido al regimen turbulento del agua al atravezar las paredes del pozo, el macizo filtrante y filtro si los hay. Evidentemente, en un pozo de observación que no sea el de bombeo, C = O y

$$s = F(r,\ etc.)\ .\ Q$$

## V) ENSAYO DE BOMBEO EN REGIMEN TRANSITORIO

Cuando se utiliza un solo pozo para el bombeo y observación, sólo pueden observarse los valores de T, C, $C_s$. Incluso en muchos casos, para obtener el valor de T hace falta obtener previamente el valor de C, para corregir las depresiones observadas s y utilizar como valor de la depresión $s-C.Q^2$. Por descontado, C y $C_s$ solo se pueden hallar midiendo en el pozo de bombeo. Cuando se utiliza un pozo de observación diferente del de bombeo pueden obtenerse además los valores de S, T', $S_e$, $S_y$.

Los principales tipos de acuíferos para los que existen funciones F calculadas se suponen horizontales, homogéneos, isótropos, uniformes, con pozos totalmente penetrantes. Supondremos C = O o bien ya corregido.

1) Casos generales

a) Acuíferos confinados. Carecen de recarga y el agua es cedida a expensas de del coeficiente de almacenamiento, $S=S_e$, (componente elástica).

La función correspondiente es (Theis) (+) :

(+) Ver Bibliografía: Logan (2); Theis (3)

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(\mu)$$

$$\mu = \frac{r^2 \; S}{4 \; Tt}$$

W (u) es la envolvente en los ábacos 2, 3, 6, 8 ó 9.

O bien (Carslaw y Jaeger)+

$$s = \frac{Q}{4\pi T} S(\tau, \rho)$$

$$\tau = \frac{T \; . \; t}{S \; . \; r_w^2}$$

$$\rho = \frac{r}{r_w}$$

$S(\tau, \rho)$ corresponde al ábaco nº 1.

b) <u>Acuíferos semi-confinados</u>. (1). Están encima o debajo de una capa semifiltrante que los separa de otro acuífero, y a través de la cual puede circular verticalmente cierta cantidad de agua. La función correspondiente es (Hantush - Jacob)+

$$s = \frac{Q}{4 \quad T} W(u, \beta)$$

$$u = \frac{r^2 \; s}{4 \; T \; t} \left(1 + \frac{S'}{3}\right)$$

$$\beta = \frac{r}{B}$$

$$B^2 = \frac{T}{T'}$$ (T' = transmisividad vertical de la capa semifiltrante)

$W(u, \beta)$ corresponde al ábaco nº 2. (S' se ha de estimar por tanteo. Se suele tomar igual a cero).

c) <u>Acuífero semi-confinado</u>. (2). Para los primeros instantes del sistema acuífero anterior, y para cualquier instante de un sistema acuífero en el que la capa semifiltrante sea muy potente y proporcione ella misma el agua de recarga (en ausencia de otro acuífero del de bombeo) la función correspondiente es (Hantush)+

$$s = \frac{Q}{4\pi T} H(u, \beta)$$

$$\beta = \frac{r}{4B} \sqrt{\frac{S}{S'}} \; ; \quad u = \frac{r^2 \; S}{4 \; T \; t}$$

$$B^2 = \frac{T}{T'}$$

+ Ver Bibliografía (4) y (5).

$H(u, \beta)$ corresponde al ábaco nº 3. ($S'$ ha de estimarse por tanteo. Se puede tomar $S' = S$

d) <u>Acuíferos libres con $S_y$ instantáneo</u>. Carecen de recarga, el agua es cedida a expensas de $S_y$, y la variación del espesor saturado es pequeña con relación al espesor saturado. La función correspondiente es ( (Boulton)+:

$$s = \frac{Q}{2 \quad K\,m} (1 + C_f)\; V(\tau', \rho')$$

$$\tau' = \frac{K \cdot t}{S_y \cdot m}$$

$$\rho' = \frac{r}{m}$$

$V(\tau', \rho')$ corresponde al ábaco nº 4, y el coeficiente de corección $C_f$ al ábaco nº 5.

e) <u>Acuíferos libres con $S_y$ retardado</u>. Para los primeros instantes de bombeo (varios minutos) puede aplicarse $W(u)$ (Theis) con $S = S_e$. Para un tiempo intermedio (de varios minutos a varias horas) se aplica $W(u, \beta)$, (Hantush), con $S = S_e$. Para los instantes finales del proceso, si el bombeo es suficientemente largo, la función correspondiente es (Boulton)+:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \quad W_y \left(u_y, \frac{r}{D}\right)$$

$$U_y = \frac{r^2\, S_y}{4\; T\; t}$$

$$D^2 = \frac{T}{\alpha\, S_y}$$

$$\alpha = \left(\frac{r}{D}\right)^2 \cdot \frac{1}{U_y \cdot 4t}$$

$$\alpha \cdot T_{wt} = f\left(\frac{r}{D}\right)$$

$T_{wt}$ mide el tiempo que se tarda en poder aplicar la ecuación del régimen final, única que proporciona el valor $S_y$.

$W_y\left(u_y, \frac{r}{D}\right)$ corresponde al ábaco nº 6. La relación $(\alpha \cdot T_{wt}, f\left(\frac{r}{D}\right)$ se da en el ábaco nº 7.

2) <u>Casos constructivos especiales</u> .

a) Antepozos. Cuando en un acuífero de Theis se bombea con el agua en un antepozo, y se mide en el mismo antepozo, la función correspondien-

+ Ver Bibliografía (4), (6) y (7)

te es (Papadopoulos)+:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} F(U_w, \alpha)$$

$$U_w = \frac{r_w^2 \cdot S}{4\,T\,t}$$

$$\alpha = \frac{r_w^2 \cdot S}{r_e^2}$$

$r_w$ = radio del pozo

$r_e$ = radio antepozo

$F(U_w, \alpha)$ corresponde al ábaco nº 8.

b) Penetración parcial. Cuando en un acuífero de Theis, el pozo de bombeo y el de observación son parcialmente penetrantes, con filtros de longitud aproximadamente igual, L, colocados desde el techo del acuífero hasta el fondo de la perforación, la función correspondiente es (Hantush)+

$$s = \frac{Q}{4\,K\,L} M(u, \beta)$$

$$u = \frac{r^2 . S}{4\,T\,t}$$

$$\beta = \frac{L}{r}$$

$M(u, \beta)$ corresponde al ábaco nº 9. Si el pozo de observación dista del de bombeo mas de 1,5 m el efecto de penetración parcial desaparece.

VI) APLICACION DE LAS ANTERIORES FUNCIONES

Se dibuja el gráfico (t,s) del ensayo en papel doble logarítmico. Se superpone el ábaco correspondiente y, manteniendo los ejes paralelos, se busca coincidencia de curvas. En la zona de coincidencia se selecciona un punto del ensayo, $(t_c, s_c)$ y el punto correspondiente del ábaco, $(1/u_c, F_c, \beta_c, t_c$, etc.) Las fórmulas anteriores permiten determinar los parámetros hidráulicos. En el caso V) 1) e), de acuífero con $S_y$ retardado, el valor de r/D ha de coincidir con el de $\beta$ aplicando V) 1) b) a los primeros y medios tiempos de bombeo.

VII) OTROS ARTIFICIOS DE CALCULO

1) Método de aproximación logarítmica (Jacob)+

+ Ver bibliografía (1), (4), (5) y (7).

Para un acuífero de Theis, la función W(u) admite un desarrollo en serie, en función de u. A partir de un cierto tiempo, los valores de u se hacen suficientemente pequeños para poder sustituir la serie

$$W(u) = -0{,}5772 - \log u - \sum_{n=1} (-1)^n \frac{u^n}{n.n!}$$

por sus dos primeros términos. En tal caso resulta:

$$W(u) = 2{,}3 \cdot \log \frac{2{,}25\ T\ t}{r^2\ S}$$

y la depresión, en el caso mas general

$$s = \frac{0{,}183 \times Q}{T} \cdot \left(\log t + \log \frac{2{,}25\ T\ t}{r^2\ S}\right) + C.Q^2$$

y derivando respecto a log t:

$$\frac{ds}{d \log t} = \frac{0{,}183\ Q}{T}$$

En una representación gráfica (s, log t), resulta una recta cuya pendiente es precisamente $\frac{ds}{d \log t}$, de donde:

$$T = \frac{0{,}183\ Q}{\frac{ds}{d \log t}}$$

y se obtiene el valor de T, directamente en el pozo de bombeo (sin tener necesidad de calcular las pérdidas de carga C) o en un pozo de observación a cualquier distancia.

2) Método de Recuperación (Theis - Jacob)+

Un bombeo de duración (t-t') seguido de una recuperación de duración t' equivale a un bombeo de duración t y una inyección de igual caudal que el bombeado, de duración t'. Si la aproximación logarítmica es válida (t, t' grandes), la depresión residual s sería la suma algebraica: $s = s_1 + s_2$.

$$s_1 = \frac{0{,}183\ Q}{T} \left(\log t + \log \frac{2{,}25\ T}{r^2\ S}\right) + C.Q^2$$

$$s_2 = \frac{0{,}183\ (-Q)}{T} \left(\log t' + \log \frac{2{,}25\ T}{r^2\ S}\right) + C.(-Q)^2$$

$$s = s_1 + s_2 = \frac{0{,}183\ Q}{T} (\log t - \log t') + 2C.Q^2 = \frac{0{,}183\ Q}{T} \log {}^{t}/{}_{t'} + 2C.Q^2$$

+ Ver bibliografía (1)

En una representación gráfica (s, log $^t/_{t'}$) resulta una recta cuya pendiente es

$$\frac{ds}{d \log {}^t/_{t'}} = \frac{0,183\ Q}{T}$$

de donde

$$T = \frac{0,183\ Q}{\dfrac{ds}{d \log {}^t/_{t'}}}$$

y se obtiene el valor de T, directamente en el pozo de bombeo (sin tener necesidad de calcular las pérdidas de carga C) o en un pozo de observación a cualquier distancia.

3) Método de semi-recuperación

Cuando los valores de la depresión en el bombeo y/o recuperación en el pozo de bombeo son demasiados bruscos para poderlos medir, puede bombearse con caudal $Q_1$ durante un tiempo (t-t') y reducir luego el caudal $Q^2$ ($Q_2 \lll Q_1$) por un tiempo t' en el que se mide la depresión s. Como en el párrafo anterior, es $s = s_1 + s_2$, ($t - t' = t_p$ = tiempo de bombeo con $Q_1$) y resulta:

$$T = \frac{0,183}{\dfrac{ds}{d \log {}^t/_{t'}}} \left[ Q_1 - Q_2 \frac{{}^t/_{t'}}{({}^t/_{t'}) - 1} \right]$$

y en un diagrama (s, log t/t') se toma un punto (s, t/t'), se halla la tangente gráficamente y se deduce T directamente en el pozo de bombeo (sin tener necesidad de calcular las pérdidas de carga C).

Un índice de que la aproximación logarítmica es válida resulta cuando el punto de tangente horizontal corresponde al valor

$$t/t' = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2}$$

4) Punto de inflexión+

Para un acuífero del tipo V) 1) b) (semiconfinado 1) de Hantush-Jacob cuando se aprecia durante el bombeo la depresión máxima $s_m$, resulta en un diagrama (s, log t)que la depresión en el punto de inflexión $s_1$ corresponde al valor $s_i = s_m/2$. Si es $t_i$, tg i, el tiempo y el valor de la

+ Ver Bibliografía (1)

tangente en dicho punto de inflexión, se determina la función:

$$f(x) = f\left(\frac{r}{B}\right) = e^{x} K_o(x) = 2,3 \frac{s_1}{tg\ i}$$

y con ayuda del ábaco nº 10, el valor de $x = \frac{r}{B}$ y $K_o\left(\frac{6r}{B}\right)$. De aquí:

$$T = \frac{Q}{4\pi s_i} K_o\left(\frac{r}{B}\right)$$

$$S = \frac{2\ T\ t_i}{B\ r}$$

$$T' = \frac{T}{B^2}$$

5) Recuperación después de cucharear

Si la aproximación logarítmica es válida para acuíferos del tipo de Theis y es V el volumen de agua cuchareado en cada ciclo, t la duración de cada ciclo de cuchareo y q el número de cuchareos desde que se empezó el ensayo hasta el momento de la observación si se hubiera cuchareado todo el tiempo, y p el número de cuchareos si se hubiera cuchareado desde el principio de la recuperación, la transmisividad es:

$$T = \frac{V}{4\pi t}\left[S_q - S_{p-1}\right]$$

siendo $S_j$ el valor correspondiente a j en el ábaco 11, j=q, j=p-1 .

6) Cálculo de la constante de pérdida de carga C en el pozo de bombeo

Según Jacob+ es $s = F\ .\ Q + C\ .\ Q^2$

Se realizan una serie de ensayos a caudales diferentes $Q_1$, $Q_2$,.....$Q_i$, y se miden las depresiones correspondientes $s_1$ , $s_2$ ,...., $s_i$ después del mismo tiempo de iniciar cada bombeo (1 ó 2 horas). Se tiene un sistema de ecuaciones:

$$s_i = F\ .\ Q_1 + C\ .\ Q_1^2$$

para determinar F y C.

Gráficamente: Se dibuja un diagrama ($Q_i$, $s_i/Q_i$). Los puntos deben estar aproximadamente sobre una recta cuya tangente es C y ordenada en el origen F .

Analíticamente: Por mínimos cuadrados,

+ Ver Bibliografía (4)

$$C = \frac{i\,(\Sigma s_i) - (\Sigma Q_i)(\Sigma \frac{s_i}{Q_i})}{i\,(\Sigma Q_i^2) - (\Sigma Q_i)^2} \qquad F = \frac{(\Sigma \frac{s_i}{Q_i})(\Sigma Q_i^2) - (\Sigma s_i)(\Sigma Q_i)}{i(\Sigma Q_i^2) - (\Sigma Q_i)^2}$$

7) Cálculo de la curva caudal-depresión

Si el acuífero tiene cierta recarga de forma que la depresión $s_i$ se estabilice con un caudal $Q_i$ al cabo de cierto tiempo, y si se tiene un grupo de valores $(Q_i, s_i)$, la curva caudal-depresión para el pozo de bombeo es:

$$s = F.Q + C.Q^2$$

siendo las constantes (F, C) calculadas como mas arriba.

## VIII) SELECCION DEL METODO A APLICAR

Algunas características evidentes del pozo o pozos de ensayo o de los acuíferos permiten establecer a veces el método a aplicar.

Por ejemplo, la recuperación después de cucharear es aplicable cuando se observan depresiones medibles al limpiar con la cuchara una perforación recién hecha; o bien, la ausencia de pozo de observación limita el campo del ensayo y hace pensar en la necesidad de un ensayo de caudales escalonados para la determinación de C; o bien la perforación indica un acuífero aparentemente artesiano o libre; etc....

De todas formas, la elección del método de interpretación plantea no pocas dudas, y antes de decidirse por uno u otro hay que examinar el ensayo de depresión-tiempo.

El procedimiento a seguir es el siguiente: Se representa en papel semilogarítmico la gráfica (s, log t) y se ve que forma tiene. Los casos mas corrientes, en ausencias de barreras o límites cercanos se representa en la figura 1.

El grupo de curvas (A) con la particularidad de fuerte depresión en los primeros instantes (entre 0 y 1 a 5 minutos) y concavidad hacia el eje log t suelen corresponder al pozo de bombeo y son producidas por las pérdidas de carga. Determinando el valor de C, y tomando como depresión el valor $s-CQ^2$ estas curvas toman generalmente las formas (B), con la concavidad inicial hacia el eje s.

En el grupo de curvas (B) se pueden diferenciar:

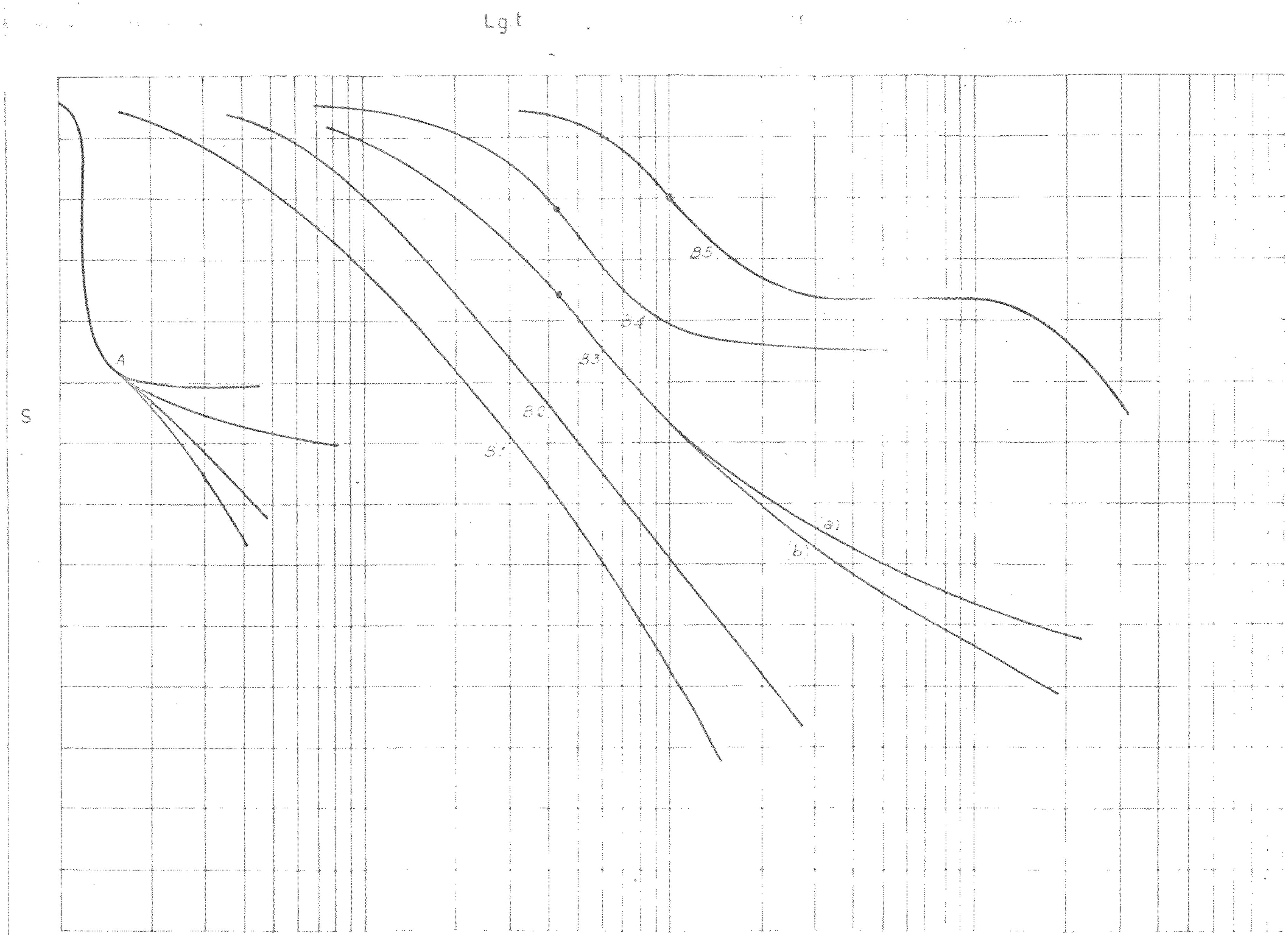


FIG 1

1) Curvas con ligera concavidad mantenida hacia el eje s. Se trata de un acuífero libre, con $S_y$ instantáneo (V), L), d)), o acuíferos de Theis antes de ser válida la aproximación logarítmica (V), 1), a)).

2) La curva se asimila a una recta al crecer t. Se trata de un acuífero de Theis V), 1), a) en el cual es válida la aproximación logarítmica VII), 1).

3) Curvas en ese asimétrica, con un punto de inflexión (p. i.) y la rama final con amplia concavidad hacia el eje t. Es importante saber si esta rama final tiende a una recta o no (3a ó 3b). En el caso (3a), se trata de penetración parcial V), 2), b), o filtración desde una capa semi-filtrante confinante potente V), 1), c). En el caso (3b), hay una recarga directa (río, lago, etc.) o se trata de recarga desde otros acuíferos a través de capas semi-permeables V), 1), b) con $S' \neq 0$.

4) Curvas en ese simétrica respecto al punto de inflexión (p. i.). Se trata de un acuífero semi-confinado V), 1), b), con $S' = 0$. También puede aplicarse el método del punto de inflexión VII), 4).

5) Curvas en doble ese, y tangente en el punto de inflexión paralela a la tangente en el tramo final. Se trata de acuífero libre con $S_y$ retardado V), 1), e).

Los métodos de recuperación y semi-recuperación solo pueden aplicarse propiamente a acuíferos con curvas del tipo (B-2). En tal caso debe utilizarse la última porción recta de la recuperación..

En el caso de aplicar el método de recuperación a curvas tipo (1) se puede obtener una recuperación (s, log t/t') curvada con la concavidad hacia el eje t/t', no interpretable.

En el caso de aplicar el método de recuperación a curvas tipo (3), (5), (6) se puede obtener una recuperación (s, log t/t') curvadas con la concavidad hacia el eje s, no interpretable. En esta hipótesis, el valor mas próximo al T verdadero se obtendrá utilizando la primera porción de la curva (s, log t/t') de recuperación.

IX) PARAMETROS DEL ACUIFERO

1) En acuíferos libres perfectamente homogéneos, donde el movimiento vertical del agua pueda hacerse con igual facilidad que el movimiento horizontal, es decir, donde K vertical = K horizontal, los valores de T, $S = S_e + S_y$ obtenidos en el ensayo de bombeo en un pozo totalmente

penetrante, puedenoonsiderarse representativos de los parámetros del acuífero. Así pues, para estos acuíferos (si el espesor saturado del acuífero es m), se tiene:

$$K_{acuífero} = K_{vertical} = K_{horizontal} = \frac{T}{m}$$

$$S_{acuífero} = S_e + S_y$$

2) En cualquier acuífero confinado, los valores de T, $S = S_e$, obtenidos en el ensayo de bombeo en un pozo totalmente penetrante pueden considerarse representativos de los parámetros del acuífero.

$$K_{acuífero} = K_{horizontal} = \frac{T}{m}$$

$$S_{acuífero} = S_e$$

3) Cuando el pozo de bombeo y el de observación (a distancia relativa menor de 1,5 del espesor saturado) solo penetran parcialmente en los acuíferos es necesario corregir sus depresiones para hacerlos equivalentes a pozos totalmente penetrantes, y de aquí deducir los valores de T, S, aplicables al acuífero. Si no es así la T obtenida representa un límite inferior para la T acuífero:

$$T_{acuífero} > T$$

La S acuífero puede ser igual, mayor o menor que la medida del ensayo.

4) En la mayoría de acuíferos reales, y en especial en los de cuencas sedimentarias fluvio-lacustres modernas (terciario superior ÷ cuaternario) la estratificación y diferenciación zonal vertical es lo suficientemente acusada para que:

$$K_{vertical} \ll K_{horizontal}$$

En tales casos, los valores obtenidos en el ensayo de bombeo solo son representativos de una zona del acuífero, aquella zona situada a la altura de los filtros del pozo o quizás un poco mas arriba y por abajo.+

Si el pozo tiene varios (i) filtros y se ensayan por separado, resulta:

$$T = T_1 + T_2 + \ . \ . \ + T_i$$

+ Ver Bibliografía (9)

$$K\ (\Sigma\ mf) = K_1 . mf_1 + K_2 . mf_2 + \ldots + K_i . mf_i$$

$$K = \frac{\sum_{1}^{i} K_i\ mf_i}{\sum_{1}^{i} mf_i}$$

$$S = S_1 + S_2 + \ldots + S_i$$

Para obtener los valores asignables al acuífero, $T_{acuífero}$, $K_{acuífero}$, $S_{acuífero}$, se opera como sigue:

Podemos acotar un mínimo para las $T_{acuífero}$, $K_{acuífero}$ (m = espesor acuífero saturado; mf = altura filtros)

$$T_{acuífero\ mín,} = T_{ensayo}$$

$$K_{acuífero\ min.} = \frac{T_{ensayo}}{m}$$

y por otra parte, una máxima es:

$$T_{acuífero\ max.} = T_{ensayo} \frac{m}{mf}$$

$$K_{acuífero\ max.} = T_{ensayo} \frac{1}{mf}$$

Cuando dentro de un acuífero saturado de espesor m se han reconocido una serie de zonas útiles hidraúlicamente, zonas de mayor contenido en gruesos, y cuya suma de espesores es $m_u$ ($< m$), y si este reconocimiento se ha hecho en todo el espesor del acuífero, la cota superior puede rebajarse, pasando a

$$T_{acuífero\ max.} = m_e \sum \left(\frac{T_{ensayos}}{mf}\right)$$

$$K_{acuífero\ max.} = \frac{m_e}{\sum mf} \sum \left(\frac{T_{ensayos}}{mf}\right)$$

Si es $T_{acuífero}$ el promedio

$$T_{acuífero} = \frac{T_{acuífero\ max} + T_{acuífero\ min}}{2}$$

en muchos casos prácticos cuando el espesor del acuífero es grande, resulta:

$$T_{acuífero\ max} > T_{acuífero\ real} > T_{acuífero}$$

Respecto a la $S_{acuífero}$ es:

$$S_{acuífero} \gg S$$

siendo mas iguales cuanto mas prolongado es el ensayo.

---ooOoo---

## X) BIBLIOGRAFIA

(1) H. Schoeller .- Les Eaux Scuterraines
Mason du Cie. Paris 1962

(2) J. Logan .- Estimating Transmissibility from Routine Production
Tests of Water Wells
Ground Water, Vol 2, nº 1, Jan. 1964.

(3) J. Ferris, D. E. Knowles, R. H. Brown & R. W. Stallman .- Theory of
Aquifer Tests- U.S.G.S. Water Supply Paper 1536-E, 1962.

(4) M. S. Hantush .- "Hydraulics of Wells" in "Advances in Hydraulics"
Vol 1, Academic Press, New York 1964.

(5) Procedings of the Sympossium on Transient Ground Water Hydraulics,
Colorado State University, Civil Engineering Section. July 25-
ly 25-27, 1963. Publ.CER 63 DEM - M W B 70. December 1963.

(6) T. A. Prickett .- Type - Curve Solution to Aquifer Tests Under Water
Table Conditions. Ground Water, Vol 3, nº 13, July 1965.

(7) Papadopoulos & Cooper .- Bulletin of the International Association
of Scientific Hydrology (I. A. S. H.), 1969.

(8) D. H. Lennox & J. F. Jones .- Transmissivity Determination by the
Bail Test. Method. Ground Water, Vol 2, nº 1, Jan. 1964.

(9) G. J. Stramel .- Realistic applications of Aquifer Tests Procedures.
Public. Works, May 1963. pp 106.

---ooOoo---

XI) ABACOS

I . Función $S(\tau, \rho)$ $\tau$ = tau; $\rho$ = rho

II . Función $W(\mu, \beta)$ $\beta$ = beta

III . Función $H(\mu, \beta)$

IV . Función $V(\tau, \rho)$

V . Función Cf

VI . Función $W_y$ $(\mu_{Ay}, \frac{r}{D})$

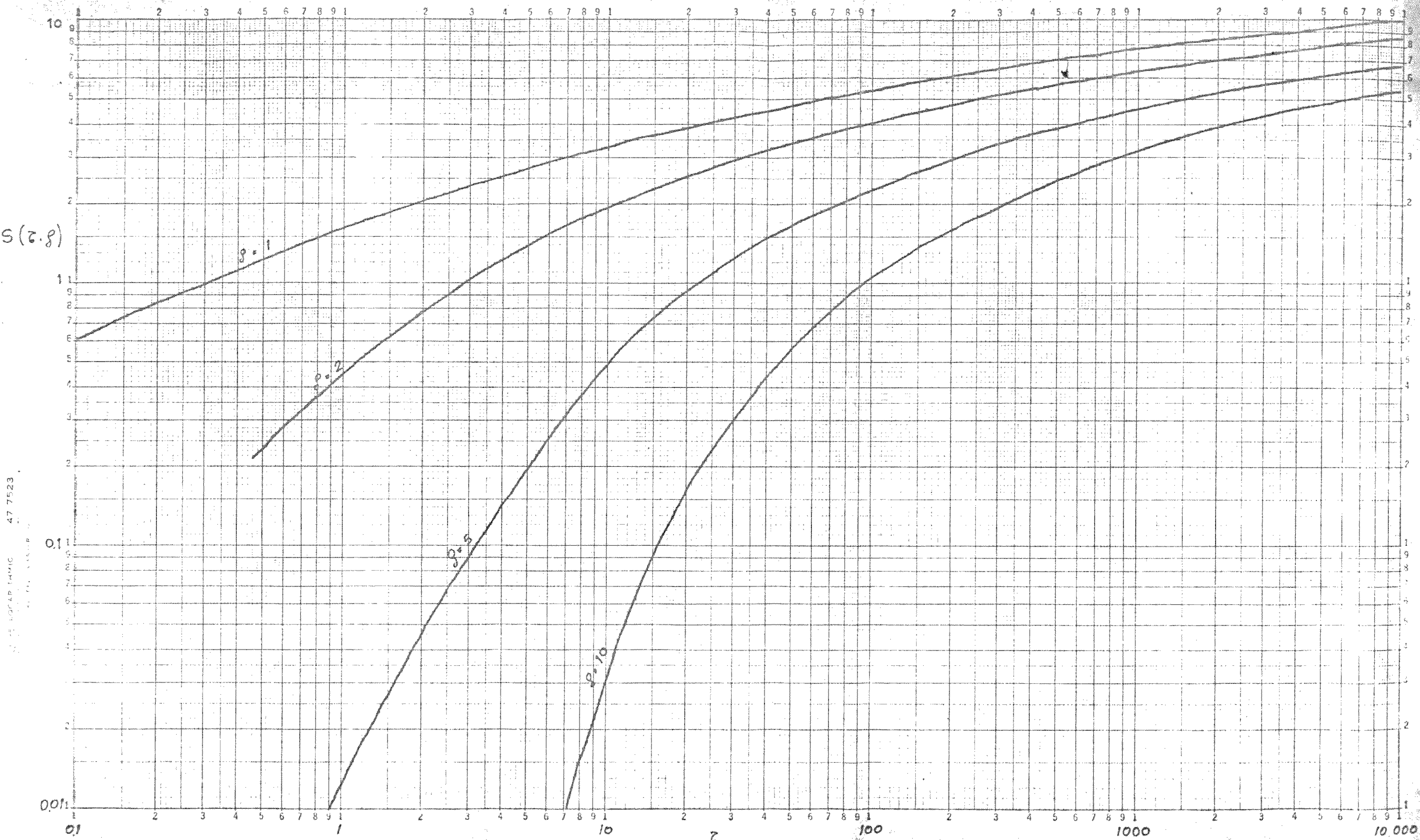
VII . Función $\alpha$ -Twt $\alpha$ = alpha

VIII . Función $F(\mu_w, \alpha)$

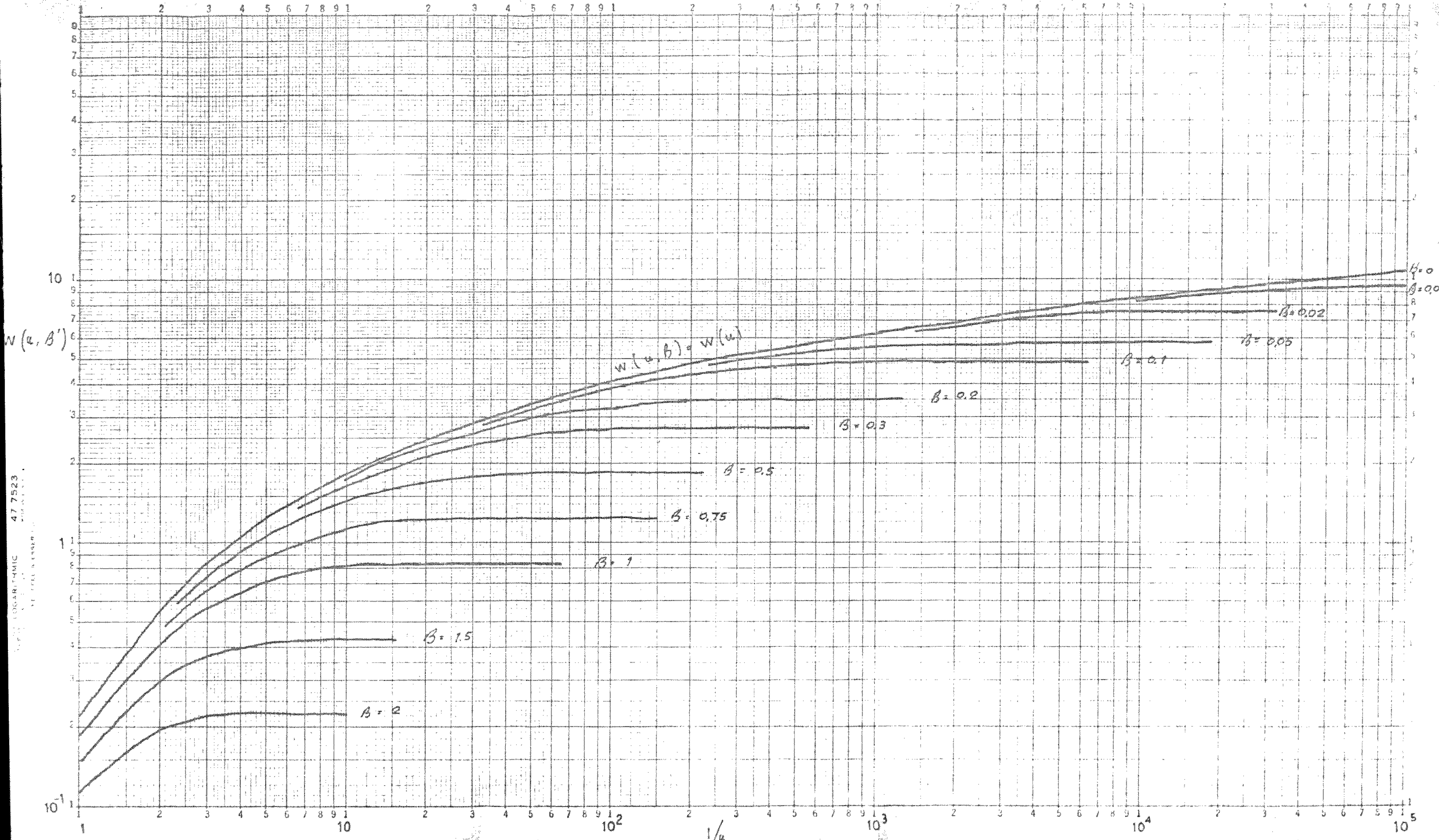
IX . Función $H(u, \beta)$

X . Función $e^x$, $e^{-x}$, $K_o(x)$, $-E_i(-x)$, $-E_i(-x).e^x$, $e^x.K_o(x) = \mathcal{f}(x)$

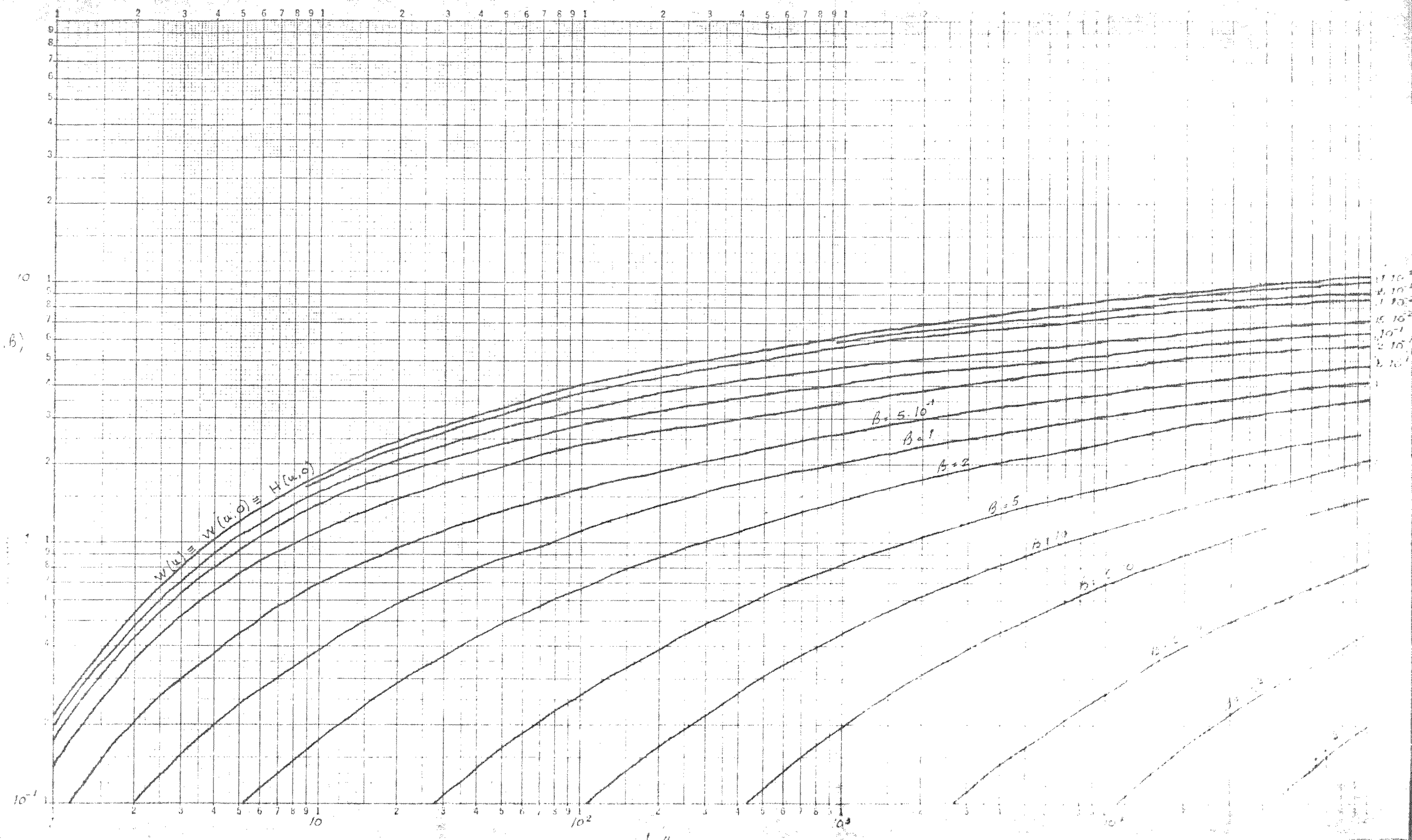
XI . Función $S_j$

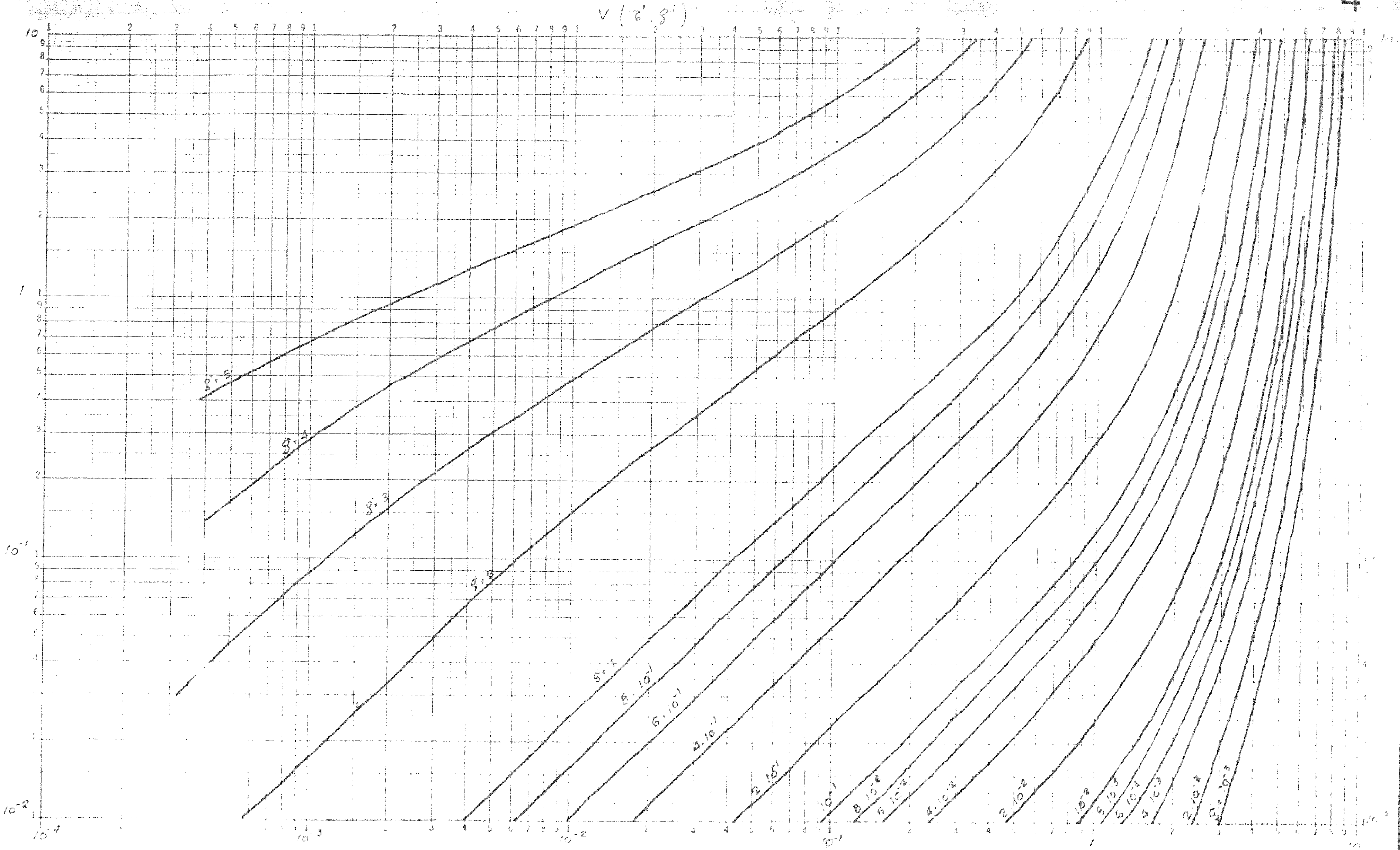


S(τ.ρ)
ρ = 1
ρ = 2
ρ = 5
ρ = 10
10
1
0,1
0,01
0,1
1
10
100
1000
10.000
τ

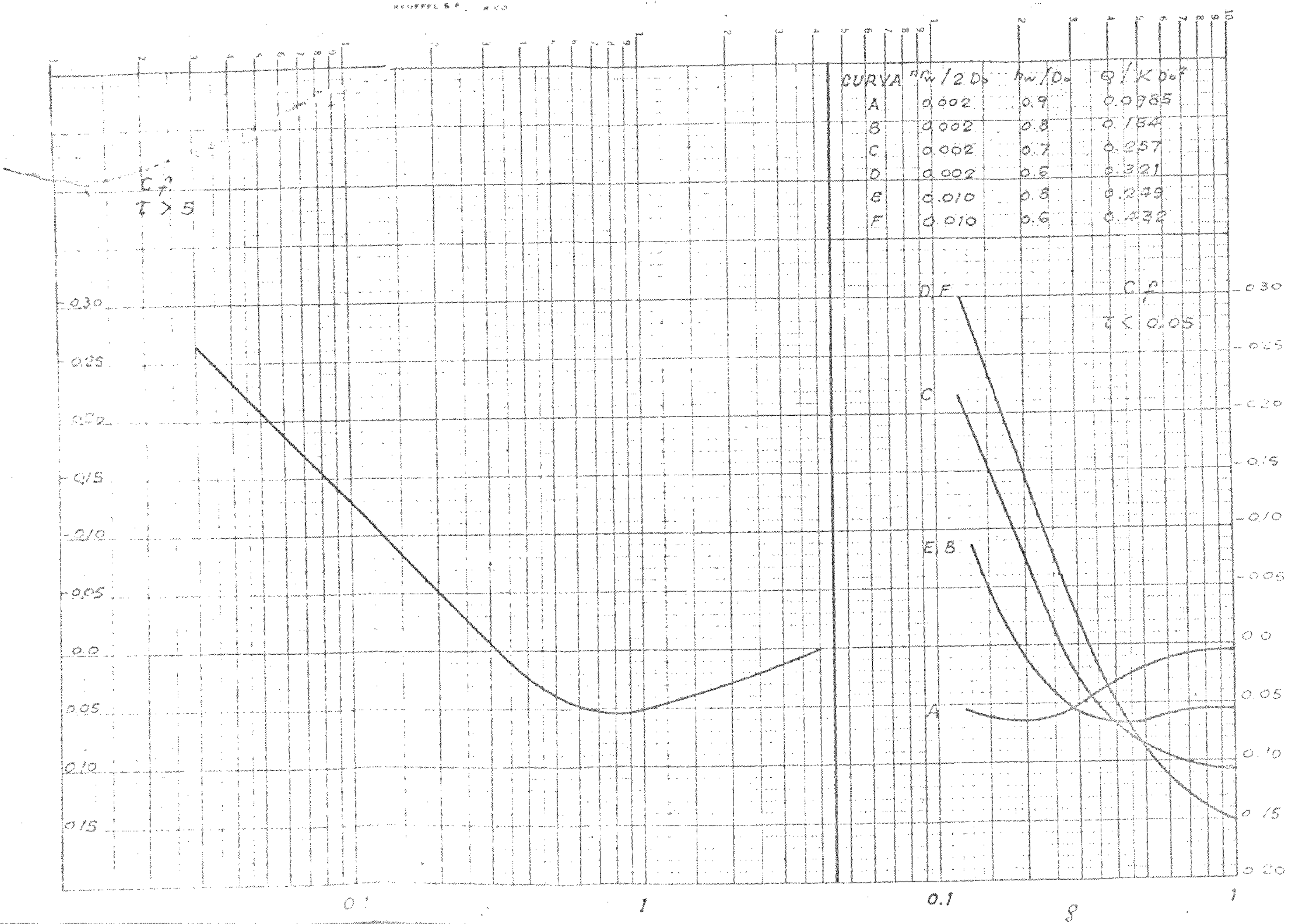


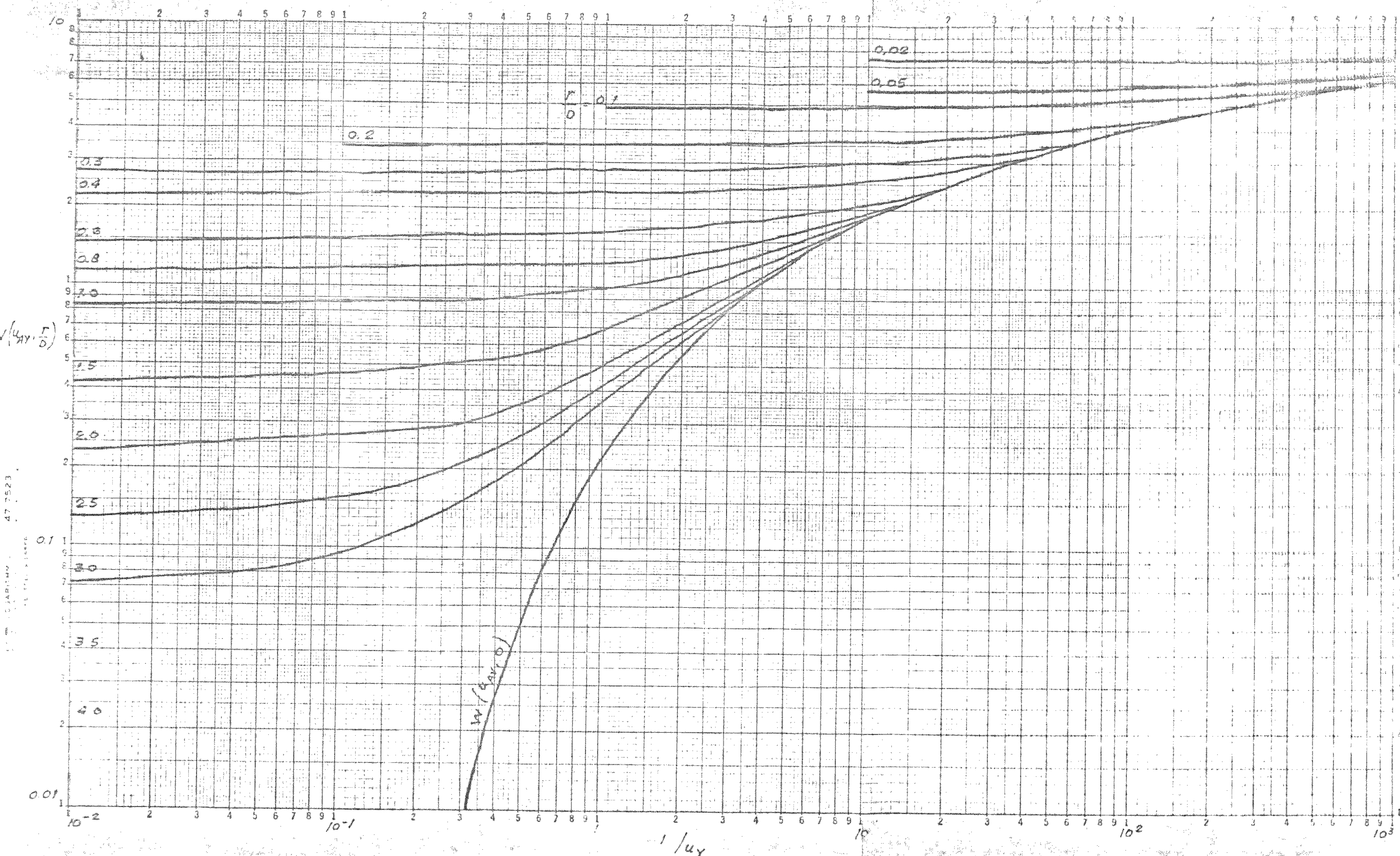
W(u, β')
1/u
W(u, β) = W(u)
β = 0
β = 0.01
β = 0.02
β = 0.05
β = 0.1
β = 0.2
β = 0.3
β = 0.5
β = 0.75
β = 1
β = 1.5
β = 2
10
1
$10^{-1}$
1
10
$10^2$
$10^3$
$10^4$
$10^5$


W(u) ≡ W(u,0) ≡ H(u,0)
β = 5.10⁻¹
β = 1
β = 2
β = 5
10
10⁻¹
10²



V (τ', β')
β' = 5
β' = 4
β' = 3
β' = 2
5·10⁻¹
8·10⁻¹
6·10⁻¹
4·10⁻¹
2·10⁻¹
10⁻¹
8·10⁻²
6·10⁻²
4·10⁻²
2·10⁻²
10⁻²
8·10⁻³
6·10⁻³
4·10⁻³
2·10⁻³
β' = 10⁻³
10
1
10⁻¹
10⁻²
10⁻⁴
10⁻³
10⁻²
10⁻¹
1
10

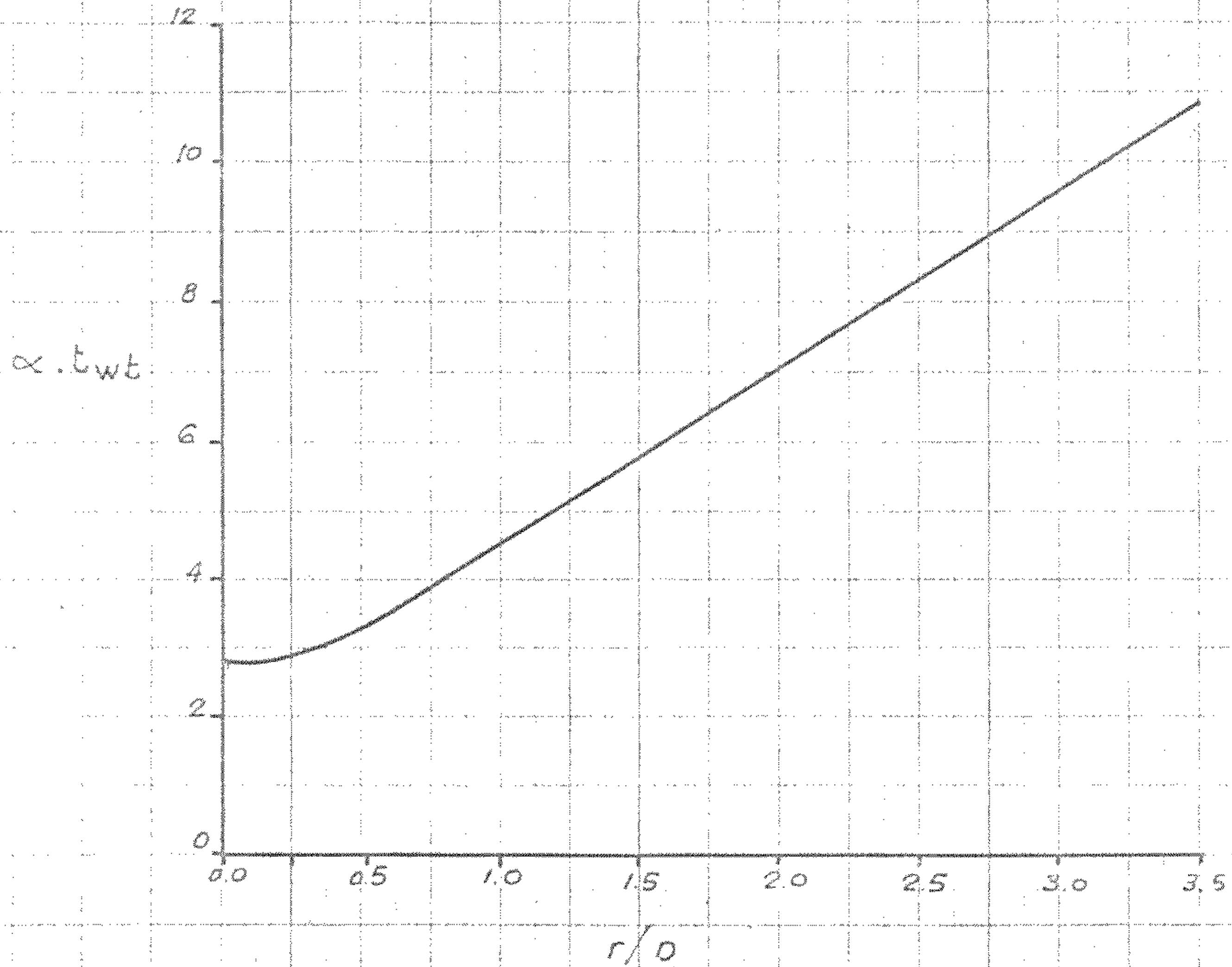

CURVA $r_w/2D_o$ $h_w/D_o$ $Q/KD_o^2$
A 0.002 0.9 0.0985
B 0.002 0.8 0.184
C 0.002 0.7 0.257
D 0.002 0.6 0.321
E 0.010 0.8 0.249
F 0.010 0.6 0.432
Cf
τ > 5
Cf
τ < 0.05
D, F
C
E, B
A
0.30
0.25
0.20
0.15
0.10
0.05
0.0
0.05
0.10
0.15
0.20
1
0.1
1
δ

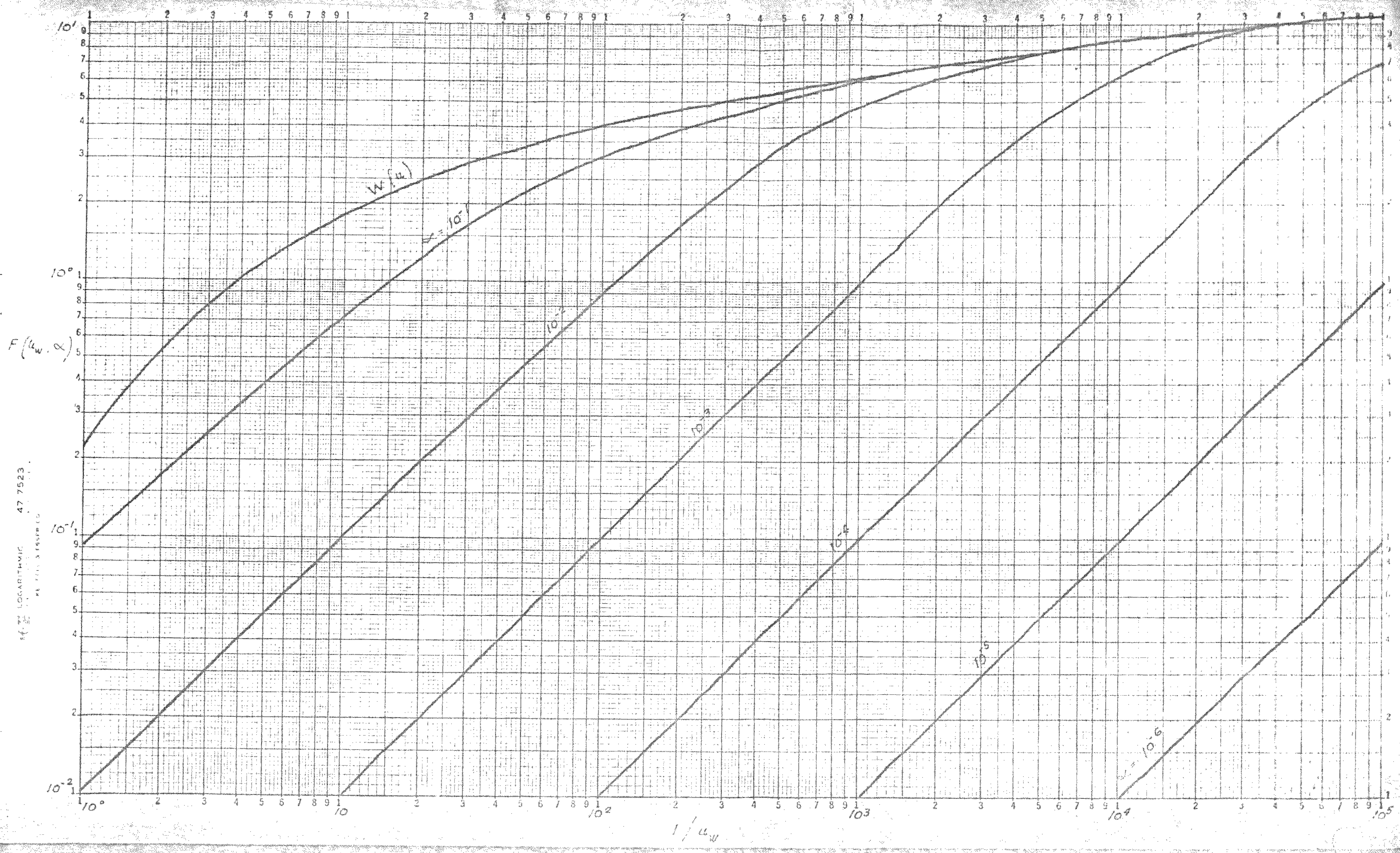


0.02
0.05
r/D = 0.1
0.2
0.3
0.4
0.6
0.8
1.0
1.5
2.0
2.5
3.0
3.5
4.0
W(u_AY, r/D)
W(u_AY, 0)
10
0.1
0.01
10^-2
10^-1
1
10
10^2
10^3
1/u_Y

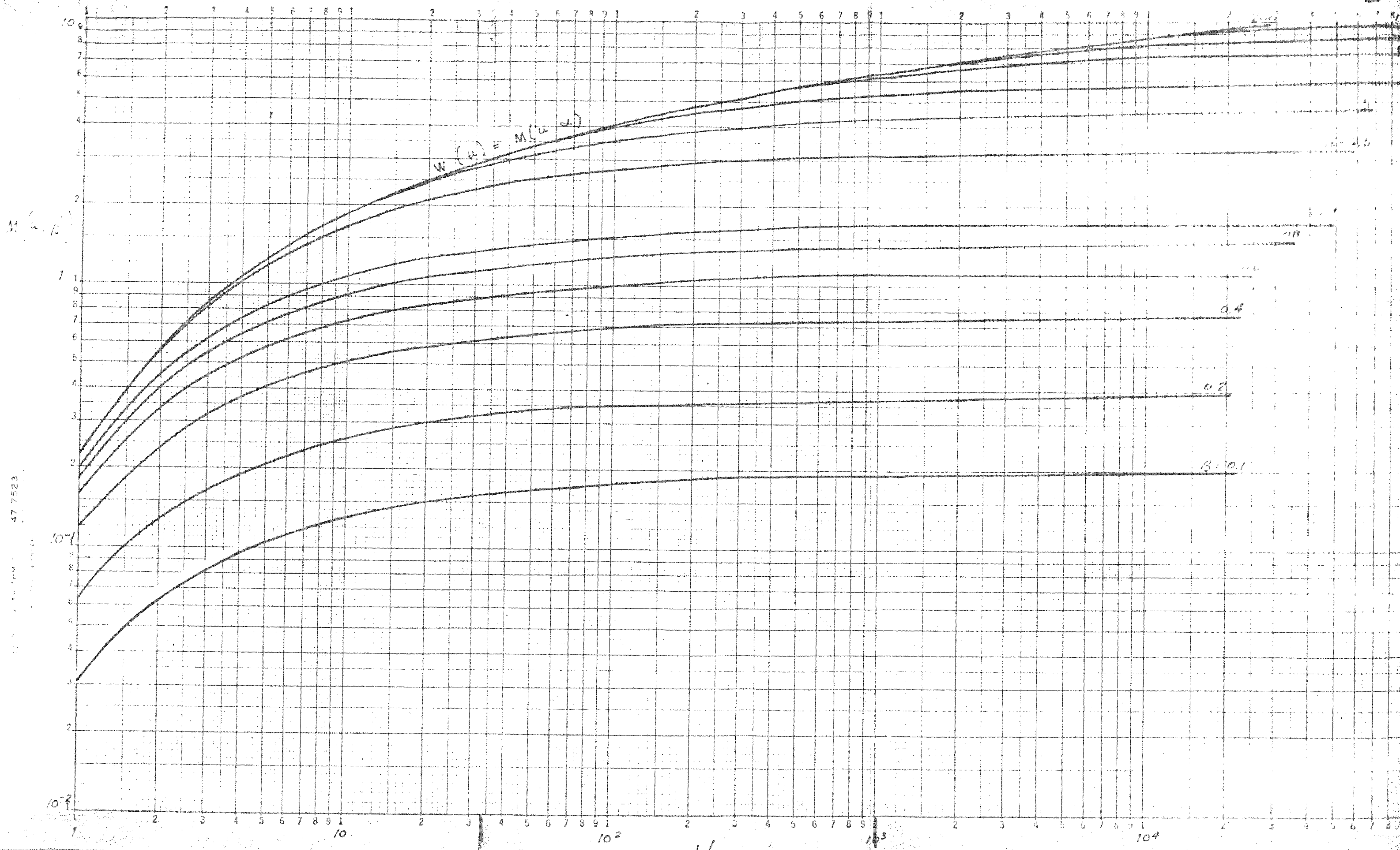
T. A. PRICKETT

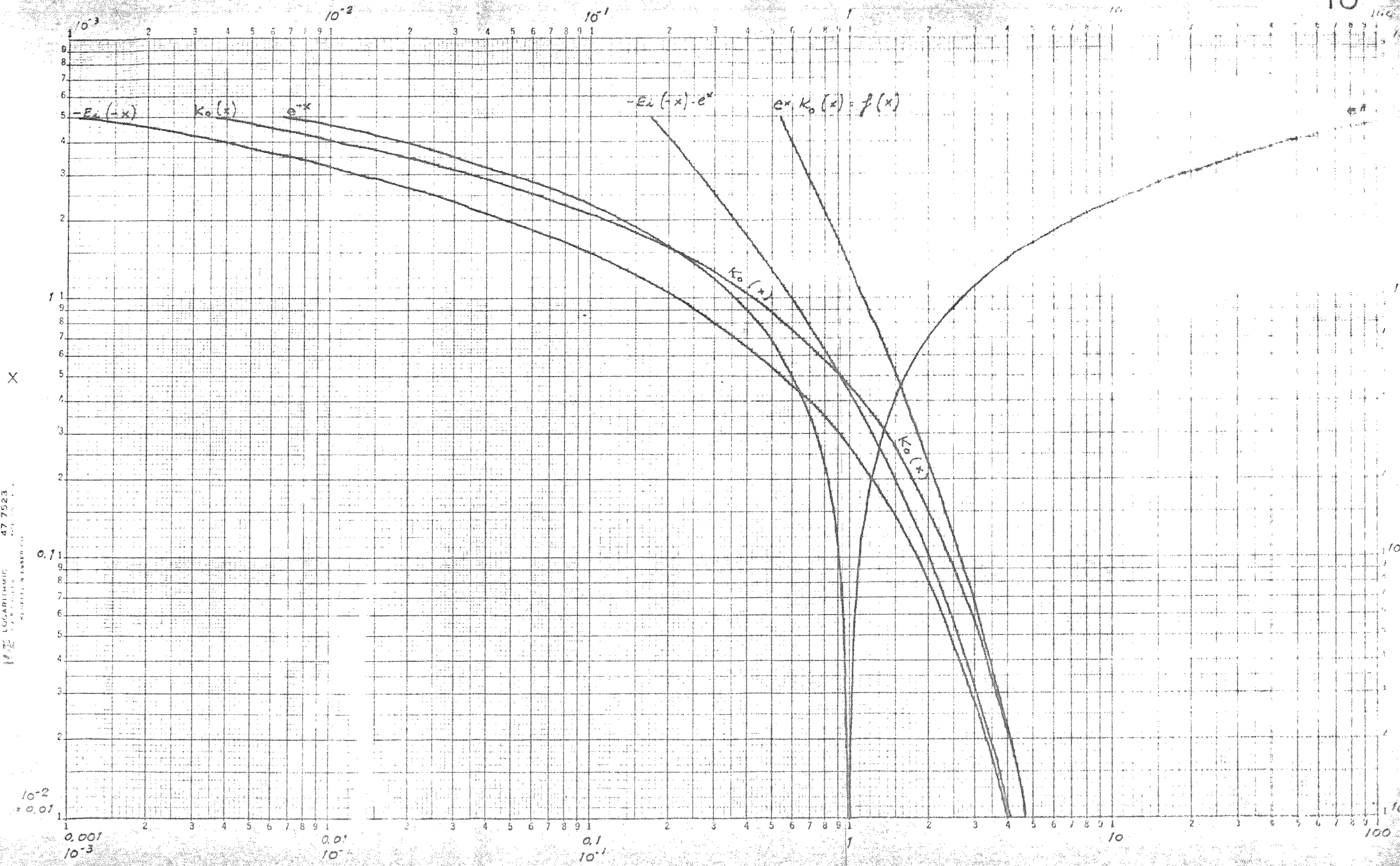
Ground Water. Vol. 3 N: 3 July 1965.

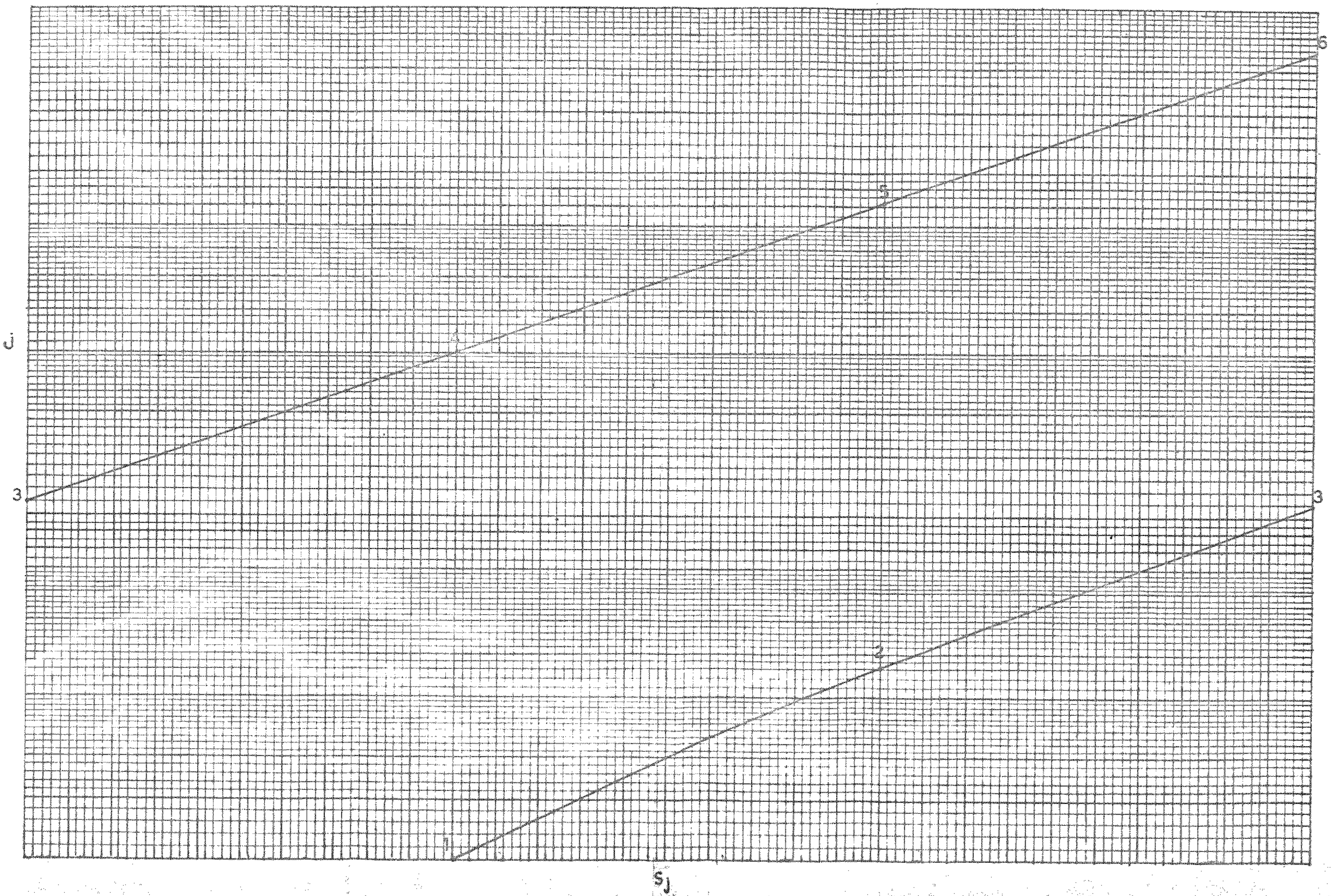




$10^1$
$10^0$
$10^{-1}$
$10^{-2}$
$F(u_w, \alpha)$
$W(u)$
$\alpha = 10^{-1}$
$10^{-2}$
$10^{-3}$
$10^{-4}$
$10^{-5}$
$\alpha = 10^{-6}$
$10^0$
$10$
$10^2$
$10^3$
$10^4$
$10^5$
$1/u_w$
LOGARITHMIC 47 7523


$W(u) = M(u, \infty)$
$M(u, \beta)$
0.4
0.2
$\beta = 0.1$
$1/u$
47 7523


$10^{-3}$
$10^{-2}$
$10^{-1}$
1
10
$-Ei(-x)$
$K_o(x)$
$e^{-x}$
$-Ei(-x) \cdot e^{x}$
$e^{x} K_o(x) = f(x)$
$K_o(x)$
$K_o(x)$
X
1
0,1
$10^{-2}$
= 0,01
0,001
$10^{-3}$
0,01
$10^{-2}$
0,1
$10^{-1}$
1
10
100



j
3
6
5
4
3
2
1
$s_j$