

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

**ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS**

TESIS DOCTORAL

**MODELO DETERMINISTA DE AUSCULTACION
HIDRAULICA**

(ANEJOS B, C Y D. TOMO III)

Presentada por: JOSE ANTONIO RODRIGUEZ GONZALEZ

Dirigida por: GUILLERMO GOMEZ LAA

SEPTIEMBRE, 1987

El presente ejemplar ha servido
de base a los miembros del Tribunal
para calificar su contenido.

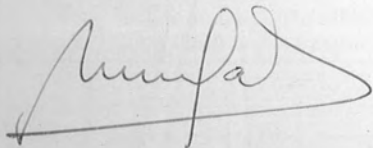
Santander, 14 de octubre de 1987

EL SECRETARIO,



Uº Bº

EL PRESIDENTE



LOS VOCALÉS,



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
Biblioteca



00035128



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA

ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

UNIVERSIDAD
DE CANTABRIA
BIBLIOTECA

TESIS DOCTORAL

MODELO DETERMINISTA DE AUSCULTACION HIDRAULICA

(ANEJOS B, C Y D. TOMO III)

Presentada por: JOSE ANTONIO RODRIGUEZ GONZALEZ

Dirigida por: GUILLERMO GOMEZ LAA

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA Biblioteca	
NM:	75640
NR:	103946
NF:	2848
C:	AM 6.5
NT:	E
	t
	SB

III

SEPTIEMBRE, 1987

UNIVERSIDAD DE SANTANDER
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

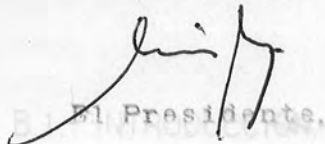
Reunido el Tribunal integrado por los abajo firmantes
el día de la fecha, para juzgar la Tesis Doctoral de

José Antonio Rodríguez Sorzales

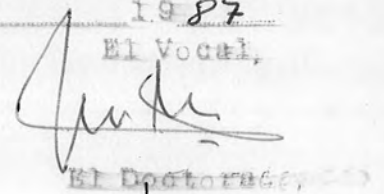
titulada "Modelo de termitista de suscultación
Hidráulica"

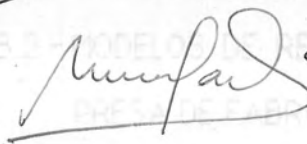
ordó otorgarle la calificación de bpto "Cum Laude"

Santander, 14 de octubre 1987
El Vocal, El Vocal, El Vocal,

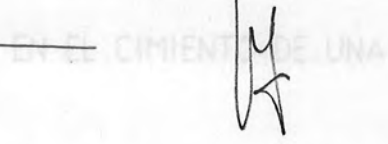

El Presidente,


El Secretario,


El Doctorado,


El Presidente,


ANEJO B


El Doctorado,

MODELOS TEORICOS DE INTERPRETACION DE
LAS REDES DE FILTRACION Y DE LA
INFLUENCIA DE LAS HETEROGENEIDADES
INDUCIDAS EN EL MEDIO

ANEJO B.- MODELOS TEORICOS DE INTERPRETACION DE LAS
REDES DE FILTRACION Y DE LA INFLUENCIA DE LAS
HETEROGENEIDADES INDUCIDAS EN EL MEDIO.

(INDICE DE CONTENIDOS)

B.1.- INTRODUCCION.

B.2.- MODELOS DE REPRESENTACION DEL FLUJO EN EL CIMIENTO DE UNA
PRESA DE FABRICA.

B.2.1.- Modelos de representación del flujo en el cimiento de una
presa de fábrica. Régimen permanente y filtración Darcy.

B.2.1.1.- Modelo hidráulico para cimiento homogéneo e
isótropo. (Flujo bidimensional en régimen
permanente).

B.2.1.2.- Modelo hidráulico para cimiento homogéneo e
isótropo con pantalla de impermeabilización en
semiespacio de profundidad indefinida. (Flujo
unidimensional).

B.2.2.- Modelos de representación del flujo en el cimiento de una
presa de fábrica, régimen no estacionario.

B.3.- FORMAS DE FILTRACION DEL AGUA EN DISCONTINUIDADES. MODELOS
SIMPLES DE FILTRACION UNIDIMENSIONAL.

B.3.1.- Consideraciones generales.

B.3.2.- Modelos simples de filtración unidimensional en disconti-
nuidades para filtraciones Darcy en un dominio plano.

B.3.3.- Factores que intervienen en la permeabilidad equivalente.

B.4.- MODELO DE RELACION PERMEABILIDAD EQUIVALENTE-DEFORMACION.

B.4.1.- Consideraciones generales.

B.4.2.- Hipótesis básicas para la formulación de un modelo matemático de relación $K_e \rightarrow \xi$.

B.5.- ASIMILACION DEL REGIMEN DE FILTRACION AL FLUJO EN UN PERMEAMETRO PLANO CON PERMEABILIDADES DARCY VARIABLES EN LA SECCION DEL FLUJO.

B.5.1.- Permeámetro de sección constante paralelo al plano de referencia (formulación).

B.5.2.- Permeámetro de sección constante paralelo al plano de referencia, con condición de drenaje en un punto intermedio (formulación).

B.6.- MODELOS DE DISTRIBUCION DE PERMEABILIDADES ENTRE DOS PUNTOS, A Y B.

B.6.1.- Consideraciones generales.

B.6.2.- Distribución de permeabilidades lineales por tramos.

B.6.2.1.- Distribución de permeabilidad lineal entre dos puntos, A y B.

B.6.2.2.- Distribución de permeabilidades lineales no continuas. Permeabilidades constantes K_A y K_B aguas arriba y aguas abajo de la zona de filtración y permeabilidad lineal en la zona intermedia (formulación).

B.6.3.- Distribución de permeabilidades no lineales.

B.6.3.1.- Permeabilidades constantes K_A y K_B aguas arriba y aguas abajo de la zona de filtración y permeabilidad no lineal en la zona intermedia.

B.7.- MODELOS MATEMATICOS DE RELACION EN UN PUNTO.

Tensión efectiva-permeabilidad equivalente.

Tensión efectiva-deformabilidad.

B.7.1.- Consideraciones generales.

B.7.2.- Modelo matemático de relación tensión efectiva/permeabilidad equivalente en un punto.

B.7.3.- Modelo matemático de relación tensión efectiva-deformabilidad en un punto.

B.8.- ESTIMACION DE ORDENES DE MAGNITUD DE ALGUNOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RED DE FILTRACION.

B.8.1.- Consideraciones generales.

B.8.2.- Modelos simples de filtración en el cimientto de una presa para estimación del orden de magnitud de la permeabilidad media equivalente en una zona ó en el conjunto del contacto.

B.8.2.1.- Orden de magnitud de la permeabilidad en el contacto.

B.8.2.2.- Orden de magnitud de la permeabilidad en una zona.

B.8.3.- Modelo de filtración en el cimientto de una presa para valorar la influencia del incremento de permeabilidad con la profundidad.

B.1.- INTRODUCCION

El estudio de la filtración del agua en el cimientto de una presa de fábrica se realiza a través del análisis de dos magnitudes físicas medibles:

- a) Las presiones del agua en distintos puntos de la zona de filtración, conocidas por los piezómetros.
- b) Los caudales de filtración en drenes del cimientto.

La evolución de éstas magnitudes para distintos estados de deformación del terreno, permite interpretar la respuesta del cimientto a la filtración ante las acciones externas que le son transmitidas por la presa de fábrica y ante las acciones internas del agua de infiltración.

La aproximación a un modelo determinista de auscultación hidráulica que relacione las modificaciones de la red de filtración con la deformabilidad del cimientto exige el planteamiento de modelos simples basados en hipótesis sencillas, que hagan intervenir distintos factores de influencia en la filtración y que permitan acotar los límites de aplicación de un modelo generalizable.

A través del estudio sistemático de los datos reales de auscultación hidráulica contenidos en el Anejo A se ha presentado el aspecto general del problema en base a los datos disponibles. Los factores de mayor influencia en la filtración a través del cimientto de

las presas estudiadas, son las heterogeneidades de permeabilidad y la forma en la que se modifican bajo tensión.

El conjunto del cimientó de una presa de fábrica presenta heterogeneidades con distinto orden de influencia en la filtración, que pueden encajar en dos tipos fundamentales: *determinista de auscultación que unifique los comportamientos hidráulicos más generales observados*

a) Heterogeneidades naturales.

b) Heterogeneidades artificiales ó inducidas.

Las heterogeneidades naturales ó artificiales producidas por discontinuidades francas, como fallas, cambios de las características zonales de la roca de cimientó, galerías de penetración en roca, zonas de intenso drenaje..., diferencian zonas del cimientó en su conjunto, dando lugar a anisotropías, vías individualizadas de filtración, cambios de condiciones drenantes u otros efectos que pueden analizarse por comparación de zonas ó estudio de cada caso en particular.

Las heterogeneidades propias de la roca aparentemente homogénea y las inducidas por la inyección y el drenaje pueden modelizarse en zonas en las que se conoce la dirección preferente del flujo, las condiciones de contorno de la subpresión, su distribución, y los caudales de filtración para los distintos gradientes medios.

La modificación de estas heterogeneidades de permeabilidad, bajo tensión, habrá de representarse por modelos de relación deformabilidad -tensión efectiva- permeabilidad, que sean coherentes

con los efectos de cambio en las líneas de filtración observados por la auscultación hidráulica.

A través de la expresión de distintos modelos simples, el presente anejo se propone cualificar los distintos factores de influencia en la filtración y aproximarse a un modelo determinista de auscultación que unifique los "Comportamientos hidráulicos más generales observados en los cimientos de las presas estudiadas en el Anejo A".

Los estudios teóricos de la filtración del agua en régimen permanente, a través del cimiento de una presa de fábrica, son abordados por distintos métodos en base a la resolución de la ecuación de LAPLACE.

La ecuación de LAPLACE, resume el comportamiento de un fluido incompresible que se mueve a través de un medio filtrante, cumpliendo las condiciones de continuidad y régimen de filtración de DARCY.

ECUACION DE CONTINUIDAD

$$\text{div } \vec{V} = 0 \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

$$\text{LEY DE DARCY } (\vec{V} = -K \cdot \text{grad } \phi) \rightarrow u = -K_x \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}$$

$$v = -K_y \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

$$w = -K_z \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

B.2.- MODELOS DE REPRESENTACION DEL FLUJO EN EL CIMIENTO DE UNA PRESA DE FABRICA

B.2.1.- Modelos de representación del flujo en el cimiento de una presa de fábrica. Régimen permanente y filtración Darcy

Los estudios teóricos de la filtración del agua en régimen permanente, a través del cimiento de una presa de fábrica, son abordados por distintos métodos en base a la resolución de la ecuación de LAPLACE.

La ecuación de LAPLACE, resume el comportamiento de un fluido incompresible que se mueve a través de un medio filtrante, cumpliendo las condiciones de continuidad y régimen de filtración de DARCY.

ECUACION DE CONTINUIDAD

$$\text{div } \vec{V} = 0 \rightarrow \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

LEY DE DARCY ($\vec{V} = -K \cdot \text{grad } \phi$) $\rightarrow u = -K_x \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x}$

$$v = -K_y \cdot \frac{\partial \phi}{\partial y}$$

$$w = -K_z \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z}$$

ECUACION DE LAPLACE

Terreno isótropo

$$K_x = K_y = K_z; \Delta\phi = 0; \partial^2\phi/\partial x^2 + \partial^2\phi/\partial y^2 + \partial^2\phi/\partial z^2 = 0$$

Terreno anisótropo (filtración isótropa correspondiente al medio

anisótropo)

$$K_x = K_y = K_z; \Delta\phi = 0; \partial^2\phi/\partial x_1^2 + \partial^2\phi/\partial y_1^2 + \partial^2\phi/\partial z_1^2 = 0$$

En las expresiones que anteceden las notaciones empleadas, son:

$\bar{V}$; velocidad de filtración.

ϕ ; potencial hidráulico.

u, v, w ; componentes de la velocidad de filtración, según los ejes

x, y, z .

K_x, K_y, K_z ; componentes de la permeabilidad en las direcciones

x, y, z .

x_1, y_1, z_1 ; variables utilizadas para la transformación de la

filtración anisótropa en la isótropa correspondiente de permeabilidad K .

$$x_1 = (K/K_x)^{1/2} \cdot x; y_1 = (K/K_y)^{1/2} \cdot y; z_1 = (K/K_z)^{1/2} \cdot z$$

Cualquiera que sean las condiciones de contorno de la filtración, el problema se resuelve mediante una solución de la ecuación de LAPLACE, que cumpla las condiciones definidas para los valores de φ y de sus derivadas en los contornos ó puntos de singularidad del modelo que representa el medio de filtración.

Los métodos utilizados para la obtención de soluciones a la ecuación de LAPLACE, son diversos (análisis matemáticos - análisis numéricos y gráficos - analogías eléctrica, hidráulica...) y tienen como dificultad principal la representación de las condiciones de contorno de la filtración, que se establecen por medio de superficies impermeables ó superficies filtrantes:

Superficie impermeable en un medio isótropo (n : normal a la superficie impermeable)

$$\overline{V} \cdot \overline{n} = V_n = -K \cdot \partial\varphi/\partial n = 0; \quad \partial\varphi/\partial n = 0 \text{ CONDICION DE NEUMANN}$$

Superficie filtrante en un medio isótropo

$$\varphi = \text{cte. CONDICION DE DIRICHLET}$$

Cuando se trata de macizos fisurados, la filtración del agua suele modelizarse en base a considerar una roca compacta e impermeable, en la que las fisuras, rellenas ó nó de materiales de descomposición de la roca original, constituyen las vías de circulación del agua subterránea.

Si existe, una gran densidad de fisuración y las fisuras son pequeñas y multidireccionales, el macizo puede asimilarse a un medio continuo homogéneo e isótropo caracterizado por una permeabilidad equivalente direccional (CONGRESO DE STUTGART. E. CASTILLO. AÑO 72).

$$\overline{V} = -K \overline{\text{grad } \varphi} ; \quad \varphi = (\text{carga hidráulica})$$

En cualquiera de los casos citados, en los que el terreno puede asimilarse a un medio continuo homogéneo e isótropo ó con anisotropía conocida y el flujo puede considerarse bidimensional, la obtención de una solución de la ecuación de Laplace en un plano, por métodos de análisis matemáticos, se basa en las características del movimiento plano irrotacional de un fluido perfecto e incompresible que queda definido por las dos funciones φ y ψ denominadas función potencial y función de corriente, que verifican las relaciones:

$$u = -\partial\varphi/\partial x = -\partial\psi/\partial y ; \quad v = -\partial\varphi/\partial y = \partial\psi/\partial x$$

Estas relaciones muestran que las funciones φ y ψ cumplen las condiciones de CAUCHY-RIEMANN, que caracterizan a las componentes de una función analítica de variable compleja, que se denomina: potencial complejo

$$w = \varphi + i\psi ; \quad w = w(z)$$

Dado un problema físico determinado del que se conocen las condiciones de contorno y las expresiones de u y v ó cualquiera de las funciones φ y ψ de la red de corriente, puede determinarse el potencial complejo, que define el movimiento $w = w(z)$.

B.2.1.1 Por asimilación, el movimiento del agua en un medio permeable, se define de esta manera, siendo en este caso el potencial de velocidades:

El modelo que se presenta corresponde a las condiciones de contorno $\overline{V} = -K \cdot \overline{\text{grad } \varphi}$; $\varphi = (\text{carga hidráulica})$

Con estos criterios analíticos existen numerosos modelos desarrollados de los que se presentan algunos tipos de filtración bidimensional, para su comparación posterior con los datos reales de filtración obtenidos por medio de la auscultación hidráulica en diversos cimientos de presas de fábrica.

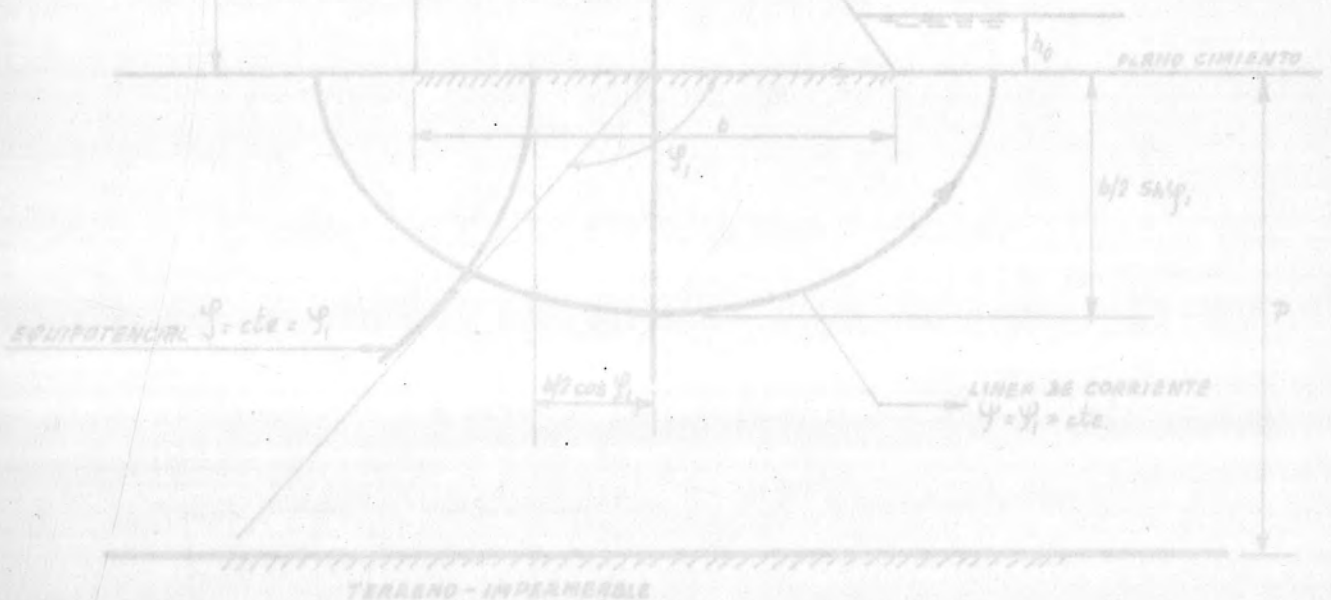


FIGURA 1

B.2.1.1.- Modelo hidráulico para cimiento homogéneo e isótropo (flujo bidimensional en régimen permanente)

El modelo que se presenta corresponde a las condiciones de contorno y geometría definida en la figura 1.

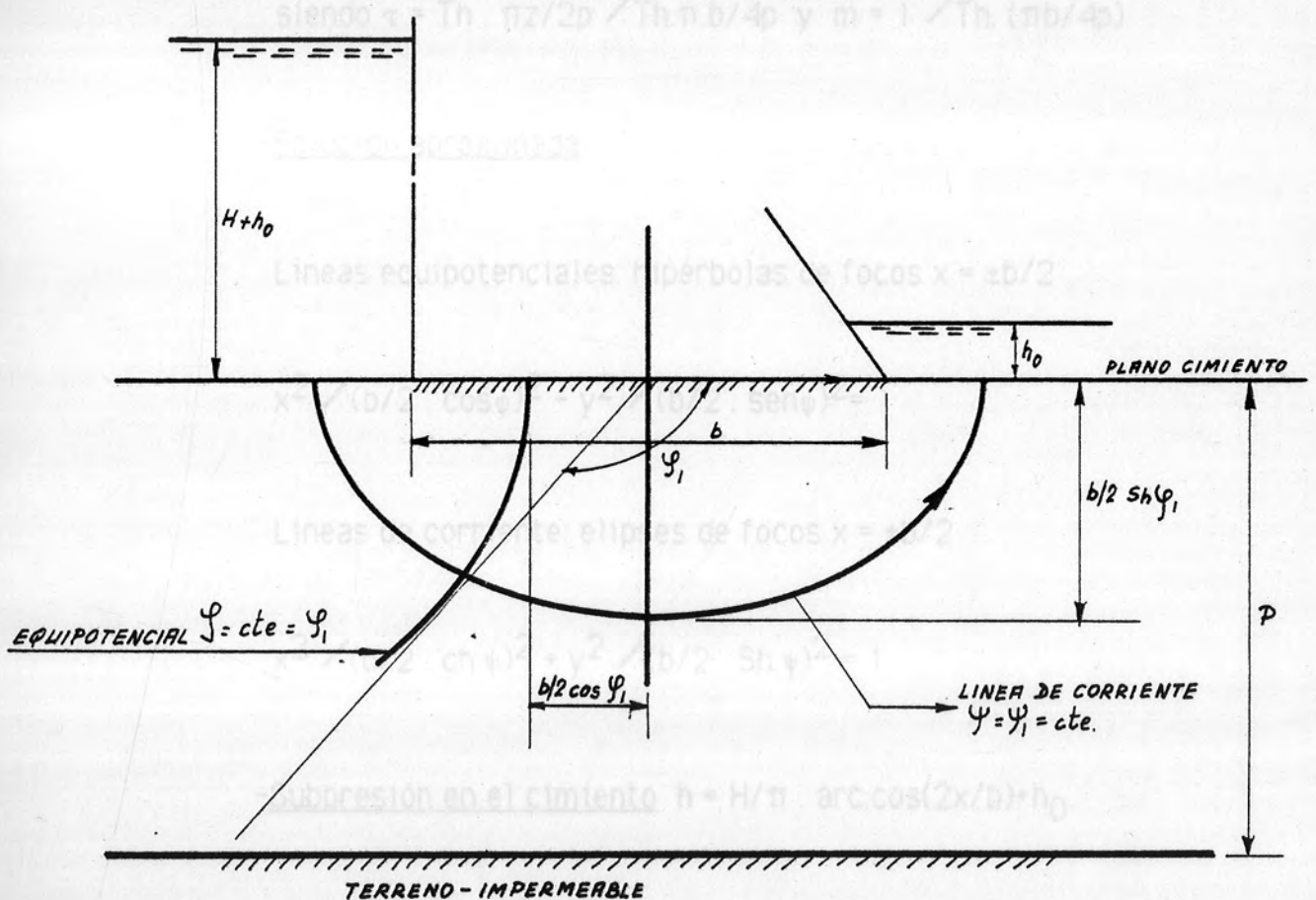


FIGURA 1

-La solución exacta se obtiene mediante dos transformaciones de Schwarz, sucesivas:

$$\text{Potencial complejo: } w = \varphi + i\psi = C_1 \int d\tau / [(\tau^2 - 1)(\tau^2 - m^2)]^{1/2} + C_2,$$

$$\text{siendo } \tau = Th \cdot \pi z / 2p \quad y \quad m = 1 / Th \cdot (\pi b / 4p)$$

-Solución aproximada

Líneas equipotenciales: hipérbolas de focos $x = \pm b/2$

$$x^2 / (b/2 \cdot \cos\varphi)^2 - y^2 / (b/2 \cdot \sin\varphi)^2 = 1$$

Líneas de corriente: elipses de focos $x = \pm b/2$

$$x^2 / (b/2 \cdot \text{ch}\psi)^2 + y^2 / (b/2 \cdot \text{sh}\psi)^2 = 1$$

-Subpresión en el cimiento $h = H/\pi \cdot \arccos(2x/b) + h_0$.

"Los valores de la subpresión expresada se aproximan mejor a la solución exacta para valores de p/b grandes. Si $p/b \gg 1$ los valores obtenidos son muy próximos a la solución exacta.



0.2.1.2.-Caudal de filtración

$$q = K \cdot H \cdot L_n \{ 2p/b + [1 + (2p/b)^2]^{1/2} \} \cdot 1/\pi$$

"Esta ecuación da la expresión exacta del flujo en el caso de suponer limitada la filtración por una superficie impermeable elíptica a la profundidad p , bajo el eje del cimiento".

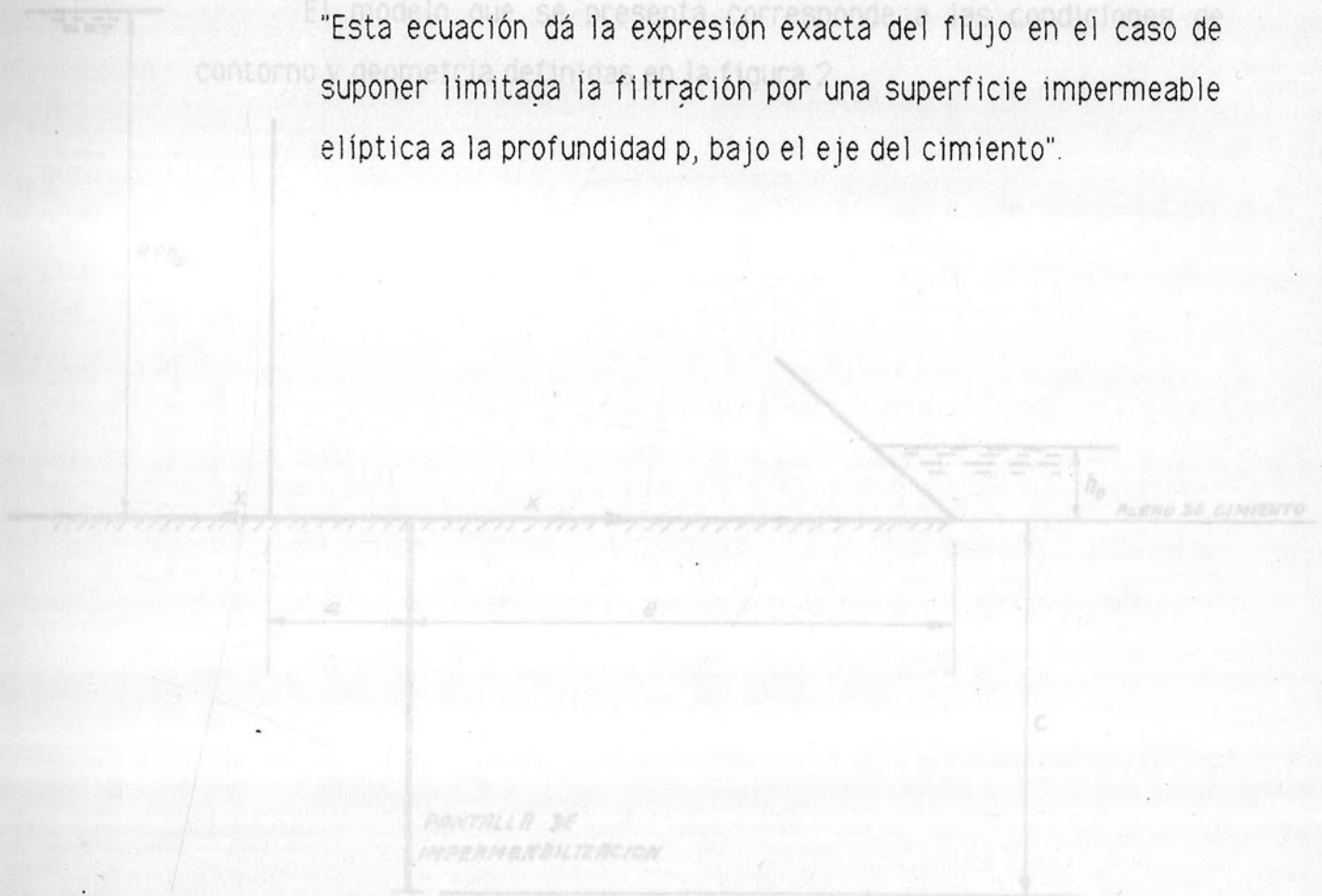


FIGURA 2

Solución aproximada de la función potencial

$$w = \varphi + i\psi = \text{arc.cosec} [2(1 + (z/c)^2)^{1/2} - m] / n$$

$$m = (1 + (a/c)^2)^{1/2} - (1 + (e/c)^2)^{1/2}$$

$$n = (1 + (a/c)^2)^{1/2} + (1 + (e/c)^2)^{1/2}$$

B.2.1.2.- Modelo hidráulico para cimiento homogéneo e isótropo con pantalla de impermeabilización en semiespacio de profundidad indefinida (flujo bidimensional)

El modelo que se presenta corresponde a las condiciones de contorno y geometría definidas en la figura 2.

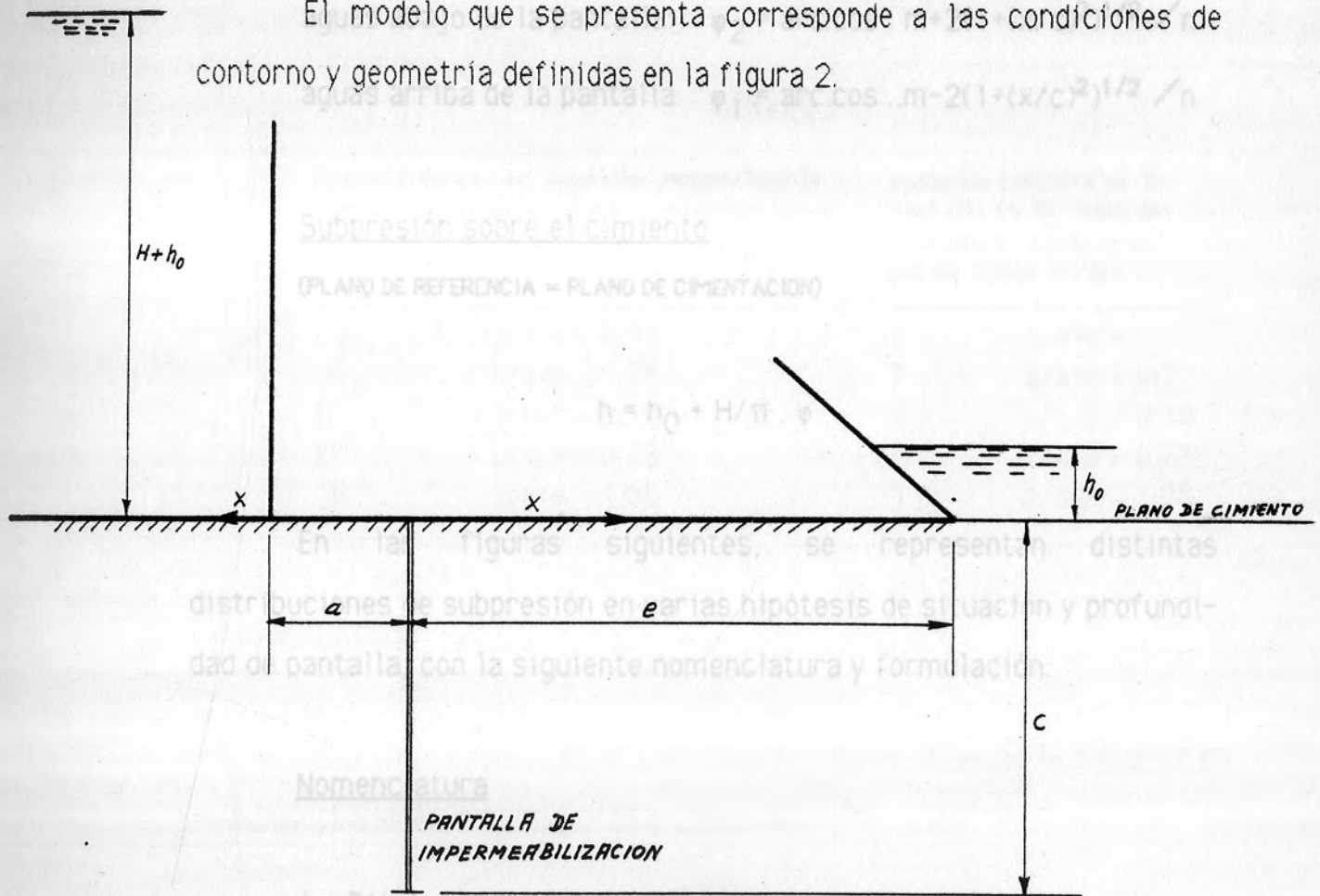


FIGURA 2

Solución aproximada de la función potencial

P - Posición y línea teórica de pantalla

$$w = \varphi + i\psi = \text{arc.cos}[2(1+(z/c)^2)^{1/2} + m / n]$$

a - Posición de la pantalla respecto al pie de aguas arriba

$$m = (1+(a/c)^2)^{1/2} - (1+(e/c)^2)^{1/2}$$

c - Profundidad de la pantalla

$$n = (1+(a/c)^2)^{1/2} + (1+(e/c)^2)^{1/2}$$

Sobre el eje real

$$\varphi = \arccos . m \pm 2[1+(x/c)^2]^{1/2} / n$$

aguas abajo de la pantalla: $\varphi_2 = \arccos . m + 2(1+(x/c)^2)^{1/2} / n$

aguas arriba de la pantalla: $\varphi_1 = \arccos . m - 2(1+(x/c)^2)^{1/2} / n$

Subpresión sobre el cimiento

(PLANO DE REFERENCIA = PLANO DE CIMENTACION)

I:	c/a+e = 0,00	1:	a/a+e = 0
II:	c/a+e = 0,25	2:	a/a+e = 0,25
III:	c/c+e = h = h ₀ + H/π . φ	3:	a/a+e = 0,50
IV:	c/a+e = 0,75	4:	a/a+e = 0,75
V:	c/a+e = 1,00	5:	a/a+e = 1,00

En las figuras siguientes, se representan distintas distribuciones de subpresión en varias hipótesis de situación y profundidad de pantalla, con la siguiente nomenclatura y formulación:

Nomenclatura

A.- Pié de aguas arriba del contacto presa-cimiento.

B.- Pié de aguas abajo del contacto presa-cimiento.

P.- Posición y línea teórica de pantalla.

a: Posición de la pantalla respecto al pié de aguas arriba.

a+e: Longitud del contacto presa-cimiento.

c: Profundidad de la pantalla.

siendo h_1 : presión aguas arriba de la pantalla de impermeabilización en el contacto presa-cimiento.

h_2 : presión aguas abajo de la pantalla de impermeabilización en el contacto presa-cimiento.

CUADRO I

Profundidades de pantalla respecto a la longitud total del contacto presa-cimiento		posición relativa de la pantalla en la zona de filtración respecto al pie de aguas arriba	
I ;	$c/a+e = 0,00$	1 ;	$a/a+e = 0$
II ;	$c/a+e = 0,25$	2 ;	$a/a+e = 0,25$
III ;	$c/c+e = 0,50$	3 ;	$a/a+e = 0,50$
IV ;	$c/a+e = 0,75$	4 ;	$a/a+e = 0,75$
V ;	$c/a+e = 1,00$	5 ;	$a/a+e = 1,00$

FORMULACION

-Diferencia de presiones en el cimiento en ambos lados de la pantalla en la superficie de contacto presa-cimiento

$$h_1 - h_2 / H = 1 / \pi (\varphi_1 - \varphi_2) = 1 / \pi [\text{arc.cos} . [(m-2)/n] - \text{arc.cos} . [(m+2)/n]$$

-Diferencia de presiones en ambos lados de la pantalla. Variación con la profundidad

$$h_1 - h_2 / H = 1 / \pi (\varphi_1 - \varphi_2) =$$

$$= 1 / \pi [\text{arc.cos} . [m-2(1-(y/c)^2)^{1/2}] / n - \text{arc.cos} . [m+2(1-(y/c)^2)^{1/2}] / n]$$

siendo:

$$m = [1+(a/c)^2]^{1/2} \cdot [1+(e/c)^2]^{1/2}$$

$$n = [1+(a/c)^2]^{1/2} + [1+(e/c)^2]^{1/2}$$

-Distribución de subpresiones en el cimientto en varias hipótesis de situación y profundidad de la pantalla.

1ª Hipótesis.- Situación de la pantalla en el centro del cimientto $a/e=0,5$.

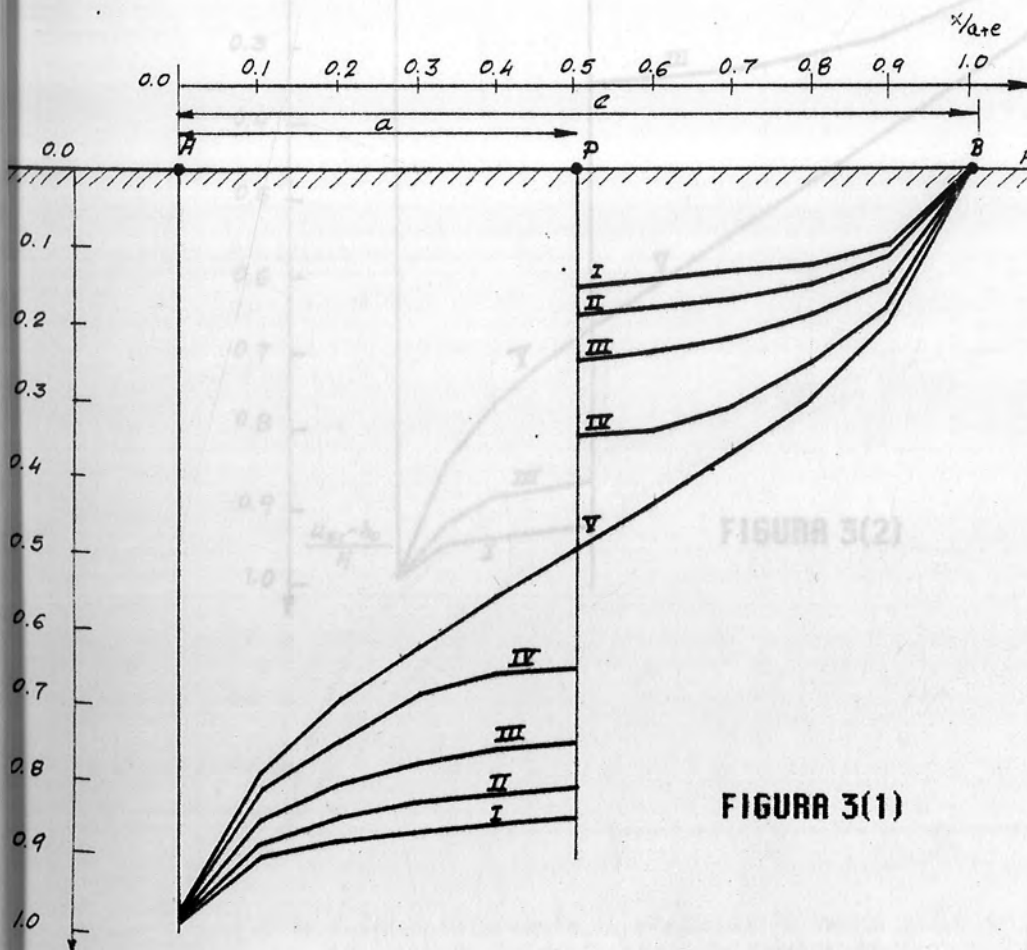
Profundidad de la pantalla $c/a+e = 1,0 \rightarrow I$

$c/a+e = 0,75 \rightarrow II$

$c/a+e = 0,50 \rightarrow III$

$c/a+e = 0,25 \rightarrow IV$

$c/a+e = 0 \rightarrow V$



A.- Punto de aguas arriba.

B.- Punto de aguas abajo.

P.- Línea teórica de pantalla.

FIGURA 3(1)

2ª Hipótesis.- Situación de la pantalla $a/a+e = 0,5$

Profundidad de la pantalla $c/a+e = 1,0 \rightarrow I$

$c/a+e = 0,75 \rightarrow II$

$c/a+e = 0,50 \rightarrow III$

$c/a+e = 0,25 \rightarrow IV$

$c/a+e = 0 \rightarrow V$

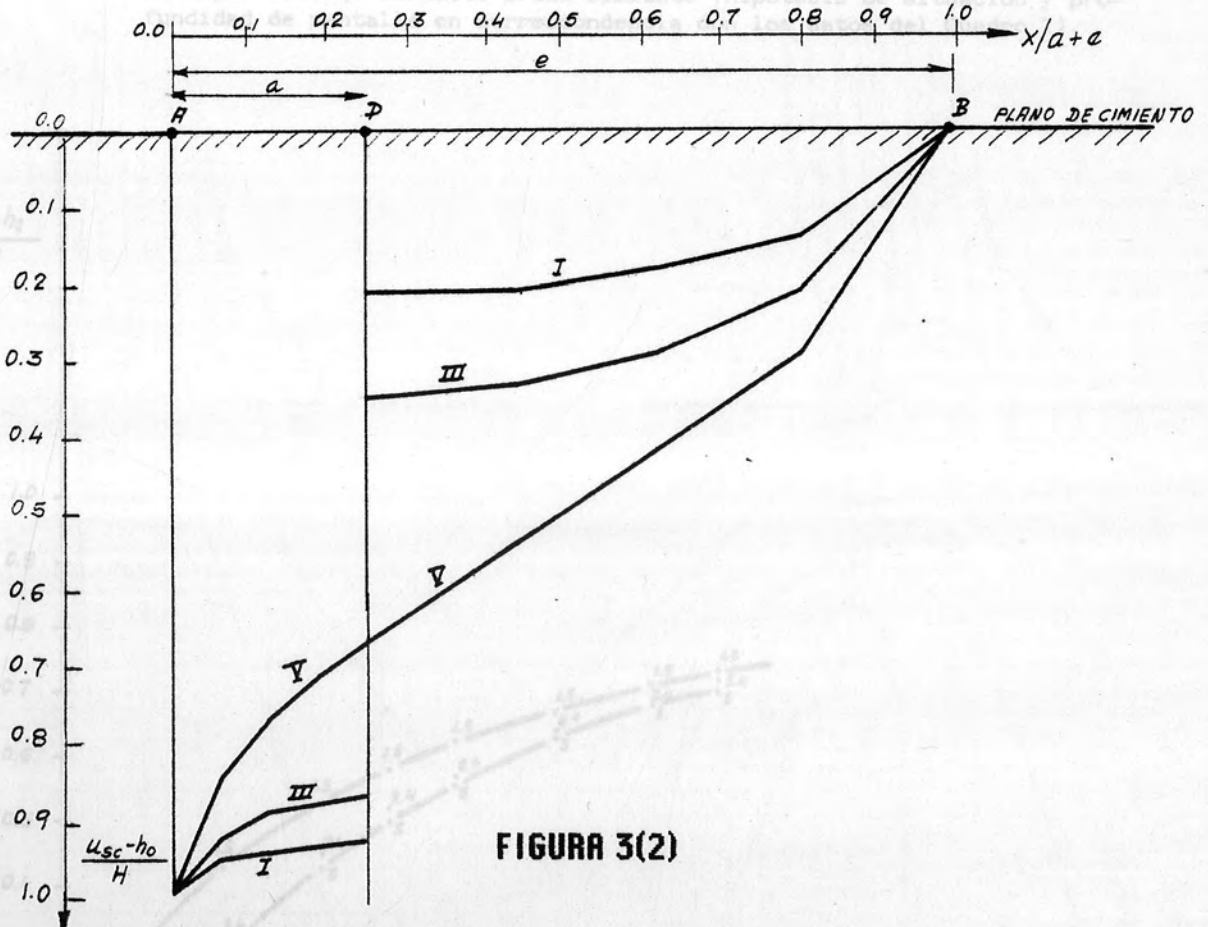


FIGURA A. (2).- Diferencia de presiones en ambos lados de la pantalla. Variación con la profundidad (situación de pantalla $a/a+e=0$ y profundidad según el Cuadro 1).

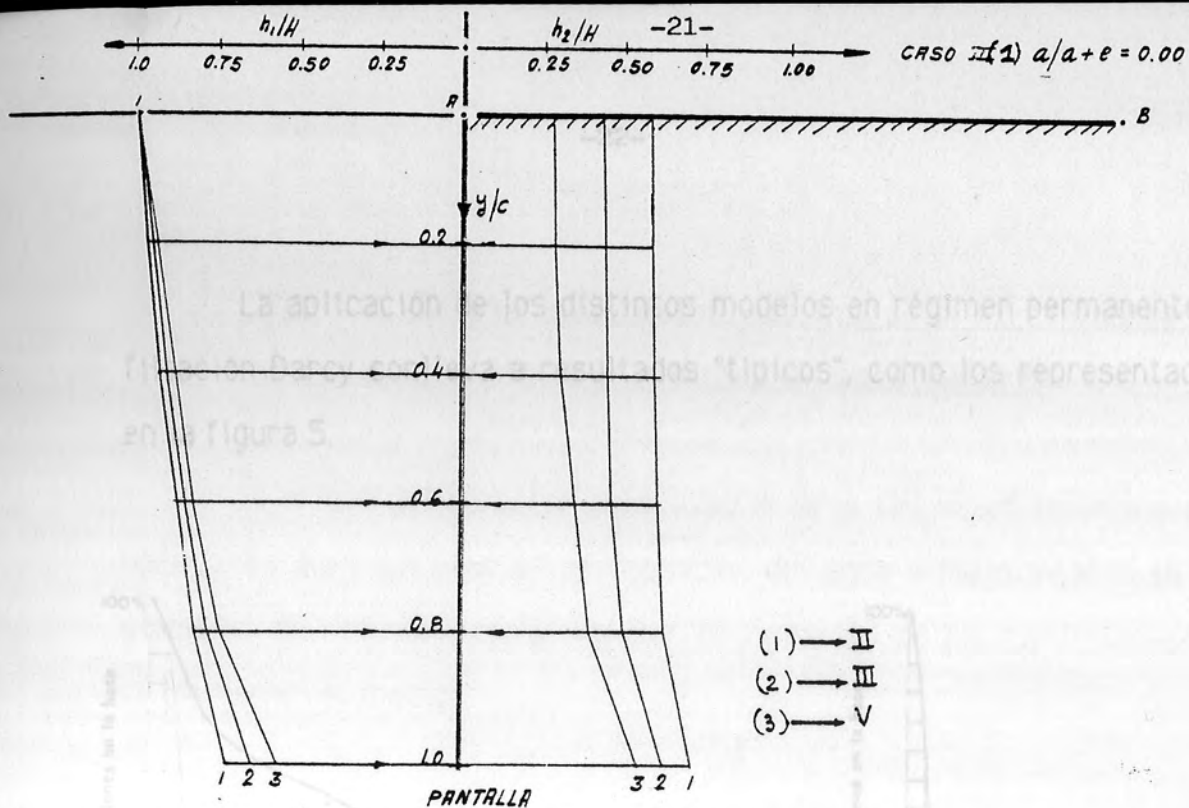


FIGURA 4.(1).- Diferencia de presiones en el cimiento en ambos lados de la pantalla en la superficie de contacto presa-cimiento (Hipótesis de situación y profundidad de pantalla en correspondencia con los datos del Cuadro I).

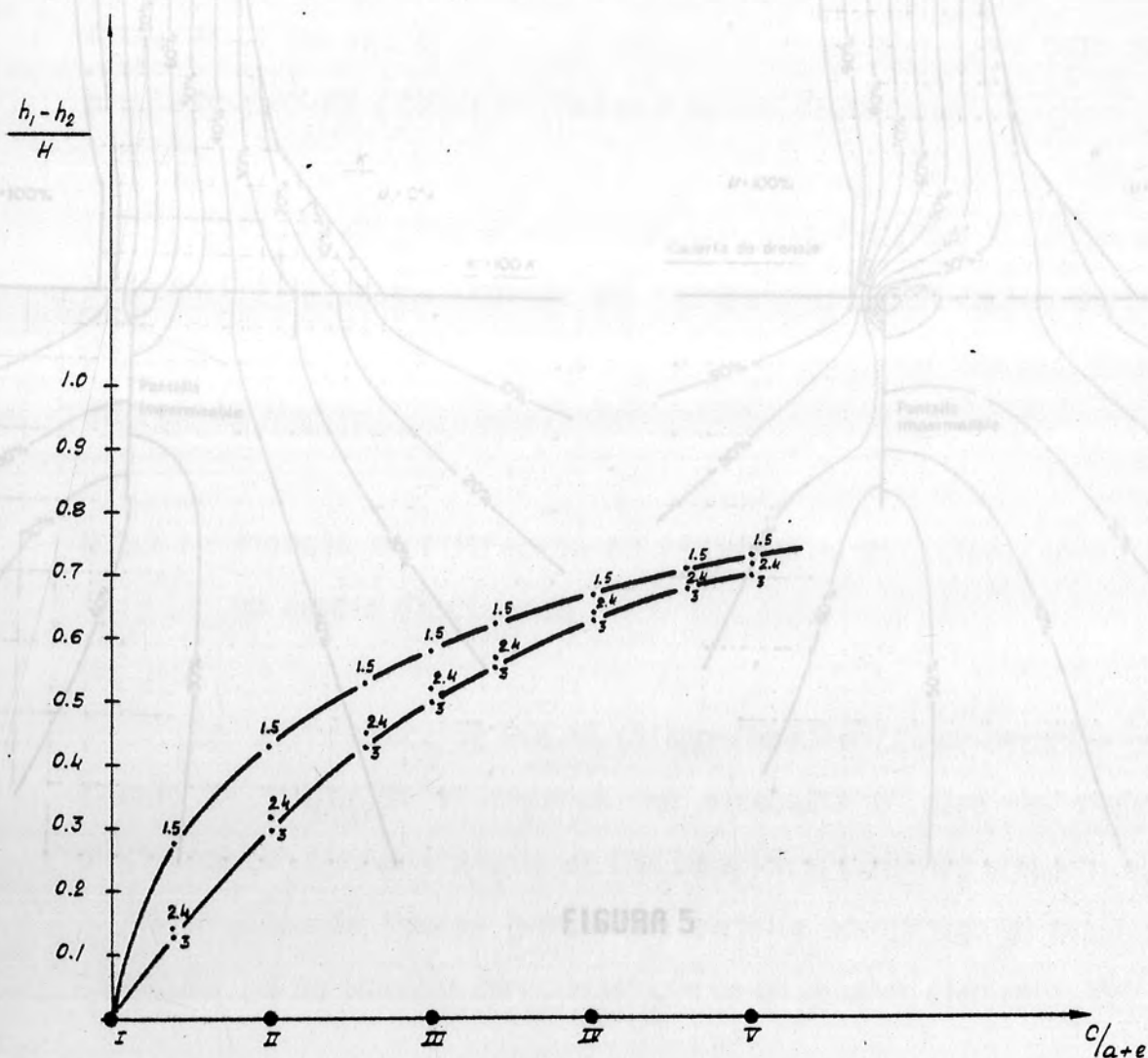


FIGURA 4.(2).- Diferencia de presiones en ambos lados de la pantalla. Variación con la profundidad (situación de pantalla $a/a+e=0$ y profundidad según el Cuadro I).

B.2.2. La aplicación de los distintos modelos en régimen permanente y filtración Darcy conlleva a resultados "típicos", como los representados en la figura 5.

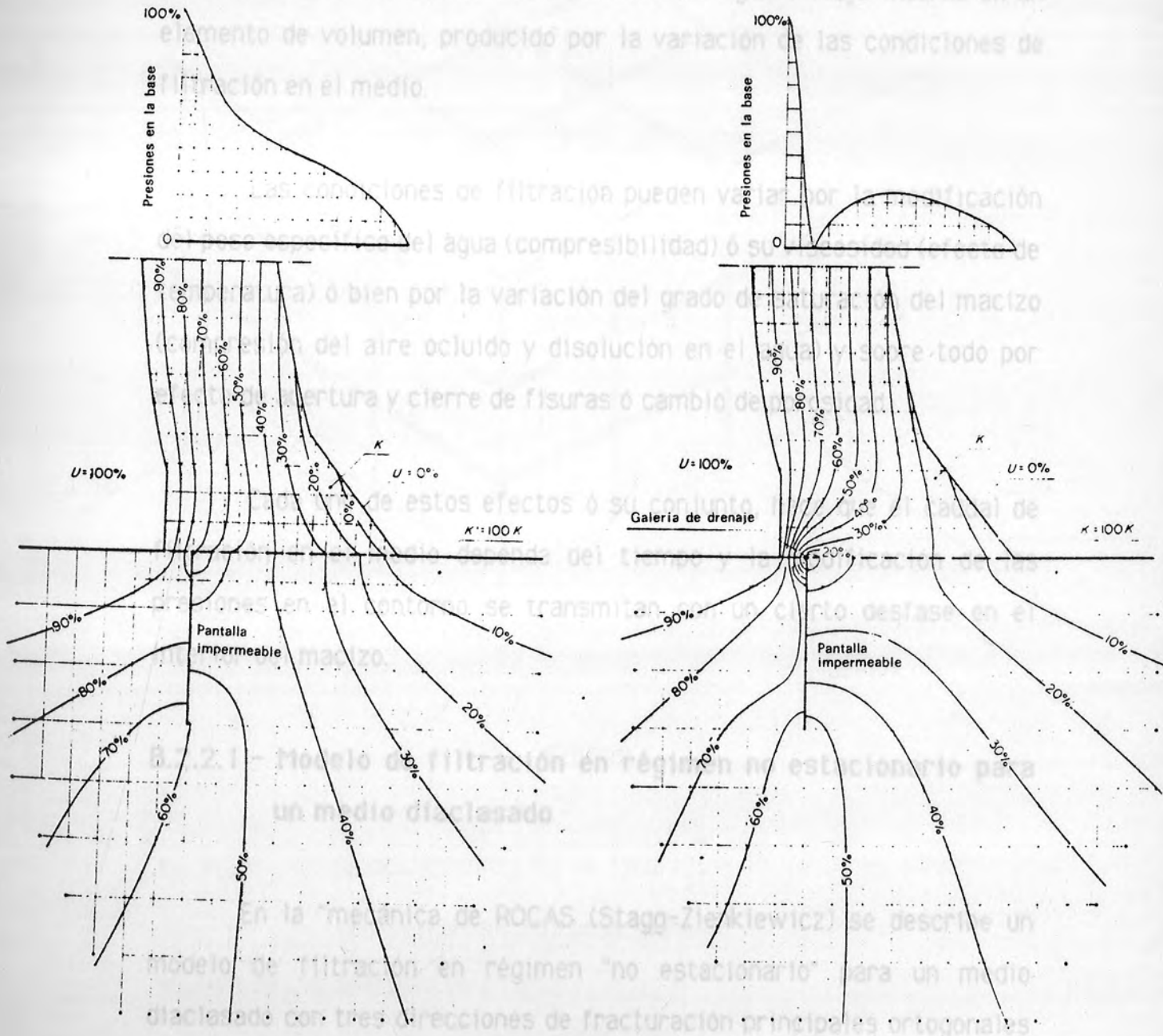


FIGURA 5

B.2.2.- Modelos de representación del flujo en el cimientado de una presa de fábrica, régimen no estacionario

El origen del carácter estacionario de la filtración en un macizo rocoso, está en los efectos de retención del agua ó flujo interno en un elemento de volumen, producido por la variación de las condiciones de filtración en el medio.

Las condiciones de filtración pueden variar por la modificación del peso específico del agua (compresibilidad) ó su viscosidad (efecto de temperatura) ó bien por la variación del grado de saturación del macizo (compresión del aire ocluido y disolución en el agua) y sobre todo por efecto de apertura y cierre de fisuras ó cambio de porosidad.

Cada uno de estos efectos ó su conjunto, hace que el caudal de filtración en el medio dependa del tiempo y la modificación de las presiones en el contorno se transmitan con un cierto desfase en el interior del macizo.

B.2.2.1.- Modelo de filtración en régimen no estacionario para un medio diaclasado

En la "mecánica de ROCAS (Stagg-Zienkiewicz) se describe un modelo de filtración en régimen "no estacionario" para un medio diaclasado con tres direcciones de fracturación principales ortogonales y una densidad de fisuras grande que permite identificar al macizo rocoso por los parámetros característicos de un volumen elemental dV .

Componentes principales de la permeabilidad, en función de la apertura media de diaclasas. Roca de matriz impermeable y fisuras lavadas

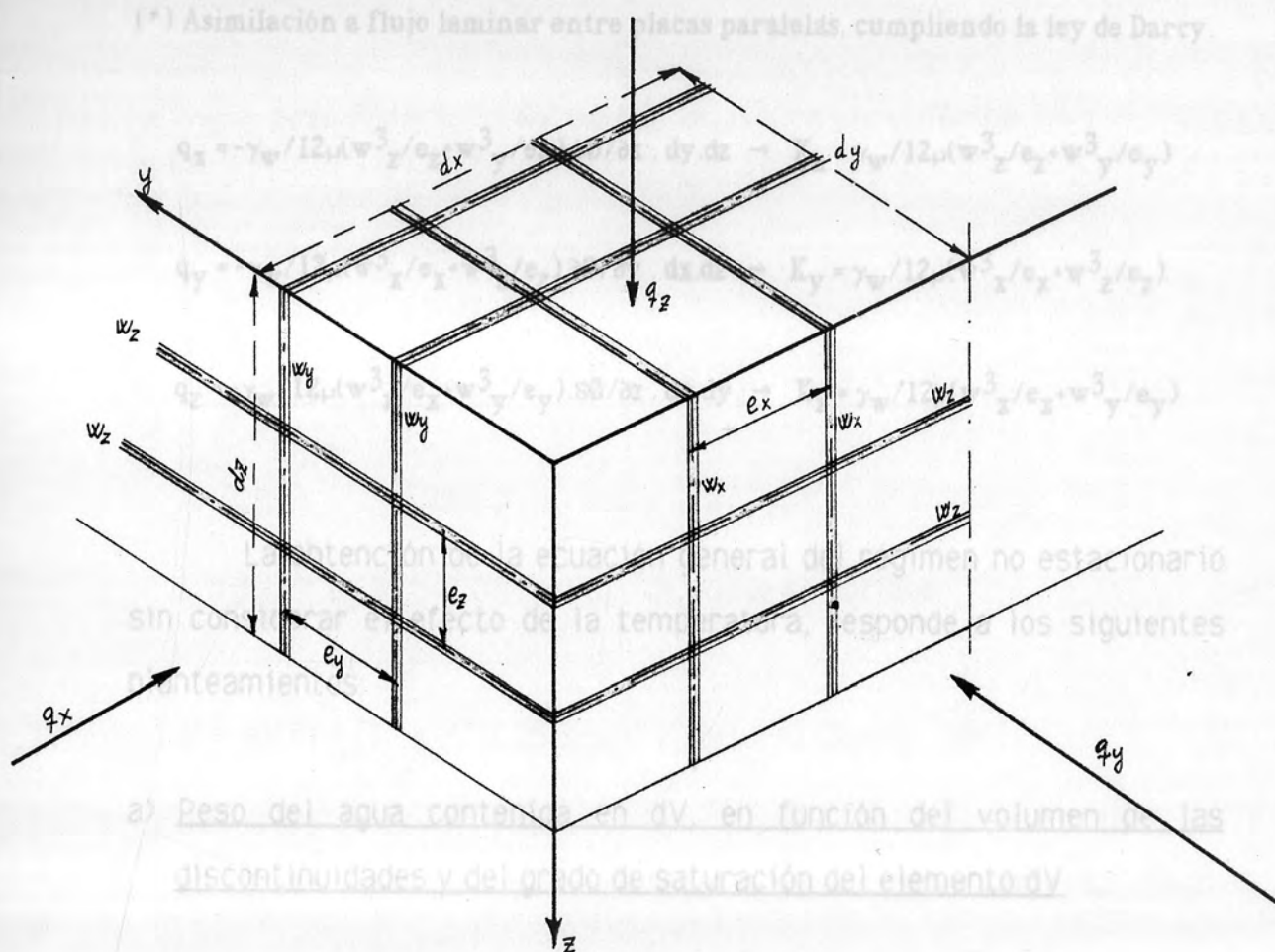


FIGURA 6

$e_x, e_y, e_z, \dots$ espaciamientos de la fisuración en las tres direcciones consideradas como principales.

$w_x, w_y, w_z, \dots$ apertura en fisuras.

γ_w peso específico del agua

Expresiones de los caudales de filtración según las direcciones principales de fracturación.

(*) Asimilación a flujo laminar entre placas paralelas, cumpliendo la ley de Darcy.

$$q_x = -\gamma_w / 12\mu (w_z^3/e_z + w_y^3/e_y) \cdot \partial\theta / \partial x \cdot dy \cdot dz \rightarrow K_x = \gamma_w / 12\mu (w_z^3/e_z + w_y^3/e_y)$$

$$q_y = -\gamma_w / 12\mu (w_x^3/e_x + w_z^3/e_z) \cdot \partial\theta / \partial y \cdot dx \cdot dz \rightarrow K_y = \gamma_w / 12\mu (w_x^3/e_x + w_z^3/e_z)$$

$$q_z = -\gamma_w / 12\mu (w_x^3/e_x + w_y^3/e_y) \cdot \partial\theta / \partial z \cdot dx \cdot dy \rightarrow K_z = \gamma_w / 12\mu (w_x^3/e_x + w_y^3/e_y)$$

La obtención de la ecuación general del régimen no estacionario sin considerar el efecto de la temperatura, responde a los siguientes planteamientos:

a) Peso del agua contenida en dV, en función del volumen de las discontinuidades y del grado de saturación del elemento dV

$$m = \gamma_w (1-a) \cdot n \cdot dV \rightarrow \partial m / \partial t = \partial / \partial t [\gamma_w (1-a) \cdot n] \cdot dV \quad [1]$$

m..... peso del agua contenida en dV.

n..... volumen unitario de discontinuidades (poros+fisuras) con respecto al volumen aparente dV.

a..... volumen unitario de discontinuidades vacías con respecto al volumen de discontinuidades totales.

γ_w ... peso específico del agua.

b) Efecto de compresibilidad del agua

$$\gamma_w = \gamma_0 \cdot \beta \cdot p + \gamma_0 \rightarrow \partial \gamma_w / \partial t = \gamma_0 \cdot \beta \cdot \partial p / \partial t$$

γ_0 peso específico del agua a la presión atmosférica.

β compresibilidad volumétrica.

p presión.

c) Efecto de compresión del aire (ley de Boyle) y su disolución en el agua (ley de Henry)

$$a(p-p_0) = a_0 \cdot p_0 - 0,02(1-a)p; \text{ de donde se obtiene:}$$

$$\partial(1-a)/\partial t = [p_0 \cdot a_0 + 0,02p(1-a_0) / (p+p_0-0,02p)^2] \cdot \partial p / \partial t$$

e) Igualdad entre la diferencia de cantidad de agua en peso, que en la unidad de temperatura y sale del volumen dV con el incremento del peso contenido en él
al de discontinuidades totales para las presiones p y p_0 .

d) Diferencia entre la cantidad del agua en peso, que en la unidad de tiempo entra y sale del volumen:

-Ecuación de la continuidad de la filtración a través del elemento dV .

$$\partial m / \partial t = -[\partial / \partial x(\gamma_w \cdot V_x) + \partial / \partial y(\gamma_w \cdot V_y) + \partial / \partial z(\gamma_w \cdot V_z)] dV$$

-Aplicación de la ley de Darcy a la filtración ($\gamma_w = \text{cte}$).

$$V_x = -K_x \cdot \partial\theta/\partial x = -K_x/\gamma_w \cdot \partial p/\partial x$$

$$V_y = -K_y \cdot \partial\theta/\partial y = -K_y/\gamma_w \cdot \partial p/\partial y$$

$$V_z = -K_z \cdot \partial\theta/\partial z = -(K_z/\gamma_w \cdot \partial p/\partial z + K_z)$$

$$1/dV \cdot \partial m/\partial t = \partial/\partial x(K_x \cdot \partial p/\partial x) + \partial/\partial y(K_y \cdot \partial p/\partial y) + \partial/\partial z(K_z \cdot \partial p/\partial z) + \gamma_w \cdot \partial K_z/\partial z = [2]$$

Si a la hipótesis de "no variación de la viscosidad del agua con la temperatura", se añaden las de "incompresibilidad del agua" y la "saturación total del medio" de filtración, la ecuación general del régimen de filtración es:

$V_x; V_y; V_z$... velocidades Darcy en las direcciones x, y, z.
 $K_x; K_y; K_z$... permeabilidades Darcy en las direcciones x, y, z.

e) Igualdad entre la diferencia de cantidad de agua en peso, que en la unidad de temperatura y sale del volumen dV, con el incremento del peso contenido en él

corresponde a la disminución/aumento del volumen de discontinuidades por cierre/apertura de diaclasas que depende de:

$$[2] = \partial/\partial t[\gamma_w(1-a) \cdot n] = [(1-a) \cdot n \cdot \partial\gamma_w/\partial t + \gamma_w \cdot n \cdot \partial(1-a)/\partial t + \gamma_w(1-a) \partial n/\partial t]$$

Todos los factores analizados pueden tener en su caso una importancia grande respecto a la transitoriedad del régimen de filtración.

Las variaciones rápidas en las condiciones exteriores o de las tensiones totales en la roca pueden originarse presiones en el interior de las fracturas.
 La estimación del orden de importancia de cada uno de ellos es un punto de discusión, en el que parece decisivo a la hora de establecer

criterios de comportamiento, la tipología de las discontinuidades propias de la roca y la modificación de sus dimensiones por efecto de las acciones externas transmitidas al cimiento y por las acciones internas del agua de infiltración.

B.3.1.- Consideraciones generales

En el contacto presa-cimiento, la influencia de las heterogeneidades transversales en el terreno, producidas por las pantallas de impermeabilización y drenaje pueden hacer más acusable la transitoriedad del régimen de filtración.

Si a la hipótesis de "no variación de la viscosidad del agua con la temperatura", se añaden las de "incompresibilidad del agua" y la "saturación total del medio" de filtración, la ecuación general del régimen transitorio quedaría expresada de la siguiente manera:

$$1/dV \cdot \partial m / \partial t = \partial / \partial x (K_x \cdot \partial p / \partial x) + \partial / \partial y (K_y \cdot \partial p / \partial y) + \partial / \partial z (K_z \cdot \partial p / \partial z) + \gamma_w \cdot \partial K_z / \partial z = \gamma_w \cdot \partial n / \partial t$$

El término $\partial n / \partial t$, corresponde a la disminución/aumento del volumen de discontinuidades por cierre/apertura de diaclasas que dependerá del estado tensional del elemento dV.

Esta expresión constituye una ecuación diferencial general para la circulación del agua a través de un macizo rocoso e indica que si se producen variaciones rápidas en las condiciones exteriores ó de las tensiones totales en la roca pueden originarse presiones en el interior de las diaclasas que a su vez producen una disminución a la resistencia total de la roca.

B.3.- FORMAS DE FILTRACION DEL AGUA EN DISCONTINUIDADES MODELOS SIMPLES DE FILTRACION UNIDIMENSIONAL

B.3.1.- Consideraciones generales

La filtración en un macizo rocoso, presenta grandes dificultades de modelización, porque la roca es un conjunto de heterogeneidades en el que coexisten discontinuidades francas, como pueden ser zonas carsticas ó fallas, junto a pequeñas discontinuidades, que forman parte de la propia estructura rocosa (porosidad, microfisuración...).

Cuando se trata de modelizar la filtración del agua en un macizo rocoso, se suele hacer mediante modelos simples, que den una idea de como se distribuye el agua, que finalmente es aforada como caudal de filtración, entre las distintas vías posibles de paso que presenta la roca.

Cualquier intento de aproximación de la filtración en un material rocoso al flujo en un medio homogéneo, que cumpla la ley de Darcy, exige caracterizar las discontinuidades de la roca por parámetros sencillos, como puede ser, la porosidad, la anchura media de fisuras, tipo de material de relleno de fisuras...

Al hablar de permeabilidad en un punto y en una dirección en un macizo rocoso hay que contemplar una escala de homogeneidad que permita asimilar al punto una zona de roca, relativamente pequeña en

relación al macizo rocoso estudiado, para que el efecto del conjunto de discontinuidades sea asociable a un factor de proporcionalidad entre el gradiente hidráulico en una dirección y la intensidad de flujo por unidad de superficie perpendicular a esta dirección.

Este factor de proporcionalidad ó "permeabilidad equivalente" que se define en un punto y en una dirección compara la zona de roca representada por el punto, con un terreno homogéneo en el que se cumple la ley de Darcy.

B.3.2.- Modelos simples de filtración unidimensional en discontinuidades para filtraciones de Darcy en un dominio plano

Para aproximarse a un modelo global que permita caracterizar el medio fisurado, por zonas con permeabilidades equivalentes diferenciadas, es necesario partir de modelos sencillos de filtración, que expresen el movimiento del agua por las fisuras.

Las formas más simples de filtración del agua por fisuras, son las que representan estas fisuras como discontinuidades planas y paralelas a la dirección preferente del flujo.

Las permeabilidades equivalentes que se pueden definir con estos modelos son:

$$k = -gw^3/12\nu \frac{dh}{dx} = K_g = g/12\nu \cdot w^3/n$$

a) Fisura plana, rellena de material permeable en un medio impermeable

-Asimilando el movimiento del agua en la fisura a un permeámetro plano.

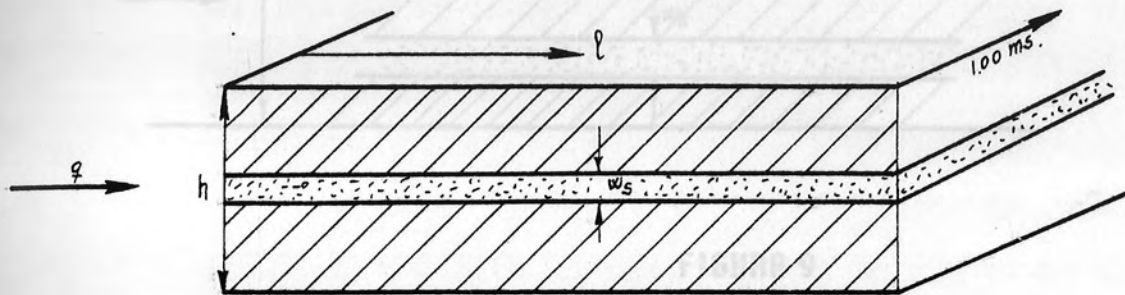


FIGURA 7

$$q = -k_s \cdot w_s \cdot \partial\phi/\partial L \rightarrow k_e = k_s \cdot w_s / h$$

En las expresiones anteriores:

b) Fisura plana vacía, en un medio impermeable

-Asimilando el movimiento del agua en la fisura a un flujo laminar entre dos caras paralelas.

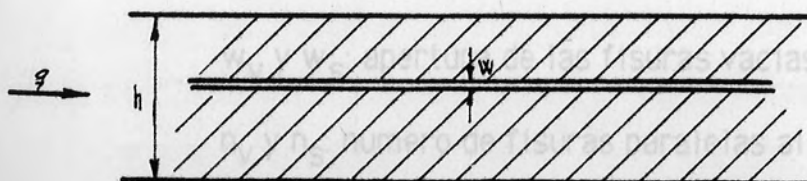


FIGURA 8

$$q = -g \cdot w^3 / 12v \cdot \partial\phi/\partial l \rightarrow k_e = g / 12v \cdot w^3 / h$$

v: viscosidad cinemática del agua.

c) Medio permeable con fisuras planas y paralelas

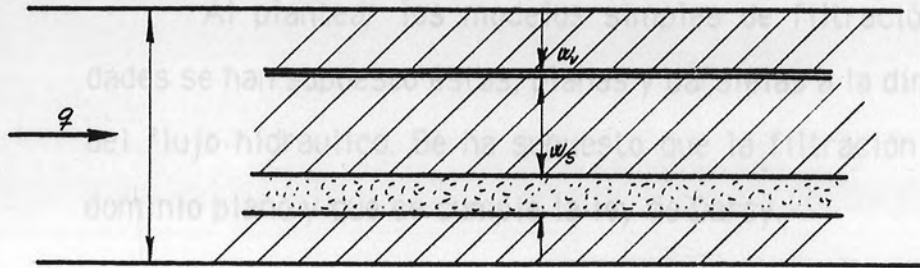


FIGURA 9

$$q = -(k_m(1-n_v w_v - n_s w_s) + k_s n_s w_s + g/12v \cdot n_v w_v^3) \cdot \partial\phi/\partial L \rightarrow$$

$$k_e = k_m(1-n_v w_v - n_s w_s) + k_s n_s w_s + g/12v \cdot n_v w_v^3$$

En las expresiones anteriores:

q: caudal por unidad de superficie perpendicular al flujo.

k_s : permeabilidad del material de relleno.

k_m : permeabilidad de la roca matriz.

k_e : permeabilidad equivalente, por unidad de superficie.

w_v y w_s : apertura de las fisuras vacías y rellenas.

n_v y n_s : número de fisuras paralelas al flujo, por unidad de an-

chura perpendicular, (n_v : vacías); (n_s : rellenas).

g: aceleración de la gravedad.

v: viscosidad cinemática del agua.

B.3.3.- Factores que intervienen en la permeabilidad equivalente

Al plantear los modelos simples de filtración en discontinuidades se han supuesto éstas, planas y paralelas a la dirección preferente del flujo hidráulico. Se ha supuesto que la filtración se produce en un dominio plano y que se cumple la ley de Darcy.

Con estas hipótesis, se define la permeabilidad equivalente en un punto y en una dirección como el factor de proporcionalidad entre el caudal de filtración neto por unidad de superficie perpendicular al flujo y el gradiente hidráulico en la dirección de flujo.

Dentro de la simplicidad de los modelos referidos, el que da más posibilidades de comparación entre las distintas formas de filtración en un macizo rocoso con discontinuidades, es el que se ha definido como: "Medio permeable con fisuras planas y paralelas".

En este modelo el agua pasa por la roca matriz a través de sus poros, y por las fisuras, rellenas de material permeable ó vacías.

Al estudiar la filtración en un medio de las características definidas por este modelo, en un punto representativo de una zona de roca se puede caracterizar el medio por una permeabilidad equivalente por unidad de superficie perpendicular al flujo, que incluye tres factores de permeabilidad:

- a) $K_m = k_m(1-n_v-n_s.w_s)$, permeabilidad matricial. Dá, el caudal de filtración en el medio a través de la roca matriz y depende de su porosidad.
- b) $K_s = k_s.n_s.w_s$, permeabilidad debida a las fisuras rellenas. Dá, el caudal de filtración en el medio a través de las fisuras rellenas de material permeable.
- c) $K_w = g/12v.n_v.w^3_v$, permeabilidad debida a las fisuras vacías. Dá, el caudal de filtración en el medio a través de las fisuras lavadas.

La expresión del caudal total por unidad de superficie perpendicular al gradiente hidráulico, será:

$$q = -(K_m + K_s + K_w).s.\partial\phi/\partial L$$

y la permeabilidad equivalente en el punto que representa a una zona de roca, será:

$$K_e = (K_m + K_s + K_w)$$

La figura 4.10, expresa el sentido de la definición de permeabilidad equivalente en un punto en la dirección del flujo, asociado a una zona de roca a la que representa.

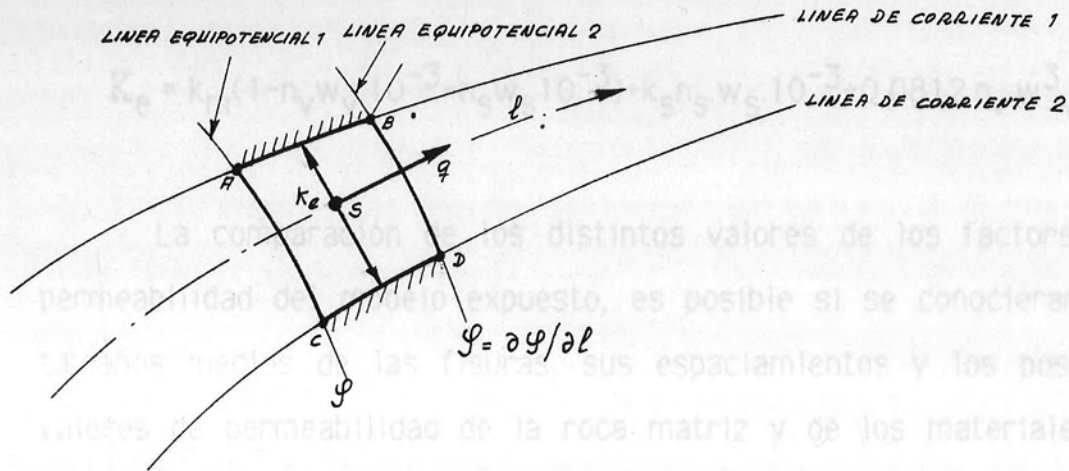


FIGURA 10

COMPARACION DE VALORES DE LOS DISTINTOS FACTORES DE PERMEABILIDAD, PARA LA FILTRACION EN DISCONTINUIDADES EN UN MEDIO DE DARCY PLANO

Elevada.....	$K_m = k_m(1 - n_v \cdot w_v - n_s \cdot w_s)$	$10^{-1} - 10^{-3}$
Media.....	$K_e = K_m + K_s + K_w$	$10^{-3} - 10^{-5}$
Muy baja.....	$K_s = k_s \cdot n_s \cdot w_s$	$10^{-5} - 10^{-7}$
Prácticamente impermeable.....	$K_w = g/12v \cdot n_v \cdot w_v^3$	$< 10^{-7}$

expresando: n_s y n_v como número de fisuras/ml.

Si se interpretan los valores de k_m como próximos a los establecidos para muestras en laboratorio, muestras de granito duro y calizas compactas, k_m y k_s en cms/seg.
 w_s y w_v en mm. permeabilidades inferiores a 10^{-10}

y tomando para v : $1,007 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{seg.}$ ($T = 20^\circ\text{C}$)

$$K_e = k_m(1 - n_v w_v \cdot 10^{-3} - n_s w_s \cdot 10^{-3}) + k_s n_s \cdot w_s \cdot 10^{-3} + 0,0812 \cdot n_v \cdot w_v^3$$

La comparación de los distintos valores de los factores de permeabilidad del modelo expuesto, es posible si se conocieran los tamaños medios de las fisuras, sus espaciamientos y los posibles valores de permeabilidad de la roca matriz y de los materiales de relleno de diaclasas.

Como orden de ideas, podríamos situar los valores de k_s , siguiendo a Terzaghi y Peck (1967) según una clasificación primaria en:

GRADO DE PERMEABILIDAD (SUELOS) VALOR DE k_s (cm/seg.)

Elevada.....	$>10^{-1}$
Media.....	$10^{-1} - 10^{-3}$
Baja.....	$10^{-3} - 10^{-5}$
Muy baja.....	$10^{-5} - 10^{-7}$
Prácticamente impermeable.....	$<10^{-7}$

Si se interpretan los valores de k_m , como próximos a los establecidos para muestras sanas en laboratorio, muestras de granito duro y calizas compactas pueden dar permeabilidades inferiores a 10^{-10}

cms/seg., mientras que algunas areniscas ó esquistos muy fisurados pueden llegar a valores de permeabilidad del orden de 10^{-3} cms/seg.

El valor de la permeabilidad en un punto, de un medio fisurado, depende de la permeabilidad de la roca matriz, de la permeabilidad del suelo confinado en sus fisuras, del índice y orientación de su fisuración y de la apertura de sus fisuras.

La influencia de la fisuración, en la permeabilidad global de una zona rocosa, queda reflejada por la gran diferencia de los valores obtenidos para muestras de roca en laboratorio y ensayos de permeabilidad "in situ".

La Tabla 1, presenta algunos valores comparativos, recogidos en "Mecánica de rocas en la ingeniería práctica (STAGG-ZIENKIEWICZ)".

TABLA 1

Material rocoso (k_m : cms/seg.; Laboratorio)		Macizo rocoso (K_e : cms/seg.) (Determinación "in situ")	
Arenisca (Flysch, cretácico)	10^{-8} a 10^{-10}	Arenisca	10^{-2}
Arenisca	$1,2 \cdot 10^{-5}$ a $1,6 \cdot 10^{-7}$	Gneis	$1,2$ a $1,9 \cdot 10^{-3}$
Arenisca de grano fino	$2 \cdot 10^{-7}$	Granito pegmatítico	$0,6 \cdot 10^{-3}$
Granito	$2 \cdot 10^{-10}$ a $5 \cdot 10^{-11}$	Arteritas clorotizadas y pizarras arcil.	$0,7 \cdot 10^{-2}$
Pizarra	$1,6 \cdot 10^{-10}$ a $7,0 \cdot 10^{-10}$	Caliza eocena	10^{-2} a 10^{-4}
Caliza	$1,2 \cdot 10^{-7}$ a $7,0 \cdot 10^{-10}$		
Dolomia	$4,6 \cdot 10^{-7}$ a $1,2 \cdot 10^{-8}$		

Aún siendo estos valores de la Tabla 1, muy específicos de las muestras analizadas en laboratorio y las condiciones de metodología de ensayo, resaltan las diferencias de los órdenes de magnitud, de la permeabilidad matricial de la roca con su permeabilidad equivalente determinada "in situ".

Mientras que las muestras de roca sana dan en el laboratorio, permeabilidades de orden inferior a 10^{-5} cms/seg. (p.ej.: granitos alterados y algunas areniscas), los ensayos in situ dan para macizos rocosos permeabilidades en general superiores a 10^{-3} cms/seg. La comparación de estos valores expresa el fuerte aumento de permeabilidad que proporciona a un macizo rocoso, su fisuración.

La influencia de las fisuras abiertas, se patentiza por los valores de K_w , para distintas aperturas y espaciamientos en un medio impermeable.

Roca impermeable con diaclasas de 0,1 mm separadas 1 m ($8 \cdot 10^{-5}$) cms/seg.

Roca impermeable con diaclasas de 0,1 mm separadas 10 cm ($8 \cdot 10^{-4}$) cms/seg.

Roca impermeable con diaclasas de 1 mm separadas 1 m ($8 \cdot 10^{-2}$) cms/seg.

Roca impermeable con diaclasas de 1 mm separadas 10 cm ($8 \cdot 10^{-1}$) cms/seg.

La influencia de las diaclasas rellenas por material permeable, se puede reflejar por los valores de K_s para distintas hipótesis de anchura de discontinuidad y espaciamiento en un medio impermeable, sin fisuras vacías.

B.4.- MODELO DE RELACION PERMEABILIDAD

k_s cm/seg. K_s cm/seg.

Roca impermeable sin fisuras vacías con diaclasas de
1 cm separadas 1 m y rellenas de material permeable

10^{-1}		10^{-3}
10^{-2}		10^{-4}
10^{-4}		10^{-6}
10^{-6}		10^{-8}

B.4.1.- Consideraciones generales

Si se considera la roca en una zona de cimentación, como un conjunto formado por una estructura compacta (para maciza) y una serie de fisuras vacías o rellenas de material permeable que como en las unidades anteriores se pueden distinguir en dos tipos de discontinuidades posibles llamando superficie de fisuración vacía a la superficie de las discontinuidades abiertas y superficie de fisuración rellena a la ocupada por material permeable.

Aún sin aportar datos precisos sobre la valoración de los distintos factores de permeabilidad, si interesa dejar constancia de la importancia singular que la aparición de fisuras en un medio impermeable, tiene respecto a los caudales de filtración. Así, en el modelo simple que hemos enunciado una discontinuidad de 1 cm con espaciamiento de 1 m, rellena de material de elevada permeabilidad (p.e.: 10^{-1} cm/seg.), sería equivalente en cuanto a aportación de caudal a una fisura vacía de apertura 0,25 mm con el mismo espaciamiento.

$$(W_s = 40W_v \rightarrow K_s \ll K_w).$$

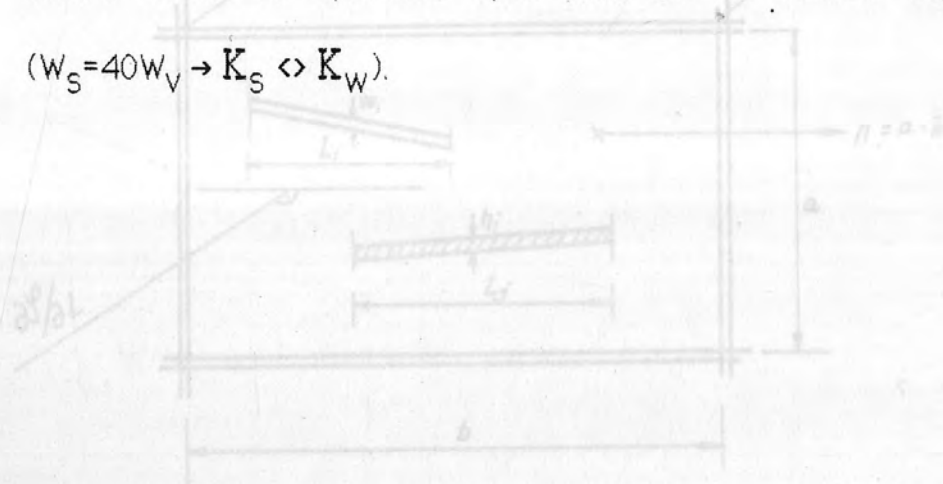


FIGURA 11

$$\text{Superficie de fisuración vacía } Q_v = \sum L_i w_i$$

$$\text{Superficie de fisuración rellena } Q_r = \sum L_i n_i$$

B.4.- MODELO DE RELACION PERMEABILIDAD EQUIVALENTE-DE-FORMACION

B.4.1.- Consideraciones generales

Si se considera la roca en una zona de cimiento, como un conjunto formado por una estructura compacta (roca matriz) y una serie de fisuras vacías ó rellenas de material permeable que ocupan espacios independientes, se pueden distinguir los dos tipos de discontinuidades posibles, llamando superficie de fisuración *vacía*, a la superficie de las discontinuidades abiertas y superficie de fisuración *rellena*, a la ocupada por material permeable.

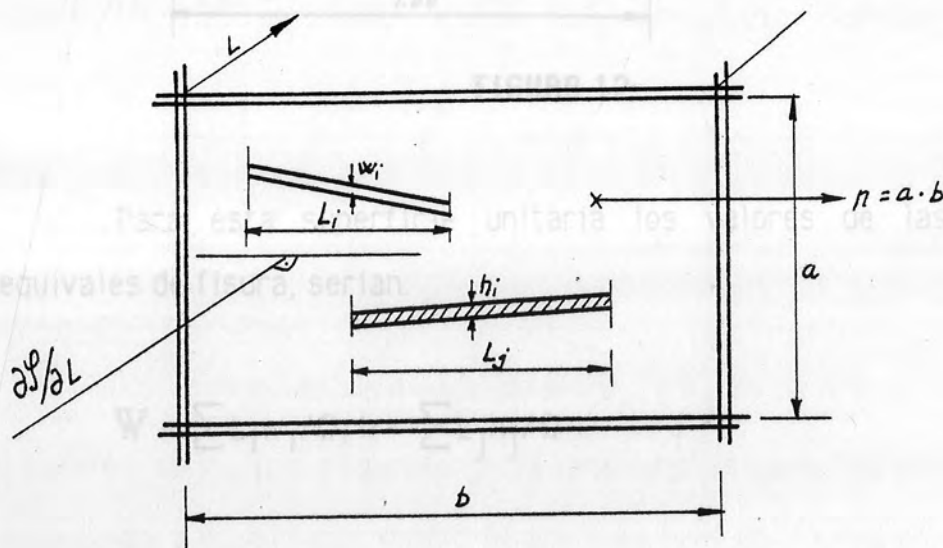


FIGURA 11

Superficie de fisuración vacía $\Omega_v = \sum L_i w_i$

Superficie de fisuración rellena $\Omega_r = \sum L_j h_j$

Los valores unitarios respecto a la superficie total Ω de la roca, se pueden presentar como una anchura de fisura equivalente si se supone a esta fisura una longitud igual a L , representando la fisuración por ml. de anchura.

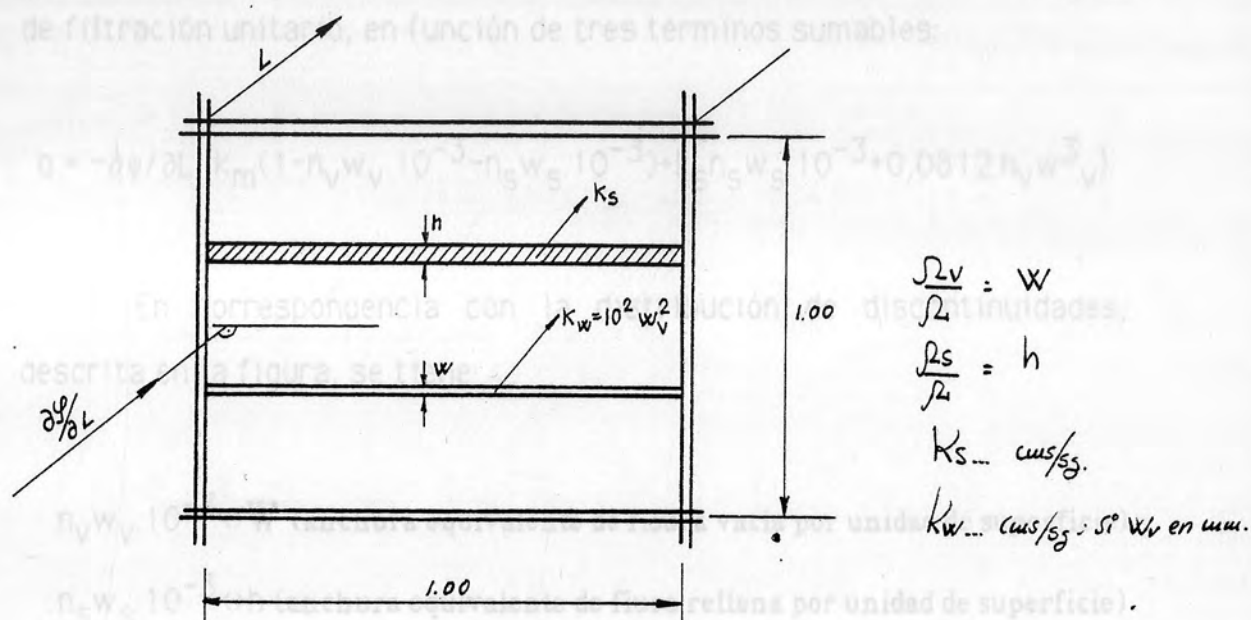


FIGURA 12

Para esta superficie unitaria los valores de las anchuras equivalentes de fisura, serian:

$$W = \sum L_i w_i / \Omega; h = \sum L_j h_j / \Omega$$

Por tanto, para la unidad de superficie de roca, se denominará anchura de fisura equivalente vacía a la relación de superficie vacía con respecto a la superficie total. De la misma manera, se denominará anchura de fisura equivalente rellena, a la relación de la superficie de discontinuidades rellenas con respecto a la superficie total.

Esta forma de modelizar en una zona, los espacios vacíos o rellenos de sus discontinuidades, se enlaza con las formas de filtración del agua en discontinuidades simples, descritas para los modelos simples de fisuras planas en B.3.2. En este epígrafe, se expresa al caudal de filtración unitario, en función de tres términos sumables:

$$q = -\partial\psi/\partial L \cdot [k_m(1-n_v w_v \cdot 10^{-3} - n_s w_s \cdot 10^{-3}) + k_s n_s w_s \cdot 10^{-3} + 0,0812 \cdot n_v w_v^3]$$

En correspondencia con la distribución de discontinuidades, descrita en la figura, se tiene:

$$n_v w_v \cdot 10^{-3} \approx W \text{ (anchura equivalente de fisura vacía por unidad de superficie)}$$

$$n_s w_s \cdot 10^{-3} \approx h \text{ (anchura equivalente de fisura rellena por unidad de superficie)}$$

En términos de orden de magnitud se puede suponer el valor $0,0812 n_v w_v^3 \approx W \cdot w_v^2 \cdot 10^2 \text{ cms/seg.}$

Expresando las permeabilidades k_m y k_s en cms/seg. Siendo W y h valores unitarios respecto a la anchura unitaria de filtración y tomando para w_v el valor medio de apertura real de fisuras en la sección expresada en mm.

$$K_e = [k_m(1-W-h) + k_s \cdot h + W \cdot w_v^2 \cdot 10^2]$$

Como aclaración de los términos que intervienen en la permeabilidad equivalente en una zona, se puede considerar el ejemplo siguiente: de cual es su anchura media.

Matriz rocosa impermeable $\rightarrow k_m = 10^{-10}$ cm/seg.

Relleno de fisuras de permeabilidad media-baja $\rightarrow k_s = 10^{-2}$ m/seg.

Superficie vacía 1% $\rightarrow$ Anchura de fisura equivalente vacía por ml $\rightarrow W = 10^{-3}$.

Superficie rellena 1% $\rightarrow$ Anchura de fisura equivalente, rellena por ml $\rightarrow h = 10^{-2}$.

Anchura media de las fisuras reales, vacías $\rightarrow w_v = 0,1$ mm.

$$K_e = K_m + K_s + K_w \quad K_m = k_m(1 - W - h) \approx 10^{-10} \text{ cms/seg.}$$

$$K_s = k_s \cdot h \approx 10^{-4} \text{ cms/seg.}$$

$$K_w = 10^2 \cdot W \cdot w_v^2 \approx 10^{-3} \text{ cms/seg.}$$

En este caso, la permeabilidad equivalente en la zona sería del orden de la permeabilidad por fisuración vacía $K_e \approx K_w = 10^{-3}$ cms/seg.

Para poner aún más de manifiesto, la importancia de la fisuración en la permeabilidad equivalente, si en el caso anterior en vez de suponer 10 fisuras vacías de 0,1 mm por ml de anchura ($W = 10^{-3}$), se supone una sola fisura de 1 mm ($W = 10^{-3}$) el valor de k_w sería 10^{-1} cms/seg.

Este "umbral de tensión" que en una fisura concreta, debería de ser la tensión efectiva nula, se manifestará en la zona, para un estado

Estos sencillos ejemplos, denotan que la permeabilidad equivalente zonal, depende fundamentalmente de si existen ó nó fisuras abiertas y de cual es su anchura media.

Para una superficie de fisuración vacía dada, la permeabilidad equivalente por fisuración vacía, crece con el cuadrado de la apertura media de fisuras (w_v).

En el modelo que se presenta, se considera la fisuración ya preestablecida por las características iniciales de la roca, las inyecciones realizadas en ella y su historia tensional, de tal forma que la apertura de una de las fisuras de la zona se produce cuando la presión del agua iguala ó supera a la tensión que las fuerzas exteriores transmiten a su contorno.

La evolución de esta fisura abierta depende de la configuración geométrica de la zona fisurada y podrá progresar en el tiempo dependiendo de sus condiciones de confinamiento general.

De esta manera, se entiende la fisuración en el conjunto de una zona como un hecho preestablecido, que se manifiesta respecto a la permeabilidad y a la deformabilidad a partir de un cierto "umbral de tensión efectiva media", y que se produce con reversibilidad, si no se modifica la distribución de discontinuidades en la zona.

Este "umbral de tensión" que en una fisura concreta, debería de ser la tensión efectiva nula, se manifestará en la zona, para un estado

tensional medio, en general de débil compresión, como consecuencia de considerar la tensión como un efecto de repartición uniforme de las cargas exteriores y presiones del agua en una superficie de discontinuidades.

Al superarse en esta zona, el estado tensional "umbral", se produce una apertura de fisuras, que incide sobre la permeabilidad y la deformabilidad en un punto concreto, de forma decisiva, pero que puede no afectar demasiado a la deformabilidad de conjunto ó a la permeabilidad equivalente zonal, si la fisuración es un hecho localizado.

B.4.2.- Hipótesis básicas para la formulación de un modelo matemático de relación $k \rightarrow q$
 Como ejemplo, si se supone un flujo unidimensional lineal en una zona de filtración en la que existe una longitud fisurada αL y en el resto de la zona una permeabilidad constante k_2 .

Se ha definido la permeabilidad equivalente en una zona, a través de la expresión

La permeabilidad equivalente que representa al caudal de filtración entre el punto A y B, sería:

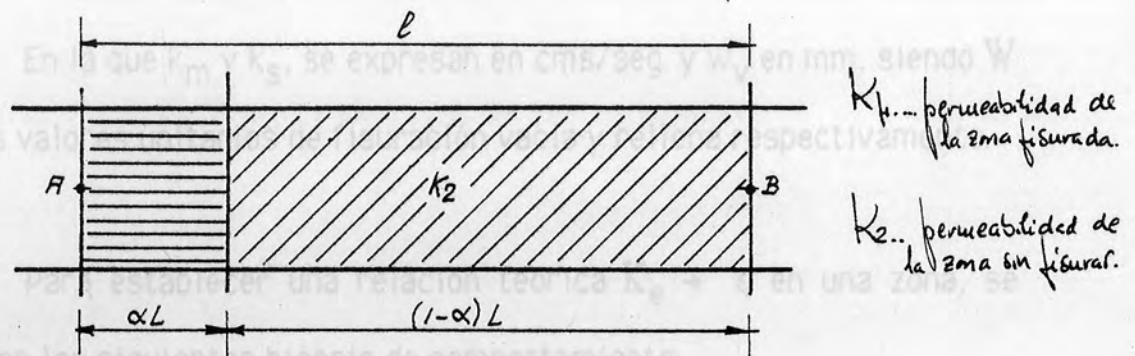


FIGURA 13

$$k_{e(A-B)} = \frac{L}{\int_B^A \frac{dx}{k_x}} = \frac{L}{\frac{\alpha L}{k_f} + \frac{(1-\alpha)L}{k_2}} = \frac{k_2}{\alpha k_2 + (1-\alpha)}$$

De tal forma, que siendo $k_2 \ll k_f$ y α una fracción pequeña de la longitud total L , el valor $k_{e(A-B)} \approx k_2/(1-\alpha)$.

Si se supone $\alpha = 0,1$, el valor de $k_{e(A-B)} \approx 1,1 k_2$.

B.4.2.- Hipótesis básicas para la formulación de un modelo matemático de relación $k_e \rightarrow \xi$

Se ha definido la permeabilidad equivalente en una zona, a través de la expresión:

$$K_e = \{k_m(1-W-h) + k_s h + W \cdot w_v^2 \cdot 10^2\} \text{ cms/seg.}$$

En la que k_m y k_s , se expresan en cms/seg. y w_v en mm, siendo W y h los valores unitarios de fisuración vacía y rellena respectivamente.

Para establecer una relación teórica $K_e \rightarrow \xi$ en una zona, se realizan las siguientes hipótesis de comportamiento:

- a) Se considera la permeabilidad matricial de la roca, en todos sus puntos muy pequeña respecto a la permeabilidad del relleno de fisuras, si éstas no están fuertemente compimidas, y respecto a la que se produce por efecto de apertura de fisuras $K_m \ll k_s \cdot h$

$$K_m \ll W \cdot w_v^2 \cdot 10^2$$

Así mismo, se considera que las superficies totales de fisuración son pequeñas en términos relativos a la superficie total de filtración $(1-W-h) \approx 1,0$.

- b) La permeabilidad por fisuración vacía se manifiesta a partir de un cierto umbral de tensión efectiva media σ'_* . Para tensiones efectivas menores, se supone en la zona que $K_w = W \cdot w_v^2 \cdot 10^2$, tiende rápidamente a ser $\gg k_s \cdot h$.

- c) El coeficiente de permeabilidad Darcy para el relleno de fisuras varía con el índice de poros según expresiones del tipo:

$$k_s = D_s^2 \gamma / \mu \cdot e^3 / (1+e) \cdot C \quad (\text{Taylor})$$

$$k_{s0} = 1/k_0 \cdot s^2 \cdot \gamma / \mu \cdot e^3 / (1+e) \quad (\text{Kozeny- Carman})$$

en las que los factores relativos a las características del fluido (γ =peso específico; μ =viscosidad dinámica) y a las

partículas del material de relleno (D_s = diámetro efectivo de las partículas; S = superficie específica), así como el factor de forma C ó el factor de relación k_0 suponen constantes.

Como primera aproximación, si se supone una única fisura rellena en la superficie unitaria de filtración de roca, con una anchura inicial h_0 y una permeabilidad Darcy inicial k_{s0} para su relleno, se tiene:

$$k_s = 1/k_0 s^2 \cdot \gamma/\mu \cdot e^3/(1+e)$$

$$k_s = k_{s0}(e/e_0)^3 \cdot (1+e_0)/(1+e)$$

$$k_{s0} = 1/k_0 s^2 \cdot \gamma/\mu \cdot e_0^3/(1+e_0)$$

La deformación de esta única fisura, sería:

$$\xi_s = (h_0 - h)/(h_0) = (e_0 - e)/(1 + e_0);$$

a) Cada una de las fisuras rellenas es un elemento de discontinuidad independiente con una geometría y una permeabilidad propias. La deformación máxima a compresión, $e=0$, se corresponde con una anchura de fisura mínima $= h_0/(1+e_0)$.

La contribución a la permeabilidad equivalente del conjunto de roca en el punto por parte de esta fisura sería:

$$k_s \cdot h = [1/k_0 s^2 \cdot \gamma/\mu \cdot e^3/(1+e)] h$$

$$k_s \cdot h / k_{s0} \cdot h_0 = (e/e_0)^3$$

$$k_{s0} \cdot h_0 = 1/k_0 s^2 \cdot \gamma/\mu \cdot [e_0^3/(1+e_0)] \cdot h_0$$

Expresando e/e_0 , en función de ξ y llamando $\xi_{rs} = e_0/(1+e_0)$, se tiene:

$$k_s \cdot h / k_{s0} \cdot h_0 = [1 - [(1+e_0)/e_0] \cdot \xi_s]^3; \quad k_s \cdot h / k_{s0} \cdot h_0 = [1 - [\xi_s/\xi_r]]^3$$

Esta sencilla aproximación al problema, no incluye muchos efectos posibles que pueden modificar la relación $k_s \cdot h \rightarrow \xi_s$ en la zona, aún cuando el factor predominante en la modificación de K_e sea la extensión ó compresión de las fisuras rellenas de material permeable. Como ejemplos pueden citarse:

a) Cada una de las fisuras rellenas es un elemento de discontinuidad independiente con una geometría y una deformabilidad diferente (h_{0i} , L_i , ξ_{si}).

b) Las fisuras prevacias son también elementos de discontinuidad independientes y su forma geométrica y grado de confinamiento puede condicionar sus aperturas, en distintos momentos, por efecto de la distribución de tensiones en el conjunto de discontinuidades.



- c) Algunas de estas fisuras "prevacias", pueden no cerrarse nunca (a efectos de filtración) porque los contactos intergranulares entre sus planos de cierre permiten la filtración a través de ella aún cuando su compresión sea fuerte.
- d) La extensión de una fisura rellena puede favorecer la formación en ella de alguna fisura vacía.

Estas consideraciones entre otras, hacen que el modelo general del comportamiento zonal, se defina para estados tensionales inferiores a ϵ^* a través de una relación $k_s \cdot h / k_{s0} \cdot h_0 = (1 - \epsilon_s / \epsilon_{rs})^m$, en la que m es un parametro que indica la velocidad de respuesta de la permeabilidad a la deformación en un conjunto de discontinuidades, con predominio de la fisuración rellena.

Para caracterizar la modificación zonal de la permeabilidad equivalente habria que conocer y valorar la incidencia del estado tensional en la variación del índice de fisuración vacía y en la anchura media de apertura de las fisuras reales.

Si se suponen tres estados tensionales diferenciados I, II y III, correspondientes, en una zona, a estados de deformación con influencia o no de fisuras abiertas, las relaciones que se deberían tomar para la expresión de K_e , serían: (figura 14).

ESTADO I (Hipótesis)

-Estado de fuerte compresión.

-Todas las fisuras vacías se encuentran cerradas.

-Todas las fisuras rellenas se encuentran comprimidas y su deformación es la máxima a compresión (ϵ_p) con relación a un

estado inicial de apertura ($\epsilon=0$), $K_e = K_m = k_m$ (permeabilidad matricial de la roca).

ESTADO II (Hipótesis)

-El estado general de compresión disminuye con respecto al I.

-Existe una recuperación elástica de las fisuras rellenas de material permeable y el caudal de filtración se produce preferentemente a través de ellas.

-Todas las fisuras vacías se encuentran cerradas.

$$K_m \ll K_s; K_w = 0$$

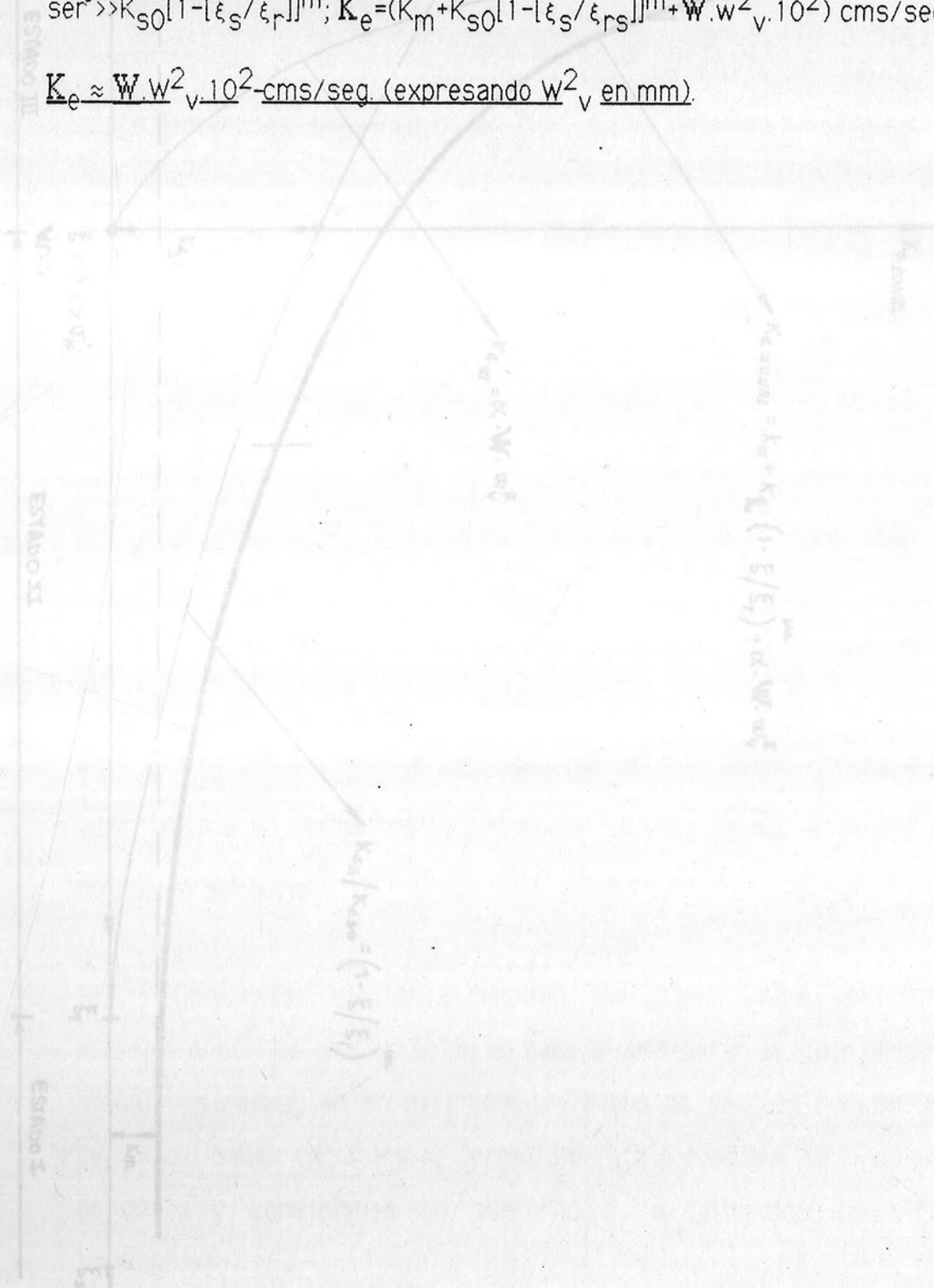
$$K_e = K_m + K_s h \approx K_{s0} [1 - (\epsilon_s / \epsilon_{rs})]^m$$

ESTADO III (Hipótesis)

-Sigue disminuyendo el estado de compresión con respecto al II.

-Las fisuras rellenas de material permeable no amplían sus dimensiones ó lo hacen apareciendo en ellas estados de fisuración vacía.

-Se abren las fisuras vacías y el caudal se produce preferentemente a través de ellas $K_m \ll K_s$; K_w tiende rápidamente a ser $\gg K_{s0}[1-(\xi_s/\xi_r)]^m$; $K_e = (K_m + K_{s0}[1-(\xi_s/\xi_r)]^m + W \cdot w_v^2 \cdot 10^2) \text{ cms/seg.}$
 $K_e \approx W \cdot w_v^2 \cdot 10^2 \text{ cms/seg. (expresando } w_v^2 \text{ en mm)}$



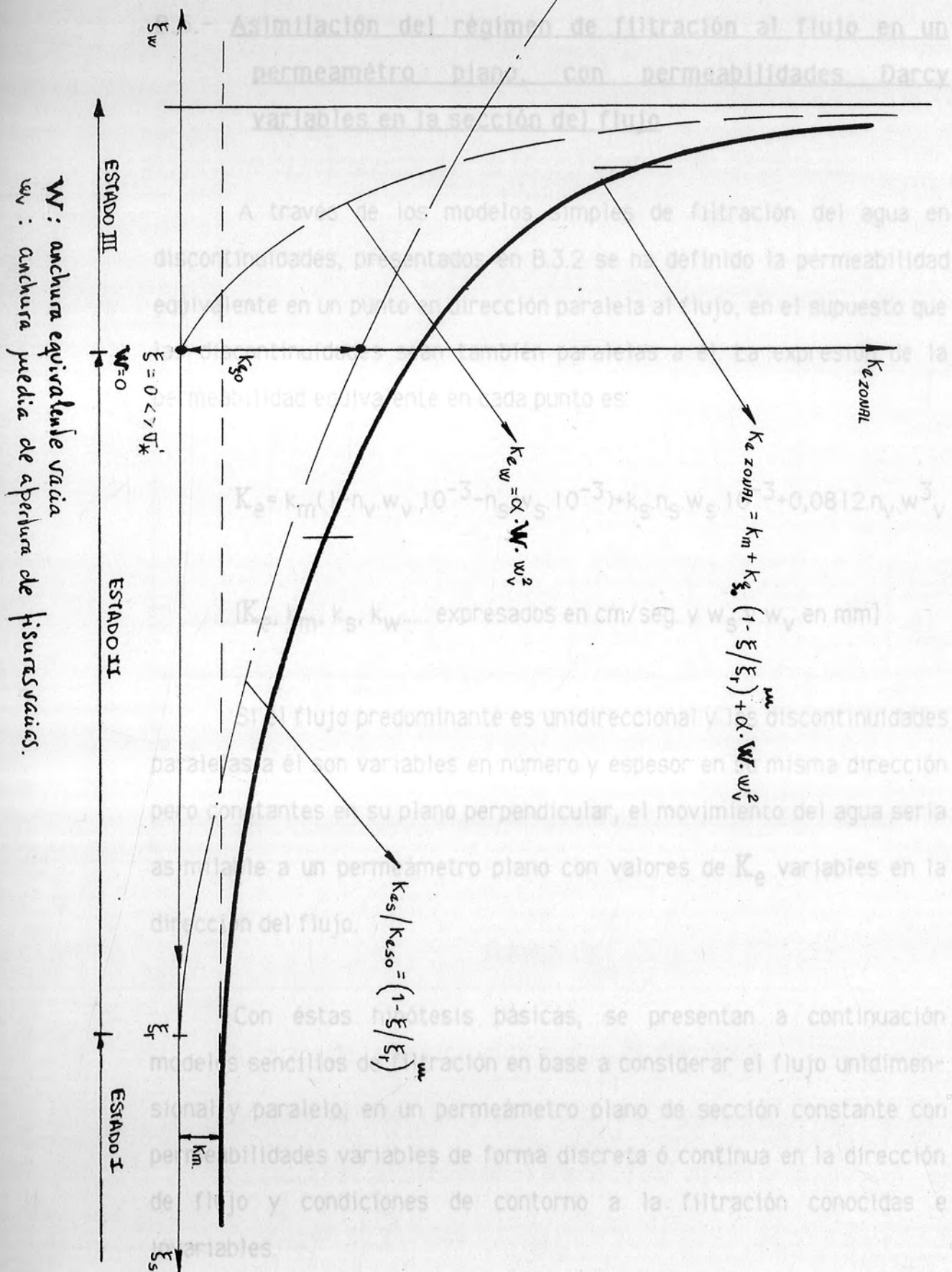


FIGURA 14

B.5.- Asimilación del régimen de filtración al flujo en un permeámetro plano, con permeabilidades Darcy variables en la sección del flujo

A través de los modelos simples de filtración del agua en discontinuidades, presentados en B.3.2 se ha definido la permeabilidad equivalente en un punto en dirección paralela al flujo, en el supuesto que las discontinuidades sean también paralelas a él. La expresión de la permeabilidad equivalente en cada punto es:

$$K_e = k_m(1 - n_v \cdot w_v \cdot 10^{-3} - n_s \cdot w_s \cdot 10^{-3}) + k_s \cdot n_s \cdot w_s \cdot 10^{-3} + 0,0812 \cdot n_v \cdot w_v^3$$

[K_e , k_m , k_s , k_w expresados en cm/seg. y w_s y w_v en mm]

Si el flujo predominante es unidireccional y las discontinuidades paralelas a él son variables en número y espesor en su misma dirección pero constantes en su plano perpendicular, el movimiento del agua sería asimilable a un permeámetro plano con valores de K_e variables en la dirección del flujo.

Con éstas hipótesis básicas, se presentan a continuación modelos sencillos de filtración en base a considerar el flujo unidimensional y paralelo, en un permeámetro plano de sección constante con permeabilidades variables de forma discreta ó continua en la dirección de flujo y condiciones de contorno a la filtración conocidas e invariables.

B.5.1.- Permeámetro de sección constante paralelo al plano de referencia (formulación)

a) Esquema de representación del flujo y condiciones de contorno

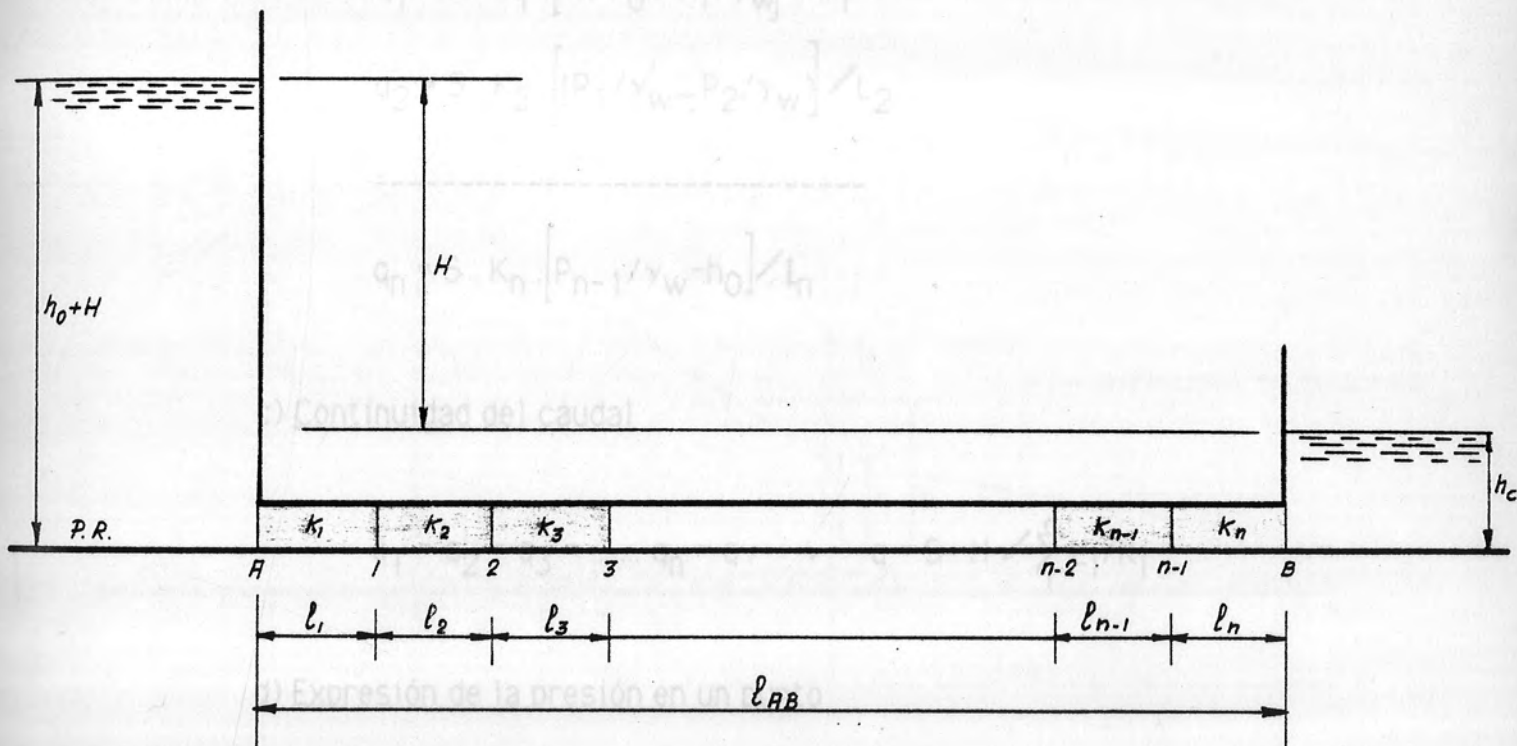


FIGURA 15

e) Variación continua de la permeabilidad $K = K(x)$

P_R : plano de referencia para medida de presiones.

K_i : permeabilidad Darcy en la longitud L_i (puntos $i-1$ a i).

q_i : caudal de filtración en el tramo L_i por unidad de anchura.

P_i : presión en el punto i .

γ_w : peso específico del agua

S: superficie del permeámetro plano por unidad de anchura.

$P_A/\gamma_w = h_0 + H$; $P_B/\gamma_w = h_0$ condiciones de contorno.

b) Expresión del caudal de filtración (Ley de Darcy)

$$q_1 = S \cdot K_1 \cdot [(H+h_0) - P_1/\gamma_w] / L_1$$

$$q_2 = S \cdot K_2 \cdot [P_1/\gamma_w - P_2/\gamma_w] / L_2$$

$$q_n = S \cdot K_n \cdot [P_{n-1}/\gamma_w - h_0] / L_n$$

c) Continuidad del caudal

$$q_1 = q_2 = q_3 = \dots q_n = q \rightarrow q = S \cdot H / \sum_{i=1}^n L_i / K_i$$

d) Expresión de la presión en un punto

$$P_1/\gamma_w = (H+h_0) - H \cdot \sum_{j=1}^i L_j / K_j / \sum_{j=1}^n L_j / K_j$$

e) Variación continua de la permeabilidad $K = K(x)$

P_0 : plano de referencia para medida de presiones.

Expresiones: $q = S \cdot H / \int_0^{L_{AB}} dx / K(x)$

K_1 : permeabilidad Darcy en la longitud L_{AC} , supuesta constante

K_2 : permeabilidad Darcy en la longitud L_{CB} , supuesta constante

$$P_x/\gamma_w = (H+h_0) - H \left[\int_0^{L_{AB}} dx / K(x) / \int_0^{L_{AB}} dx / K(x) \right]$$

B.5.2.- Permeámetro de sección constante paralelo al plano de referencia, con condición de drenaje en un punto intermedio (formulación)

a) Esquema de representación del flujo y condiciones de contorno

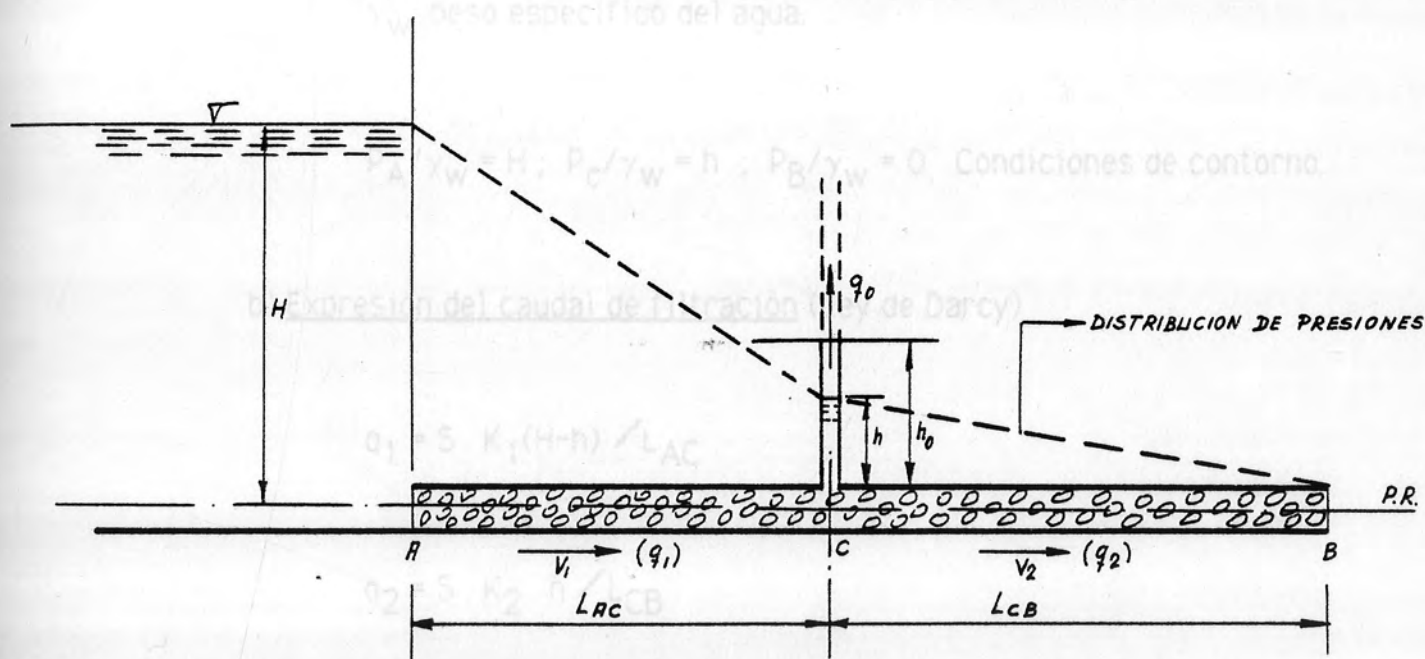


FIGURA 16

P_R : plano de referencia para medida de presiones.

K_1 : permeabilidad Darcy en la longitud L_{AC} , supuesta constante.

K_2 : permeabilidad Darcy en la longitud L_{CB} , supuesta constante.

q_1 : caudal de filtración en el tramo L_{AC} , por unidad de anchura.

q_2 : caudal de filtración en el tramo L_{CB} , por unidad de anchura.

q_D : caudal de drenaje, por unidad de anchura.

h : altura del agua en el drenaje sobre el plano de referencia

(h_0 : valor máximo).

S : superficie del permeámetro plano por unidad de anchura.

γ_w : peso específico del agua.

$P_A/\gamma_w = H$; $P_C/\gamma_w = h$; $P_B/\gamma_w = 0$ Condiciones de contorno.

b) Expresión del caudal de filtración (Ley de Darcy)

$$q_1 = S \cdot K_1 (H-h) / L_{AC}$$

$$q_2 = S \cdot K_2 \cdot h / L_{CB}$$

c) Continuidad del caudal

$$q_1 - q_2 = q_D \rightarrow q_D = S \cdot K_1 (H-h) / L_{AC} - S \cdot K_2 \cdot h / L_{CB}$$

d) Variación continua de la permeabilidad $K = K(x)$

d.1.- Expresión del caudal en el drenaje

Llamando a $L_{AC} = c$ y a $L_{AC} + L_{CB} = b$ y siendo $K = K(x)$

$$q_D = S \cdot (H-h) \int_0^c \frac{dx}{K(x)} - S \cdot h \int_c^b \frac{dx}{K(x)}$$

d.2.- Expresión de la distribución de presiones

$$P_x/\gamma_w = H - \left[\int_0^x \frac{dx}{K(x)} \right] \int_0^c \frac{dx}{K(x)} ; \quad V_x \quad 0 \leq x \leq c$$

$$P_x/\gamma_w = h \left[\int_c^x \frac{dx}{K(x)} \right] \int_c^b \frac{dx}{K(x)} ; \quad V_x \quad c \leq x \leq b$$

B.6.- MODELOS DE DISTRIBUCION DE PERMEABILIDADES ENTRE DOS PUNTOS A Y B

B.6.1.- Consideraciones generales

Para estimar la influencia de la distribución de permeabilidades en la zona de filtración se plantean distintos modelos simples, basados en distribuciones sencillas de las que se suponen conocidas las condiciones en el contorno.

El primer modelo presentado en B.6.2.1. supone una distribución lineal de permeabilidades entre dos puntos A y B en los que se establecen como condiciones de contorno los valores de la permeabilidad en ellos (K_A y K_B).

El segundo modelo, que se presenta en B.6.2.2, supone una distribución uniforme en las zonas de inicio y final de la filtración acotando en ella dos tramos de longitudes parciales l_1 y l_3 y suponiendo entre ambas zonas una distribución lineal de permeabilidades con condiciones de contorno definidas por los valores uniformes en los tramos de comienzo y final de la filtración.

Se establece, por último, un tercer modelo en B.6.3.1, basado en las mismas condiciones de contorno del segundo modelo referido, pero dejando libre la distribución de permeabilidades en el tramo intermedio; este modelo posibilita fijar cualquier tipo de distribución de permeabilidades en una zona intermedia, compatible con las condiciones impuestas en los contornos ($K=K_A$, $0 \leq x \leq l_1$; $K=K_B$, $l_1+l_2 \leq x \leq l_3$).

B.6.2.- Distribución de permeabilidades lineales por tramos

B.6.2.1.- Distribución de permeabilidad, lineal entre dos puntos A y B

a) Esquema general

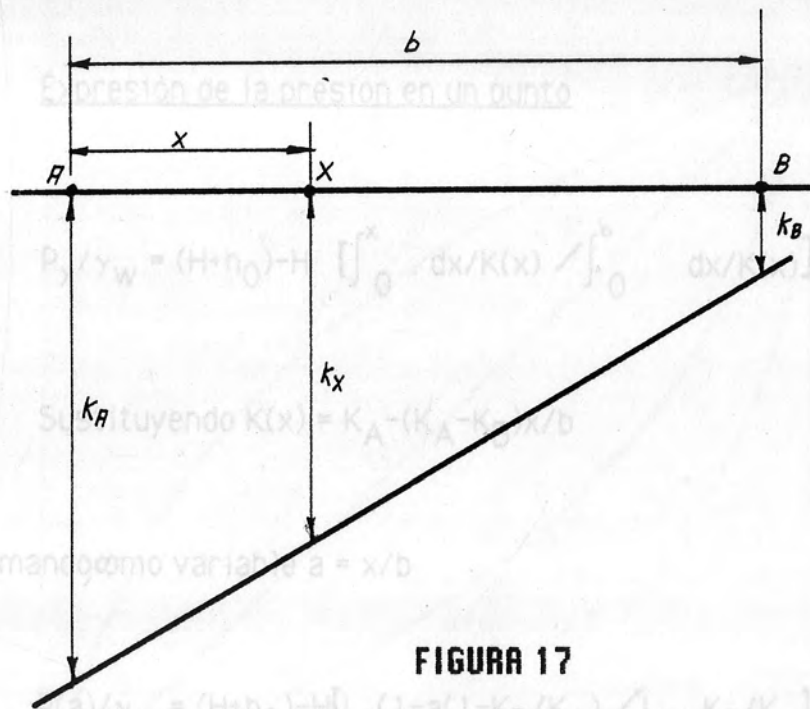


FIGURA 17

b) Expresiones matemáticas

Distribución de permeabilidad $K_x = K_A - (K_A - K_B)x/b$

Condiciones de contorno $P_A/\gamma_w = H + h_0$; $P_B/\gamma_w = h_0$

Expresión del caudal de filtración. Distribuciones para valores de

$$\alpha = K_A/K_B$$

$$q = S \cdot H \int_0^b dx/K(x) = S \cdot H \int_0^b dx / [K_A - (K_A - K_B)x/b]$$

$$q = S \cdot H \cdot (K_A - K_B) / b \cdot L_n \cdot K_A/K_B$$

Expresión de la presión en un punto

$$P_x/\gamma_w = (H+h_0) - H \cdot \left[\int_0^x dx/K(x) / \int_0^b dx/K(x) \right]$$

Sustituyendo $K(x) = K_A - (K_A - K_B)x/b$

y tomando como variable $a = x/b$

$$P(a)/\gamma_w = (H+h_0) - H [L_n(1-a(1-K_B/K_A)) / L_n \cdot K_B/K_A]$$

Representación de la distribución de subpresiones para distintos valores de $\alpha = K_A/K_B$. (Figura 18 y Cuadro 2)

$$\text{Valores: } [d \cdot P(a)/\gamma_w / d(a)] = -[H \cdot (1-1/\alpha)] / [1-a(1-1/\alpha) \cdot 1/L_n \alpha]$$

$$a \rightarrow 0 ; d [P(a)/\gamma_w] / d(a) = -H \cdot (1-1/\alpha) / L_n \alpha$$

$$a \rightarrow 1 ; d [P(a)/\gamma_w] / d(a) = -H \cdot (1-1/\alpha) \alpha / L_n \alpha$$

Representación de distintas distribuciones para valores de

$$\alpha = K_A/K_B$$

Valores de $(P(a)/\gamma_w - h_0)/H$, obtenidos para distintos α

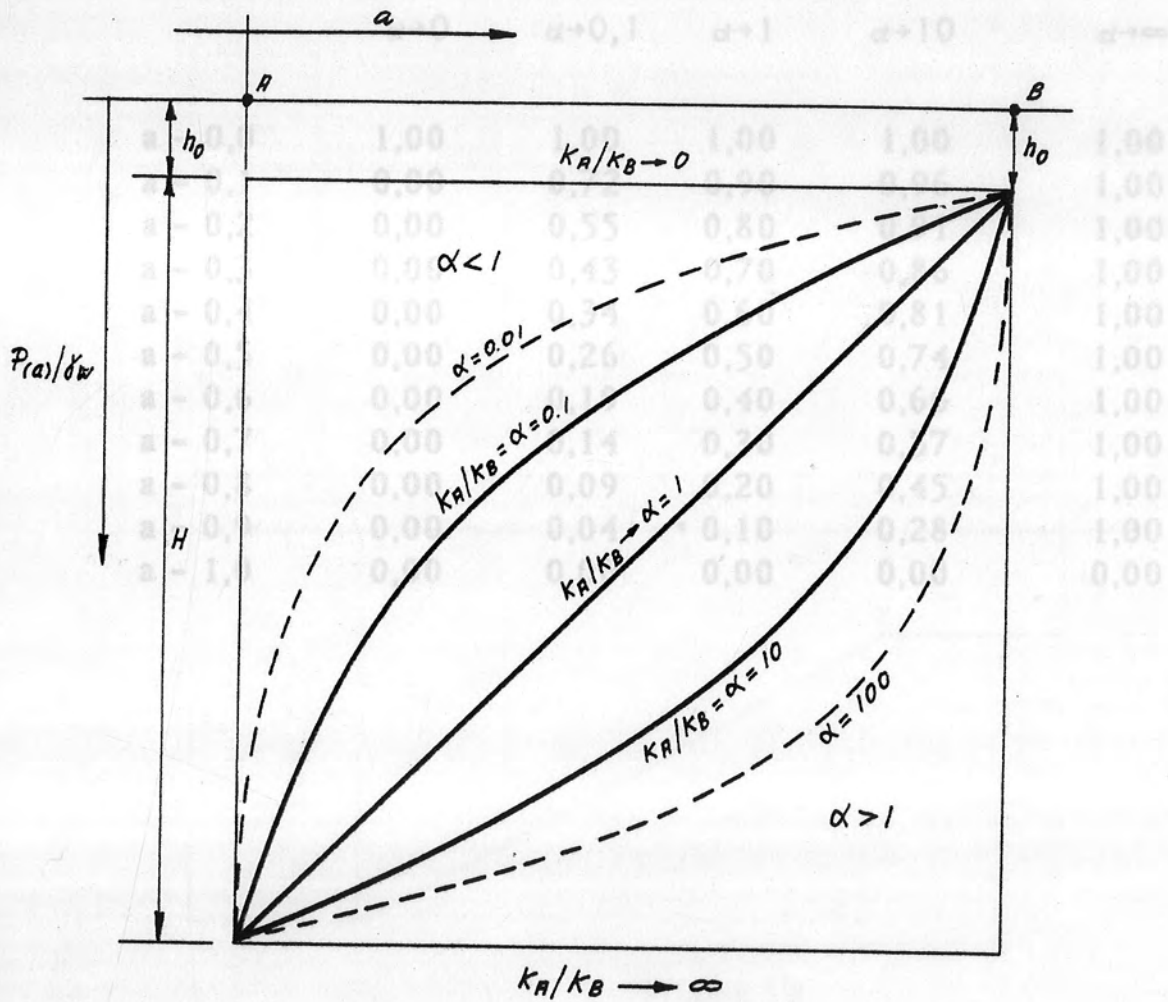


FIGURA 18

B.6.2.2 - Distribución de **CUADRO 2** permeabilidades lineales no continuas. Permeabilidades constantes K_A y K_B aguas

Valores de $(P(a)/\gamma_w - h_0)/H$, obtenidos para distintos α y permeabilidad lineal en la zona intermedia (formula-

	$\alpha \rightarrow 0$	$\alpha \rightarrow 0,1$	$\alpha \rightarrow 1$	$\alpha \rightarrow 10$	$\alpha \rightarrow \infty$
$a = 0,0$	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
$a = 0,1$	0,00	0,72	0,90	0,96	1,00
$a = 0,2$	0,00	0,55	0,80	0,91	1,00
$a = 0,3$	0,00	0,43	0,70	0,86	1,00
$a = 0,4$	0,00	0,34	0,60	0,81	1,00
$a = 0,5$	0,00	0,26	0,50	0,74	1,00
$a = 0,6$	0,00	0,19	0,40	0,66	1,00
$a = 0,7$	0,00	0,14	0,30	0,57	1,00
$a = 0,8$	0,00	0,09	0,20	0,45	1,00
$a = 0,9$	0,00	0,04	0,10	0,28	1,00
$a = 1,0$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

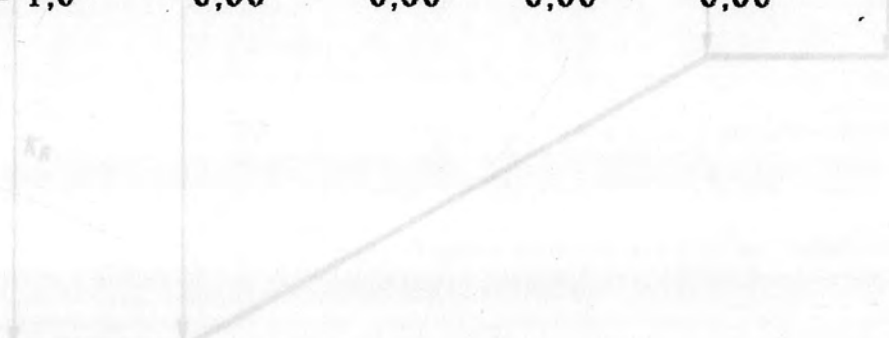


FIGURA 19

ZONA I - $K_x = K_A$: $V_x / 0 < x < L_1$

ZONA II - $K_x = K_A - (K_A - K_B)(x - L_1)/L_2$: $V_x / L_1 < x < L_1 + L_2$

ZONA III - $K_x = K_B$: $V_x / (L_1 + L_2) < x < L$

B.6.2.2.- Distribución de permeabilidades lineales no continuas. Permeabilidades constantes K_A y K_B aguas arriba y aguas abajo de la zona de filtración y permeabilidad lineal en la zona intermedia (formulación)

Esquema general (Condiciones de contorno, iguales a las de B.6.2.1.)

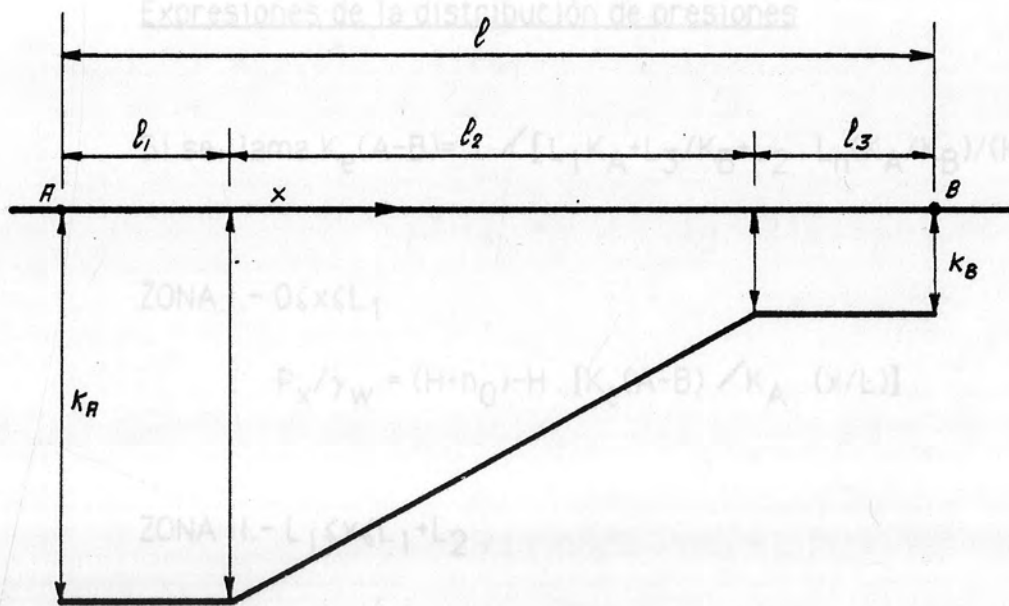


FIGURA 19

ZONA I.- $K_x = K_A$; $V_x / 0 \leq x \leq l_1$

ZONA II.- $K_x = K_A - (K_A - K_B) \cdot (x - l_1) / l_2$; $V_x / l_1 \leq x \leq l_1 + l_2$

ZONA III.- $K_x = K_B$; $V_x / (l_1 + l_2) \leq x \leq l$

Continuidad del caudal

$$q = S \cdot H \int_0^L \frac{dx}{K(x)} =$$

$$= S \cdot H \cdot 1 \int_0^{L_1} \frac{dx}{K_A} + \int_{L_1}^{L_1+L_2} \frac{dx}{K_A - [(K_A - K_B)(x - L_1) / L_2]} + \int_{L_1+L_2}^{L_1+L_2+L_3} \frac{dx}{K_B}$$

$$q = S \cdot H \cdot 1 \int [L_1/K_A + L_3/K_B + L_2 \cdot L_n(K_A/K_B) / (K_A - K_B)]$$

Expresiones de la distribución de presiones

Si se llama $K_e(A-B) = 1 \int [L_1 K_A + L_3/K_B + L_2 \cdot L_n(K_A/K_B) / (K_A - K_B)]$

ZONA I.- $0 \leq x \leq L_1$

$$\frac{P_x}{\gamma_w} = (H + h_0) - H \cdot [K_e(A-B) \int K_A \cdot (x/L)]$$

ZONA II.- $L_1 \leq x \leq L_1 + L_2$

$$\frac{P_x}{\gamma_w} = (H + h_0) - H \cdot \left[\frac{K_e(A-B)}{L} \left[-\frac{L_1}{K_A} - \frac{L_2}{K_A - K_B} L_n \left(1 - \left(1 - \frac{K_B}{K_A} \right) \frac{(x - L_1)}{L_2} \right) \right] \right]$$

ZONA III. - $L_1 + L_2 \leq x \leq L_1 + L_2 + L_3$

$$\frac{P_x}{\gamma_w} = (H + h_0) - H \cdot \frac{K_e(A-B)}{L} \left[\frac{L_1}{K_A} - \frac{L_2}{K_A - K_B} \frac{K_A}{K_B} + \frac{x - (L_1 + L_2)}{K_B} \right]$$

$K_A = 10 K_B$

b) Representación de la distribución de subpresiones para distintos casos tipo (Figuras 20.1 y 20.2)

CASO TIPO I $K_A = 10 K_B$ 1.1 $\rightarrow L_1 = L_3 = 0; L_2 = L$

1.2 $\rightarrow L_1 = 0,1L; L_3 = 0,5L; L_2 = 0,4L$

1.3 $\rightarrow L_1 = 0,5L; L_3 = 0,1L; L_2 = 0,4L$

Figura 20.1

CASO TIPO II $K_A = 0,1 K_B$ 1.1 $\rightarrow L_1 = L_3 = 0; L_2 = L$

1.2 $\rightarrow L_1 = 0,1L; L_3 = 0,5L; L_2 = 0,4L$

1.3 $\rightarrow L_1 = 0,5L; L_3 = 0,1L; L_2 = 0,4L$

$K_A = 0,1 K_B$

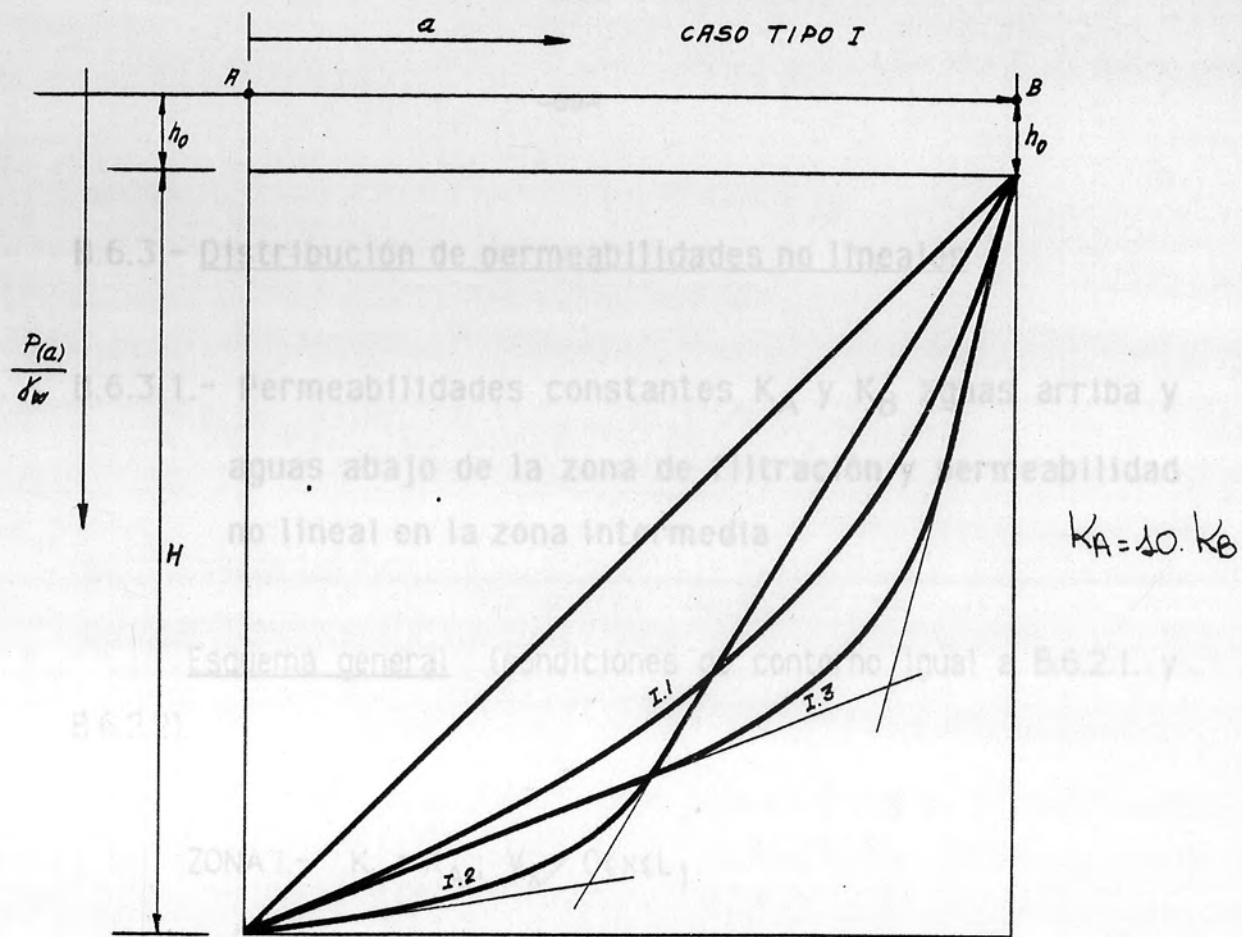


Figura 20.1

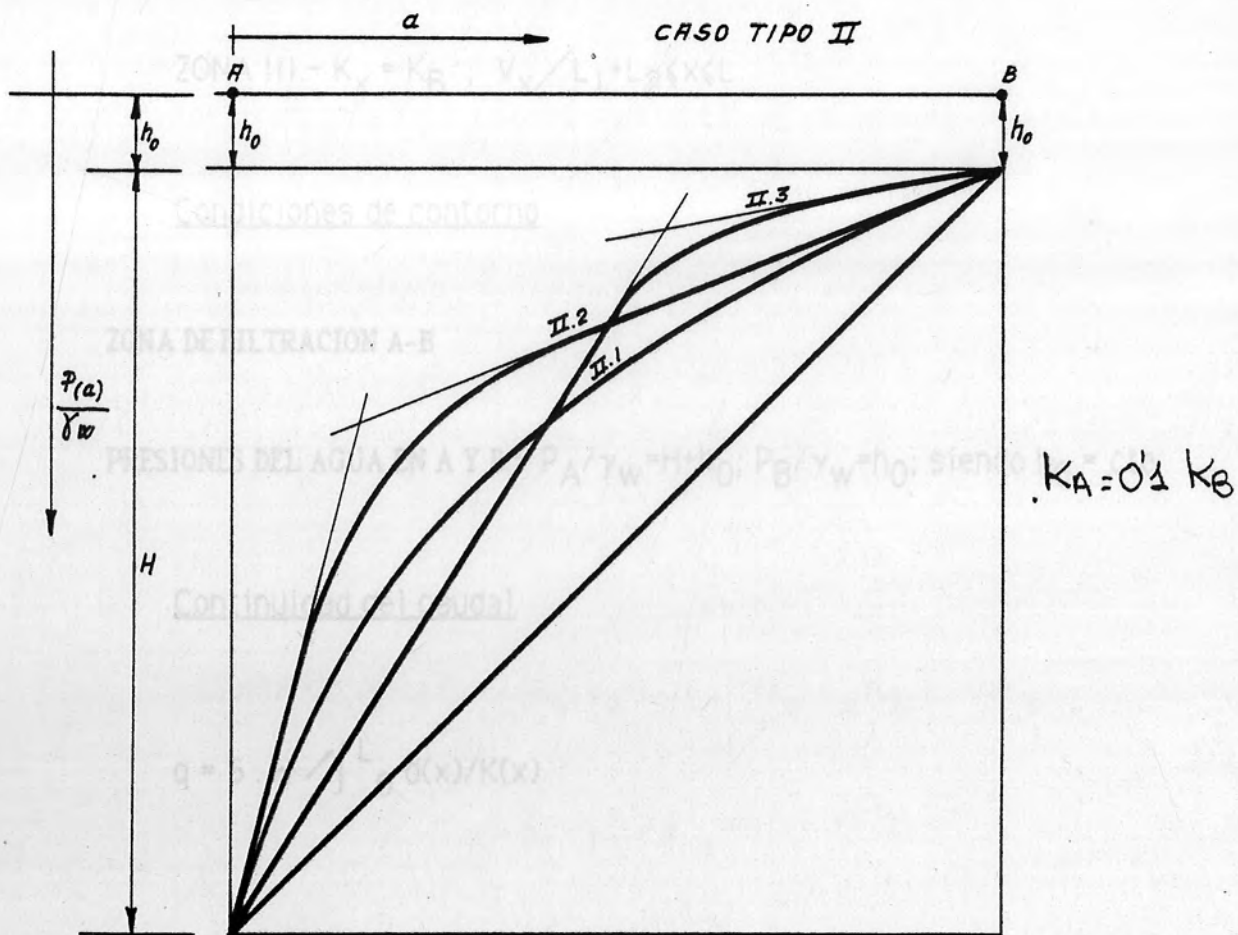


Figura 20.2

B.6.3.- Distribución de permeabilidades no lineales

B.6.3.1.- Permeabilidades constantes K_A y K_B aguas arriba y aguas abajo de la zona de filtración y permeabilidad no lineal en la zona intermedia

Aplicación de las condiciones generales de filtración a la distribución de permeabilidades expresada en la figura

Esquema general (condiciones de contorno igual a B.6.2.1. y B.6.2.2).

$$\text{ZONA I.- } K_x = K_A; V_x / 0 \leq x \leq L_1$$

$$\text{ZONA II.- } K_x \quad ; V_x / L_1 \leq x \leq L_1 + L_2$$

$$\text{ZONA III.- } K_x = K_B; V_x / L_1 + L_2 \leq x \leq L$$

Condiciones de contorno

ZONA DE FILTRACION A-B

PRESIONES DEL AGUA EN A Y B.- $P_A/\gamma_w = H + h_0$; $P_B/\gamma_w = h_0$; siendo $h_0 = \text{cte.}$

Continuidad del caudal

$$q = S \cdot H \int_0^L dx/K(x)$$

Expresiones de la presión en un punto

$$P_x/\gamma_w = (H+h_0)-H \cdot \left[\int_0^x dx/K(x) \right] / \left[\int_0^L dx/K(x) \right]$$

Aplicación de las condiciones generales de filtración a la distribución de permeabilidades expresada en la figura

Nomenclatura

-Relación de permeabilidad $K_A/K_B = \alpha$

-Permeabilidad equivalente

$$K_e(A-B) = L \left/ \int_0^L dx/K(x) \right. = L \left/ \left[L_1/K_A + L_3/K_B + \int_{L_1}^{L_1+L_2} dx/K(x) \right] \right.$$

-Permeabilidad equivalente $K_e(1-2) = L_2 \left/ \int_{L_1}^{L_1+L_2} dx/K(x) \right. = K_C$

-Factor de distribución de presiones

$$f = \int_0^x dx/K(x) \left/ \int_0^L dx/K(x) \right.$$

-Llamando: $\beta_I = L_1/L \cdot 1/K_A$; $\beta_{II} = L_2/L \cdot 1/K_C$; $\beta_{III} = L_3/L \cdot 1/K_B$;

$$\beta = \beta_I + \beta_{II} + \beta_{III}$$

Condición y expresando $K(x)$ en el intervalo $L_1 \leq x \leq L_1 + L_2$ en función de la variable $a = (x - L_1)/L_2$, se tiene:

Continuidad para $a = 0$ $K(a) = K_A$; para $a = 1$ $K(a) = K_B$

$$*K_e(1-2) = K_C = 1 / \int_0^1 da / K(a) ;$$

Continuidad de caudal: $K_A \cdot dP(a)/\gamma_w(a=0) / da =$

$$K_e(A-B) = L / [L_1/K_A + L_2/K_C + L_3/K_B] = 1/\beta$$

$$= K_B \cdot dP(a)/\gamma_w(a=1) / da = K(a) \cdot dP(a)/\gamma_w / da$$

*Factor de distribución de presiones, TRAMO I ; $f_I = \beta_I / \beta$

$K(a) = K_A \cdot dP(a)/da(a=0) / dP(a)/da$, TRAMO II ; $f_{II} = \beta_{II} / \beta$

TRAMO III ; $f_{III} = \beta_{III} / \beta$

siendo Presiones en puntos significativos

PUNTO A, aguas arriba de la zona de filtración: $P_A / \gamma_w = H + h_0$

PUNTO 1, final zona I con permeabilidad K_A : $P_1 / \gamma_w = H(1 - \beta_I / \beta) + h_0$

Funciones auxiliares para representar la distribución de presiones $P(a)$

PUNTO 2, comienzo de la zona III K_B : $P_2 / \gamma_w = H \cdot \beta_{III} / \beta + h_0$

PUNTO B, aguas abajo de la zona de filtración: $P_B / \gamma_w = h_0$ del tramo II,

definida a través de una función $f(a)$ de la forma

$$P(a) = (P_1 - P_2) f(a) + P_2$$

Condiciones que ha de cumplir la distribución de permeabilidades $K(a)$ en la zona II por continuidad de la ley de distribución de presiones $P(a)$

Condiciones de contorno

Contorno: para $a = 0$ $K(a) = K_A$; para $a = 1$ $K(a) = K_B$

para $a = 0$; $f(a) = 0$

Continuidad de caudal: $K_A \cdot d.P(a)/\gamma_w(a=0) / da =$

$= K_B \cdot d.P(a)/\gamma_w(a=1) / da = K(a) \cdot d.P(a)/\gamma_w / da$ tramo II

$K(a) = K_A \cdot d.P(a)/da.(a=0) / d.P(a)/da;$

siendo $d.P(a)/da.(a=1) = \alpha \cdot d.P(a)/da.(a=0)$

Con estas condiciones impuestas a $f(a)$ los valores de la
y el valor de $K_e(1-2) = K_c = 1 / \int_0^1 da/K(a) =$
distribución de permeabilidades que se corresponden con la distribución
de presiones ajustada en el tramo II
 $= K_A \cdot d.P(a)/da.(a=0) / (P_1 - P_2)$

Funciones auxiliares para representar la distribución de presiones $P(a)$ en un punto del tramo II

El caudal de filtración entre los puntos A y B, extremos de la

Si se supone la expresión de $P(a)$ en un punto del tramo II,
definida a través de una función $f(a)$ de la forma:

$$q/S = H/L \cdot K_A \cdot 1 / [(L_1/L) + (L_2/L \cdot 1/f(a)_{a=0}) + (L_3/L) \cdot \alpha]$$

$$P(a) = (P_1 + P_2) f(a) + P_2$$

y la distribución de presiones en el tramo II $P(a) = (P_1 - P_2) f(a) + P_2$

las condiciones que ha de cumplir $f(a)$, serán:

Condiciones de contorno

$$\text{para } a = 0 ; f(a) = 0 ;$$

$$\text{para } a = 1 ; f(a) = 1 ; f'(a)_{(a=1)} = \alpha \cdot f'(a)_{(a=0)}$$

Condiciones de decrecimiento y valores máximos posibles en el tramo II

$$P_1 \leq P(a) \leq P_2 \rightarrow 0 \leq f(a) \leq 1 \quad \forall a$$

$$dP(a)/da \leq 0 \rightarrow f'(a) < 0 \quad \forall a$$

Con estas condiciones impuestas a $f(a)$ los valores de la distribución de permeabilidades que se corresponden con la distribución de presiones ajustada en el tramo II vendrían expresadas por:

$$K(a) = K_A \cdot f'(a)_{(a=0)} / f'(a) ; K_{e1-2} = K_C = K_A \cdot f'(a)_{(a=0)}$$

El caudal de filtración entre los puntos A y B, extremos de la zona total de filtración, sería:

$$q/S = H/L \cdot K_A \cdot 1 / \left[(L_1/L) + (L_2/L \cdot 1/f'(a)_{a=0}) + (L_3/L) \cdot \alpha \right]$$

y la distribución de presiones en el tramo II $P(a) = (P_1 - P_2) f(a) + P_2$

w) Si se expresa la distribución de presiones en la zona II, por medio de una función de la forma:

Algunas expresiones posibles de la distribución de presiones en la zona intermedia (II) correspondientes con distribuciones de permeabilidad tipo

se tiene:

(I) Distribución de permeabilidades constante $\rightarrow f(a) = a$

(II) Distribución de permeabilidades lineal

$$\rightarrow f(a) = L_n[1 - a(1 - 1/\alpha)] / L_n(1/\alpha)$$

(III) Distribución lineal de la inversa de las permeabilidades

$$\rightarrow f(a) = a/(\alpha + 1) \cdot [2 - a(1 - \alpha)]$$

$$1/K(a) = (1 - (1 - \alpha))a / K_A$$

(IV) Distribución de permeabilidades del tipo

$$K_A / [\alpha a^{S-1} + (1-a)^{r-1}]$$

w) Si se expresa la distribución de presiones en la zona II, por medio de una función de la forma:

$$f(a) = A \cdot a^S + (1-A) \cdot (1-(1-a)^r); \text{ siendo } S \text{ y } r > 0$$

se tiene:

$$f(a) = 0 \text{ para } a = 0 \text{ y } f(a) = 1 \text{ para } a = 1$$

si es:

$$f'(a) = d, \text{ para } a = 0; f'(a) = \alpha d, \text{ para } a = 1 \text{ si } \begin{cases} A = \alpha \cdot d / S = 1 - d/r \\ r \text{ y } S > 1 \end{cases}$$

$$f(a) = d \left[\frac{\alpha}{S} a^S + \left(\frac{1}{r} \right) (1 - (1-a)^r) \right]; 0 \leq f(a) \leq 1 \text{ si } S > d \alpha \text{ y } r > d$$

$$f'(a) = d \left[\alpha a^{S-1} + (1-a)^{r-1} \right] \geq 0 \text{ si } d \geq 0$$

$$K(a) = K_A \left[\frac{\alpha}{S} a^S + \left(\frac{1}{r} \right) (1 - (1-a)^r) \right]; K_{e1-2} = d \cdot K_A$$

$$P(a) = (P_1 - P_2) \cdot \left(\frac{\alpha}{S} a^S + \left(\frac{1}{r} \right) (1 - (1-a)^r) \right) + P_2$$

$$q/Q = H/L \cdot K_A \cdot \frac{1}{\left[\left(\frac{l_1}{L} \right) + \left(\frac{l_2}{L} \right) \cdot \frac{1}{d} + \left(\frac{l_3}{L} \right) \alpha \right]}$$

FIGURA

ALGUNAS DISTRIBUCIONES POSIBLES

$$\text{Si } r=S; K(a) = K_A \sqrt{[\alpha(a^{S-1}) + (1-a)^{S-1}]}; K_{e1-2} = K_A \cdot S/\alpha + 1$$

$$P(a) = (P_1 - P_2) \cdot [1 - (1/\alpha + 1)(\alpha \cdot a^S + [1 - (1-a)^S])] + P_2$$

$$q/\Omega = H/L \cdot K_A \cdot 1 / [1 - (1/3)(1-\alpha) \cdot (1/2)(1 - (1+\alpha)/S)]$$

por ejemplo: $r = S = 5$

$r = S = 3$

$\alpha = 0,1 \dots$ Curva 1

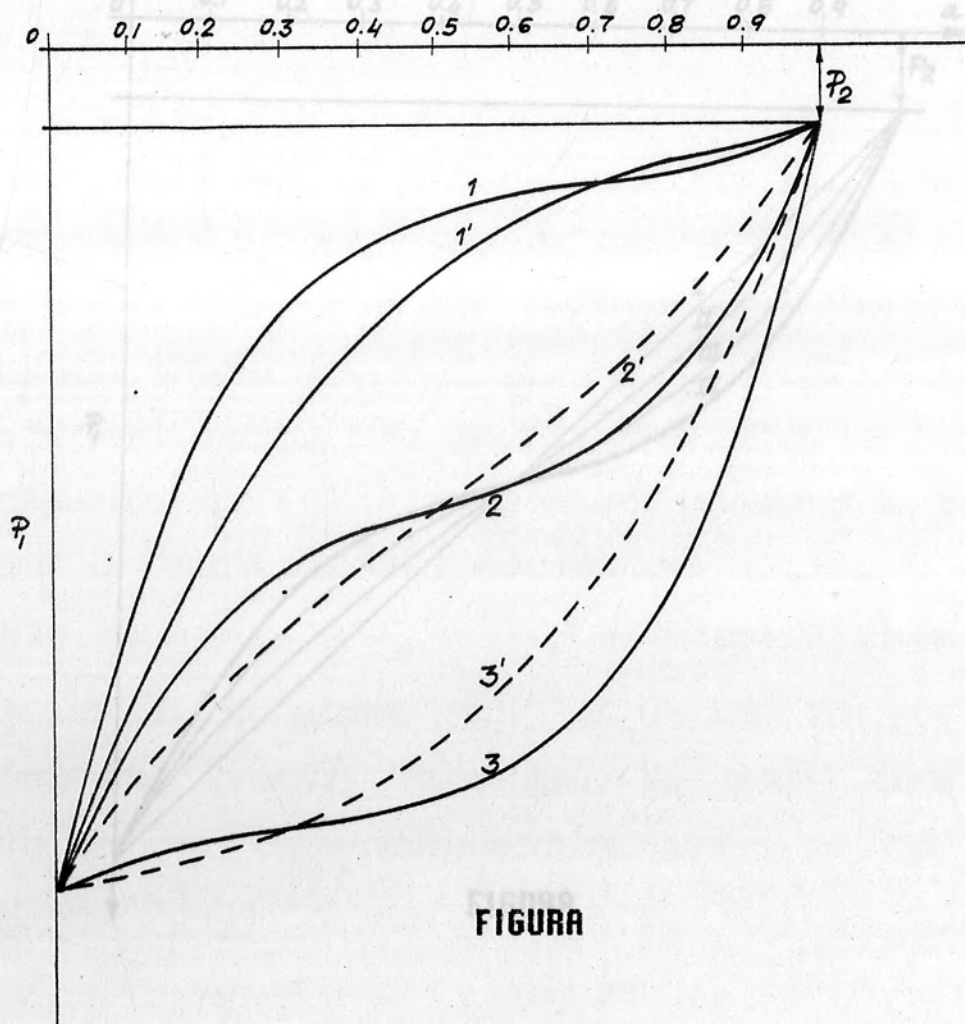
$\alpha = 0,1 \dots$ Curva 1'

$\alpha = 1,0 \dots$ Curva 2

$\alpha = 1,00 \dots$ Curva 2'

$\alpha = 10,0 \dots$ Curva 3

$\alpha = 10,00 \dots$ Curva 3'



FIGURA

B.7.- Si $\alpha=1$; $r=S$; $K(a) = K_A \cdot (a^{S-1} + (1-a)^{S-1})$; $K_{e1-2} = K_A \cdot S/2$

$$P(a) = (P_1 - P_2) \cdot 1/2 \cdot [(1-a)^S + (1-a^S)] + P_2$$

TENSION EFECTIVA-DEFORMABILIDAD

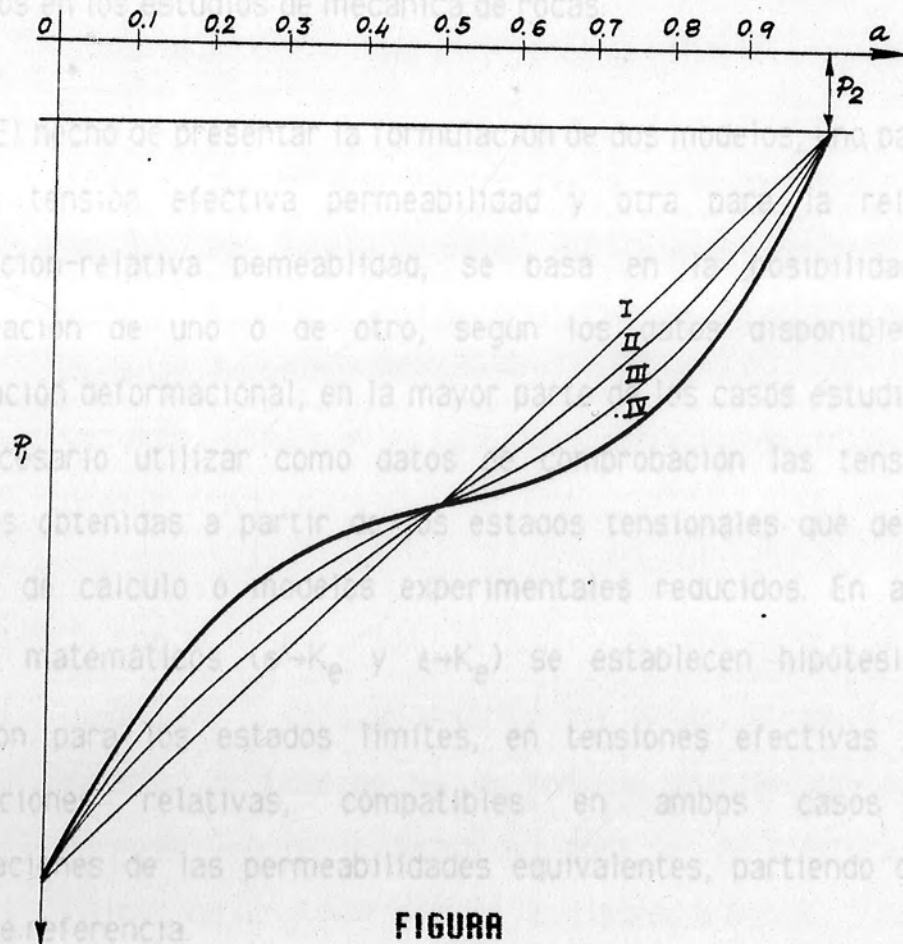
B.7.1.- Consideraciones generales $q/\Omega = H/1 \cdot K_A \cdot 1 \cdot [1 + (L_2/1)(2/S - 1)]$

representación para $r = S = 2$ Curva I

$r = S = 3$ Curva II

$r = S = 4$ Curva III

$r = S = 5$ Curva IV



FIGURA

B.7.- MODELOS MATEMATICOS DE RELACION EN UN PUNTO

TENSION EFECTIVA-PERMEABILIDAD EQUIVALENTE

TENSION EFECTIVA-DEFORMABILIDAD

B.7.1.- Consideraciones generales

Para caracterizar la forma de modificación de la permeabilidad equivalente en un punto, se presentan en los epígrafes B.7.1 y B.7.2, dos modelos matemáticos basados en formas exponenciales de comportamiento ($\epsilon' \rightarrow K_e$ y $\xi \rightarrow K_e$). Se visualiza en estos modelos, la correspondencia entre la extensión/compresión de discontinuidades, y los parámetros de comportamiento tensión-deformación habitualmente utilizados en los estudios de mecánica de rocas.

El hecho de presentar la formulación de dos modelos, uno para la relación tensión efectiva permeabilidad y otra para la relación deformación-relativa permeabilidad, se basa en la posibilidad de comprobación de uno ó de otro, según los datos disponibles de auscultación deformacional; en la mayor parte de los casos estudiados, será necesario utilizar como datos de comprobación las tensiones efectivas obtenidas a partir de los estados tensionales que definen modelos de cálculo ó modelos experimentales reducidos. En ambos modelos matemáticos ($\epsilon' \rightarrow K_e$ y $\xi \rightarrow K_e$) se establecen hipótesis de definición para los estados límites, en tensiones efectivas ó en deformaciones relativas, compatibles en ambos casos con modificaciones de las permeabilidades equivalentes, partiendo de un estado de referencia.

B.7.2.-Modelo matemático de relación tensión efectiva/permeabilidad equivalente en un punto

El modelo matemático que se presenta, introduce las siguientes hipótesis de comportamiento de las discontinuidades del punto, como respuesta a las variaciones de tensión efectiva:

a) Tomando como origen un valor de $\sigma' = \sigma'_0$, el incremento de tensión efectiva por compresión exterior ó disminución de la presión del agua interior, produce una modificación de la permeabilidad equivalente en el punto. La permeabilidad disminuye por efecto de cierre de las fisuras vacías y compresión de las fisuras rellenas de material permeable.

Este efecto de disminución de la permeabilidad se puede suponer que tiene a un estado límite en el que el cierre de fisuras vacías y la fuerte compresión de las discontinuidades rellenas, hacen que la disminución de permeabilidad sea cada vez más pequeña en los sucesivos intervalos de incremento de presión efectiva.

b) Si con el mismo origen de estado de referencia $\sigma' = \sigma'_0$, se disminuye la tensión efectiva por efecto de decompresión, exterior o aumento de la presión interior del agua, la permeabilidad en el punto aumenta por la apertura de las fisuras vacías y extensión de las fisuras rellenas.

Este aumento de permeabilidad, a partir de un estado de referencia, tenderá a ser progresivamente creciente a medida que las fisuras vacías van aumentando su apertura e incluso es previsible que se lleguen a formar nuevas fisuras vacías por tracción del material de relleno de algunas discontinuidades.

Estas variaciones de tensión efectiva-permeabilidad equivalente en un punto, se expresan de forma continua mediante una relación $\sigma' \leftrightarrow k_e$ de tipo exponencial.

Para reflejar mediante una modelización matemática los estados límites de permeabilidad en un punto, es necesario suponer la existencia de dos valores de tensión efectiva que agotan la validez de esta ley exponencial.

Un primer valor sería, la tensión efectiva máxima a efectos de permeabilidad, que representa un estado límite de compresión, a partir de un estado de referencia. Para este estado límite, la permeabilidad equivalente tiene un valor mínimo, no modificable por efecto de incremento de la tensión efectiva. A este valor teórico que limita en un punto la ley $\sigma' \leftrightarrow k_e$, se le designará como σ'_l .

El valor de referencia σ'_0 tomado arbitrariamente, en realidad

Un segundo valor sería, la tensión efectiva mínima a efectos de permeabilidad que representa un límite de tracción, con respecto a un estado de referencia. La permeabilidad equivalente crece de forma muy rápida para valores de tensión efectiva próximos a este límite de

tracción. A este valor teórico que corresponde a un comportamiento asintótico de la permeabilidad, se le designará con σ'_{II} .

La figura 21, expresa gráficamente las condiciones básicas para la formulación matemática del modelo.

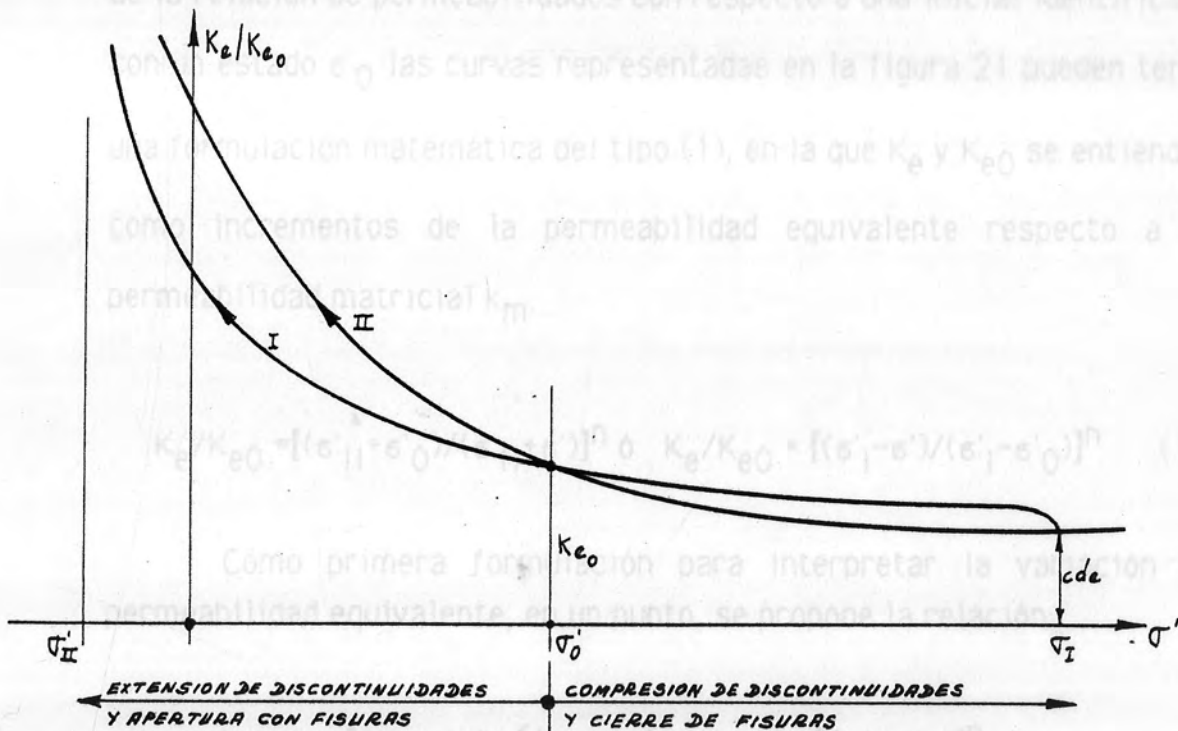


FIGURA 21

El valor de referencia σ'_0 tomado arbitrariamente, en realidad supone una situación tensional de equilibrio a partir de la cual predomina la extensión ó compresión de discontinuidades y por tanto, representa un hecho físico relacionado con la historia tensional en el punto ó zona que se analiza. Se puede tomar su valor, como comparación

cuando los sucesivos procesos de carga y descarga indiquen en el tiempo, que es un estado tensional repetitivo, a partir del cual las dimensiones de las discontinuidades tienden a aumentar o disminuir siguiendo una sistemática continua.

Manteniendo la idea de crecimiento/decrecimiento exponencial de la relación de permeabilidades con respecto a una inicial identificada con un estado σ'_0 las curvas representadas en la figura 21 pueden tener una formulación matemática del tipo (1), en la que K_e y K_{e0} se entienden como incrementos de la permeabilidad equivalente respecto a la permeabilidad matricial k_m .

$$K_e/K_{e0} = [(\sigma'_{II} + \sigma'_0)/(\sigma'_{II} + \sigma')]^n \text{ ó } K_e/K_{e0} = [(\sigma'_I - \sigma')/(\sigma'_I - \sigma'_0)]^n \quad (1)$$

Como primera formulación para interpretar la variación de permeabilidad equivalente, en un punto, se propone la relación:

$$K_e = K_{e0} [(\sigma'_{II} + \sigma'_0) / (\sigma'_{II} + \sigma')] \cdot (\sigma'_I - \sigma') / (\sigma'_I - \sigma'_0)]^n \rightarrow$$

$$-\sigma'_{II} \leq \sigma' \leq \sigma'_I; \quad n > 0$$

Valores característicos

$$a) \quad dk_e/d\sigma' = -K_e \cdot n \cdot (\sigma'_I + \sigma'_{II}) / (\sigma'_{II} + \sigma')(\sigma'_I - \sigma')$$

y haciendo $d^2k_e/d\sigma' = k_e \cdot n^2 [(\sigma'_I + \sigma'_{II})^2 / (\sigma'_{II} + \sigma')^2 (\sigma'_I - \sigma')^2] [1 + (\sigma'_I - \sigma'_{II} - 2\sigma') / n(\sigma'_I + \sigma'_{II})]$

-Para $\sigma' = -\sigma'_{II}$; $k_e \rightarrow +\infty$; $dk_e/d\sigma' \rightarrow -\infty$

-Para $\sigma' \rightarrow \sigma'_I$; $k_e \rightarrow 0$ $dk_e/d\sigma' \rightarrow 0$ si $n > 1$

$dk_e/d\sigma' \rightarrow -k_{e0} \cdot \sigma'_0 + \sigma'_{II} / (\sigma'_I - \sigma'_0)(\sigma'_I + \sigma'_{II})$ si $n=1$

$dk_e/d\sigma' \rightarrow -\infty$ si $n < 1$

Suponiendo $\sigma'_I = \alpha \cdot \sigma'_{II}$ y tomando como permeabilidad de referen-

cia k_{e0} . b) Punto de cambio de curvatura (sólo posible si $n < 1$) la expresión de k_e/k_{e0} será:

$$\sigma'_{C.C} = [(n+1)\sigma'_I + \sigma'_{II}(n-1)] / 2$$

suponiendo $\sigma'_I = \alpha \cdot \sigma'_{II}$, la tensión efectiva para la que se produce un cambio de curvatura si $0 < n < 1$, será:

$$\sigma'_{C.C} = \sigma'_{II} [(n+1)\alpha + (n-1)] / 2$$

Tomando esta tensión efectiva como referencia ($\sigma'_0 = \sigma'_{C.C}$), la expresión de k_e/k_{e0} será:

$$k_e/k_{e0} = [(\sigma'_I - \sigma') / (\sigma'_{II} + \sigma')] \cdot (n+1) / (1-n)^n$$

y haciendo $\sigma'_I = \alpha \cdot \sigma'_{II}$

$$K_e/K_{e0} = [(\alpha - \sigma'/\sigma'_{II}) / (1 + \sigma'/\sigma'_{II})]^{(n+1)/(1-n)^n}$$

siendo K_{e0} la permeabilidad equivalente para la tensión efectiva correspondiente al punto de cambio de curvatura.

c) Si $n > 1$, no existe cambio de curvatura

Suponiendo $\sigma'_I = \alpha \cdot \sigma'_{II}$ y tomando como permeabilidad de referencia K_{e0} , la correspondiente a la tensión efectiva $[\sigma'_{II} - \sigma'_{II}]/2$ la expresión de K_e/K_{e0} será:

$$K_e/K_{e0} = [(\sigma'_I - \sigma')/(\sigma'_{II} + \sigma')]^n = [(\alpha - \sigma'/\sigma'_{II}) / (1 + \sigma'/\sigma'_{II})]^n$$

En la figura 22 se representan los valores K_e/K_{e0} para $n=1/3$; $n=1/2$ habiendo tomado para la representación $\alpha=10$ y como permeabilidad de referencia la correspondiente al cambio de curvatura.

En la figura 23 se representan los valores K_e/K_{e0} para $n = 1,00$, 1,25, 1,50 y 2,00 habiendo tomado $\alpha=10$ y K_{e0} la correspondiente a la tensión efectiva $[\sigma'_I - \sigma'_{II}]/2$.

En la figura 24 se representan los valores k_e/k_{e0} para $n = 1/3$, $1/2$, 1 y $1,25$ habiendo tomado $\alpha = 10$ y k_{e0} una permeabilidad de referencia supuesta igual para todos los valores de n y correspondiente a la tensión efectiva $\sigma' = 2\sigma'_{II}$.

Como simplificación de la expresión, si se supone que $\sigma'_I \gg \sigma'$ y σ'_0 , es decir, si el intervalo de tensiones efectivas que se analizan, corresponden a valores mucho menores de los que se asignan a la permeabilidad 0, la expresión (A) tiende a la (A₁). Si el intervalo de presiones efectivas que se analizan corresponden a tensiones muy superiores a σ'_{II} la expresión A tiende a la A₂.

$$k_e/k_{e0} = [(\sigma'_{II} + \sigma'_0)/(\sigma'_{II} + \sigma') \cdot (\sigma'_I - \sigma')/(\sigma'_I - \sigma'_0)]^n \quad -\sigma'_{II} \leq \sigma' \leq \sigma'_I \quad (A)$$

$$\text{Si } \sigma'_I \gg \sigma' \text{ y } \sigma'_0: k_e/k_{e0} = [(\sigma'_{II} + \sigma'_0)/(\sigma'_{II} + \sigma')]^n; \quad (A_1)$$

$$\text{Si } \sigma' \text{ y } \sigma'_0 \gg \sigma'_{II}: k_e/k_{e0} = [(\sigma'_I - \sigma'_0)/(\sigma'_I - \sigma')]^n \quad (A_2)$$

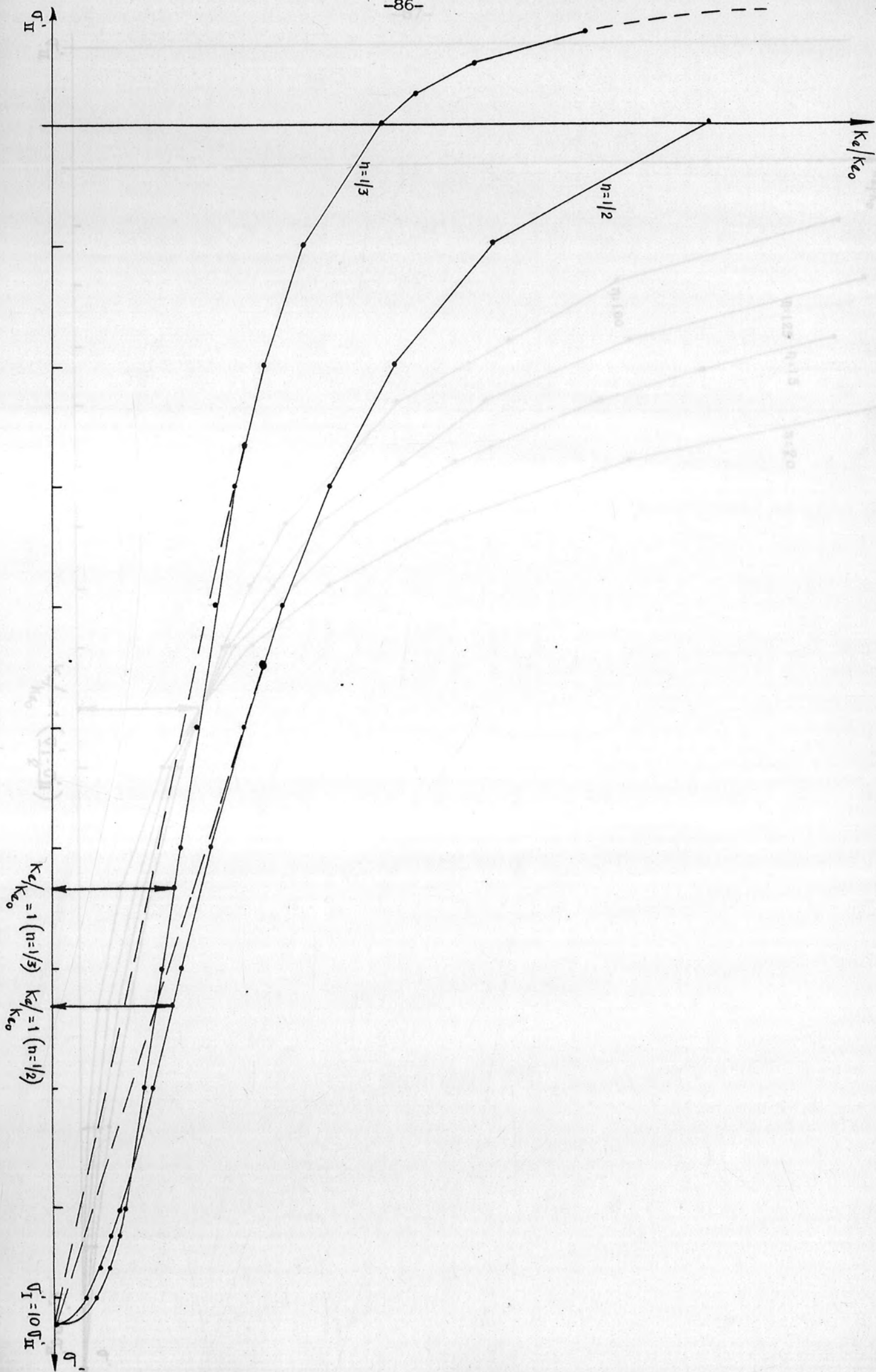


FIGURA 22

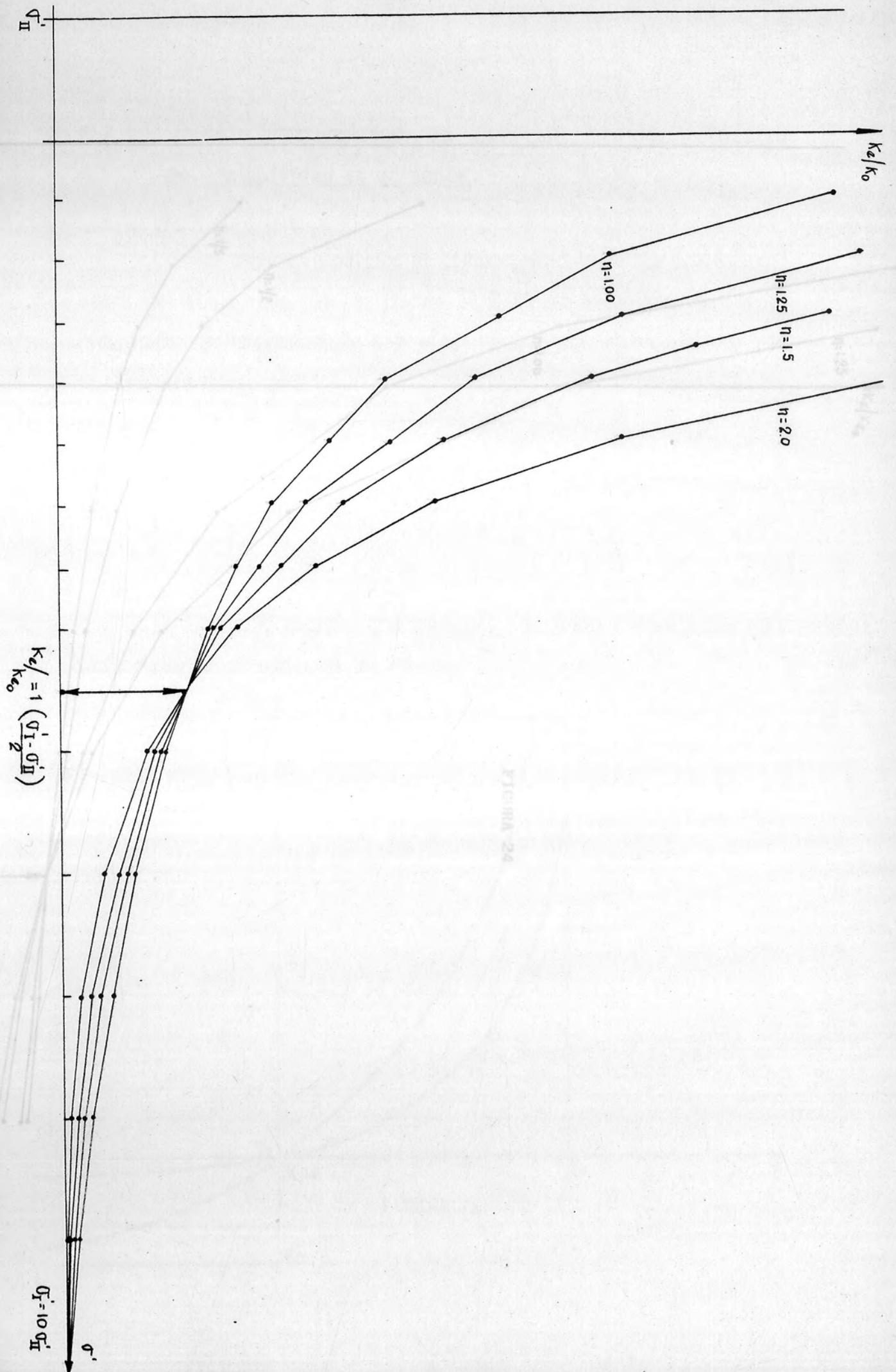
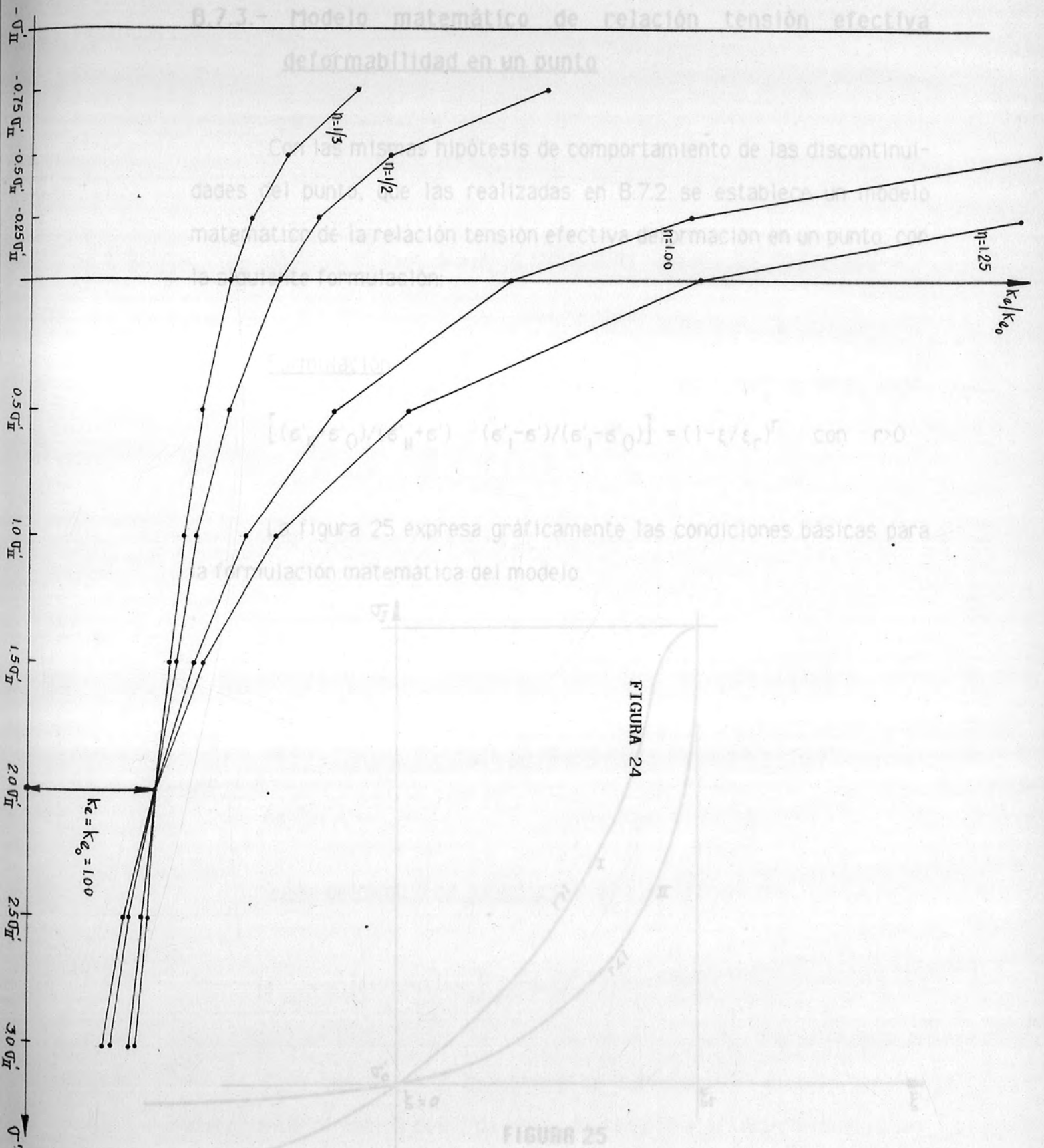


FIGURA 23

FIGURA 24



B.7.3.- Modelo matemático de relación tensión efectiva deformabilidad en un punto

Con las mismas hipótesis de comportamiento de las discontinuidades del punto, que las realizadas en B.7.2 se establece un modelo matemático de la relación tensión efectiva deformación en un punto, con la siguiente formulación:

Formulación

$$\left[(\epsilon'_{II} + \epsilon'_0) / (\epsilon'_{II} + \epsilon') \cdot (\epsilon'_I - \epsilon') / (\epsilon'_I - \epsilon'_0) \right] = (1 - \xi / \xi_r)^r \quad \text{con } r > 0$$

valores de las derivadas

La figura 25 expresa gráficamente las condiciones básicas para la formulación matemática del modelo.

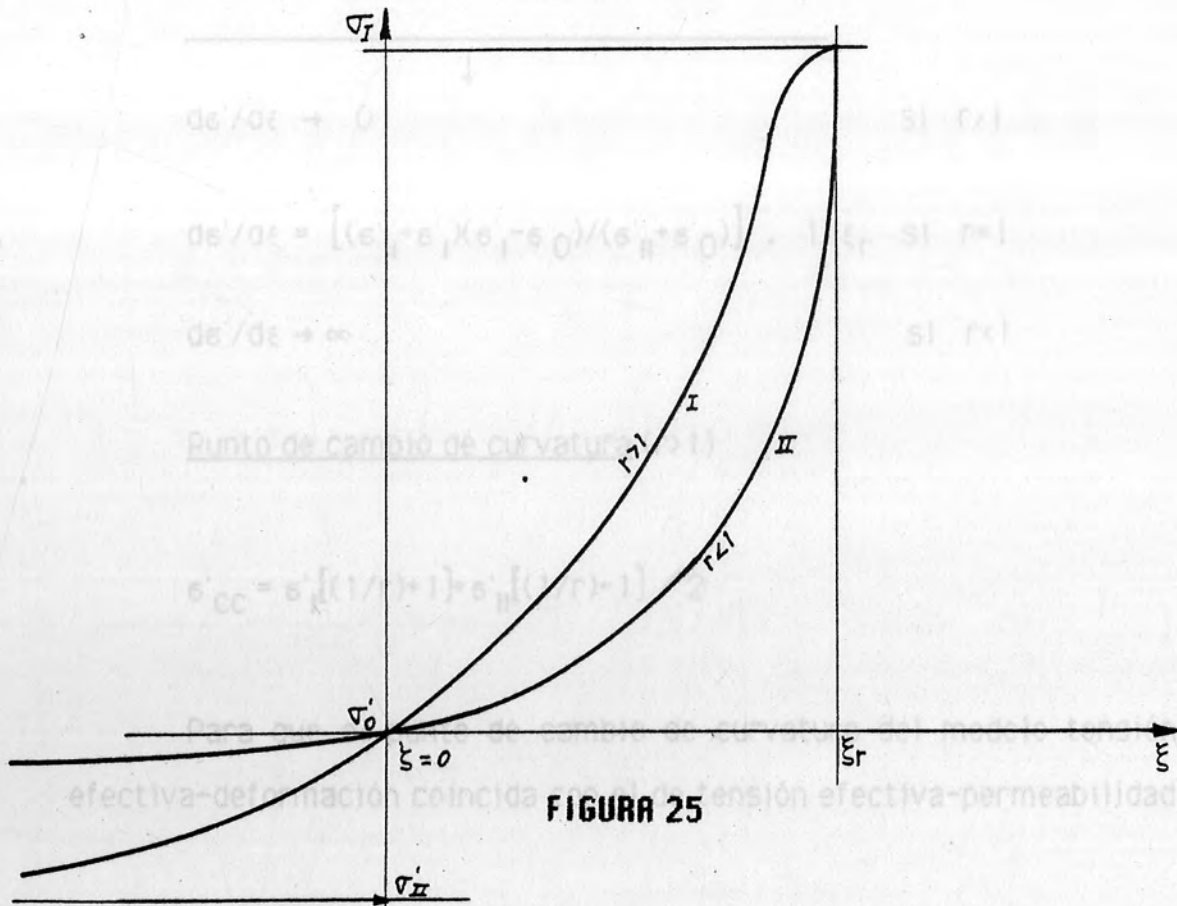


FIGURA 25

Valores característicos

-para $\xi \rightarrow \xi_r$; $\epsilon' \rightarrow \epsilon'_l$

-para $\xi \rightarrow -\infty$; $\epsilon' \rightarrow -\epsilon'_{II}$

-para $\xi \rightarrow 0$; $\epsilon' \rightarrow \epsilon'_0$

$$d\epsilon'/d\xi = r \cdot [(\epsilon'_l - \epsilon')(\epsilon'_{II} + \epsilon')/(\epsilon'_{II} + \epsilon'_l)] \cdot 1/\xi_r \cdot 1/(1 - \xi/\xi_r)$$

$$d^2\epsilon'/d\xi^2 = r \cdot [(\epsilon'_l - \epsilon')(\epsilon'_{II} + \epsilon')/(\epsilon'_{II} + \epsilon'_l)(\xi_r - \xi)^2] \cdot [1 + r \cdot (\epsilon'_l - \epsilon'_{II} - 2\epsilon')/(\epsilon'_l + \epsilon'_{II})]$$

Valores de las derivadas

-para $\xi \rightarrow -\infty$; $\epsilon' = -\epsilon'_{II}$; $d\epsilon'/d\xi \rightarrow 0$

-para $\xi \rightarrow \xi_r$; $\epsilon' = \epsilon'_l$;

$$d\epsilon'/d\xi \rightarrow 0$$

$$d\epsilon'/d\xi = [(\epsilon'_{II} + \epsilon'_l)(\epsilon'_l - \epsilon'_0)/(\epsilon'_{II} + \epsilon'_0)] \cdot 1/\xi_r \quad \text{si } r=1$$

$$d\epsilon'/d\xi \rightarrow \infty$$

$$\text{si } r < 1$$

Punto de cambio de curvatura ($r > 1$)

$$\epsilon'_{cc} = \epsilon'_l [(1/r) + 1] + \epsilon'_{II} [(1/r) - 1] / 2$$

Para que el punto de cambio de curvatura del modelo tensión efectiva-deformación coincida con el de tensión efectiva-permeabilidad

equivalente, presentado en el epígrafe B.7.2 sería necesario que se cumpliera la relación $n = 1/r$, siendo la formulación conjunta de ambos modelos.

referencia el correspondiente a la tensión efectiva $\sigma'_R = (\sigma'_I + \sigma'_{II})/2$ para la cual se considera $k_e = k_{e0}$ y $\xi = 0$, habiendo tomado como valores de

$$k_e/k_{e0} = [(\sigma'_{II} + \sigma'_0)/(\sigma'_{II} + \sigma') \cdot (\sigma'_I - \sigma')/(\sigma'_I - \sigma'_0)]^n = (1 - \xi/\xi_r)^r$$

siendo k_{e0} la permeabilidad de referencia tomada para una tensión efectiva $\sigma' = \sigma'_0$ en la que se considera el valor $\xi = 0$.

analizar, corresponden a valores mucho menores que σ' , la expresión

general Si el modelo de relación k_e/k_{e0} es de la forma $k_e/k_{e0} = (1 - \xi/\xi_r)^s$

los puntos de curvatura de ambas leyes, no coinciden y la diferencia de tensión efectiva para la que se producen es:

$$\sigma'_{cc1} = \sigma'_I [(1/r) + 1] + \sigma'_{II} [(1/r) - 1] / 2 \quad (\text{cambio de curvatura } \sigma' \rightarrow \xi)$$

$$\sigma'_{cc2} = [\sigma'_I (n+1) + \sigma'_{II} (n-1)] / 2 \quad (\text{cambio de curvatura } \sigma' \rightarrow k)$$

$$\sigma'_{cc1} - \sigma'_{cc2} = \sigma'_I [(1/r) - n] + \sigma'_{II} [(1/r) - n] / 2$$

$$\sigma'_{cc1} - \sigma'_{cc2} = [(\sigma'_I + \sigma'_{II})/2] \cdot [(1/r) - n] \quad \text{y siendo } r = s/n$$

$$\sigma'_{cc1} - \sigma'_{cc2} = (\sigma'_I + \sigma'_{II}/2) n(1 - S/S)$$

La figura 26, representa los valores k_e/k_{e0} y ξ/ξ_r , habiendo tomado para la representación $\alpha = (\sigma'_I/\sigma'_{II}) = 10$ y como estado de referencia el correspondiente a la tensión efectiva $\sigma'_R = (\sigma'_I - \sigma'_{II})/2$ para la cual se considera $k_e = k_{e0}$ y $\xi = 0$, habiendo tomado como valores de los parametros: $S=3$; $n=1/3$; $r=9$.

Como simplificación de la expresión general, si se supone que $\sigma'_I \gg \sigma'$ y σ'_0 , es decir, si el intervalo de presiones efectivas que se analizan, corresponden a valores mucho menores que σ'_I , la expresión general se puede sustituir por la B_1 . Si el intervalo de presiones efectivas que se analizan corresponden a tensiones muy superiores a σ'_{II} , la expresión general, tiende a la B_2 .

$$(\sigma'_{II} + \sigma'_0)/(\sigma' + \sigma'_{II}) = 1(1 - \xi/\xi_r)^r \quad \text{siendo } \sigma'_I \gg \sigma' \text{ y } \sigma'_0 \quad (B_1)$$

$$(\sigma'_I - \sigma'_0)/(\sigma'_I - \sigma'_0) = (1 - \xi/\xi_r)^r \quad \text{siendo } \sigma' \text{ y } \sigma'_0 \gg \sigma'_{II} \quad (B_2)$$

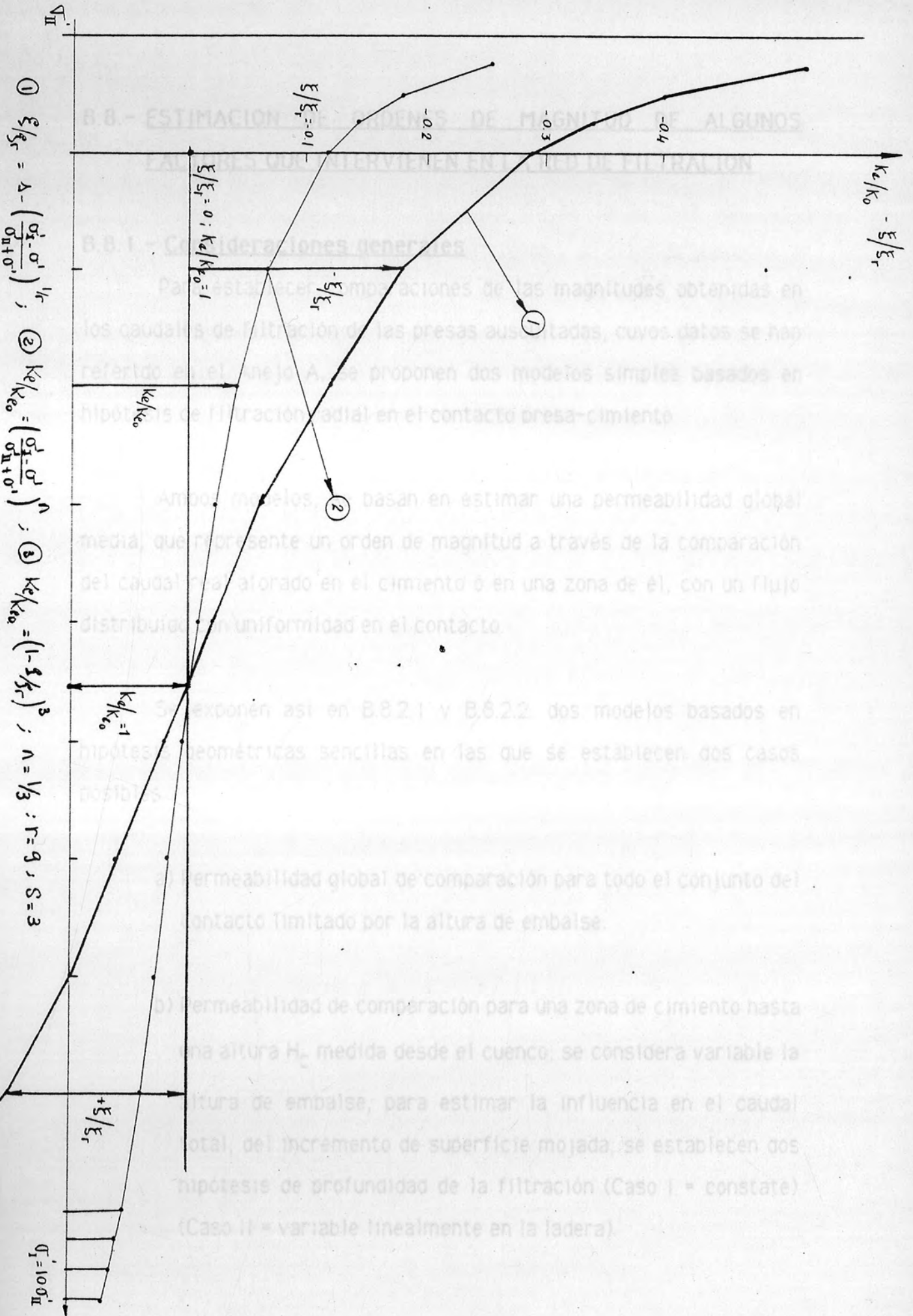


FIGURA 26

B.8.- ESTIMACION DE ORDENES DE MAGNITUD DE ALGUNOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN LA RED DE FILTRACION

B.8.1.- Consideraciones generales

Para establecer comparaciones de las magnitudes obtenidas en los caudales de filtración de las presas auscultadas, cuyos datos se han referido en el Anejo A, se proponen dos modelos simples basados en hipótesis de filtración radial en el contacto presa-cimiento.

Ambos modelos, se basan en estimar una permeabilidad global media, que represente un orden de magnitud a través de la comparación del caudal real aforado en el cimiento ó en una zona de él, con un flujo distribuido con uniformidad en el contacto.

Se exponen así en B.8.2.1 y B.8.2.2. dos modelos basados en hipótesis geométricas sencillas en las que se establecen dos casos posibles.

- a) Permeabilidad global de comparación para todo el conjunto del contacto limitado por la altura de embalse.
- b) Permeabilidad de comparación para una zona de cimiento hasta una altura H_c medida desde el cuenco; se considera variable la altura de embalse, para estimar la influencia en el caudal total, del incremento de superficie mojada; se establecen dos hipótesis de profundidad de la filtración (Caso I = constante) (Caso II = variable linealmente en la ladera).

B.8.2.- MODELOS SIMPLES DE FILTRACION EN EL CIMIENTO DE

En el epígrafe B.8.3. se adjuntan los resultados de las líneas de corriente y equipotenciales para la comparación de la red de filtración en dos supuestos: un primer supuesto de permeabilidad isotrópica homogénea en toda la superficie de filtración y un segundo supuesto, en el que zonalmente, para distintas profundidades, se toman permeabilidades isotrópicas variables, con valores de un orden decreciente con la profundidad.

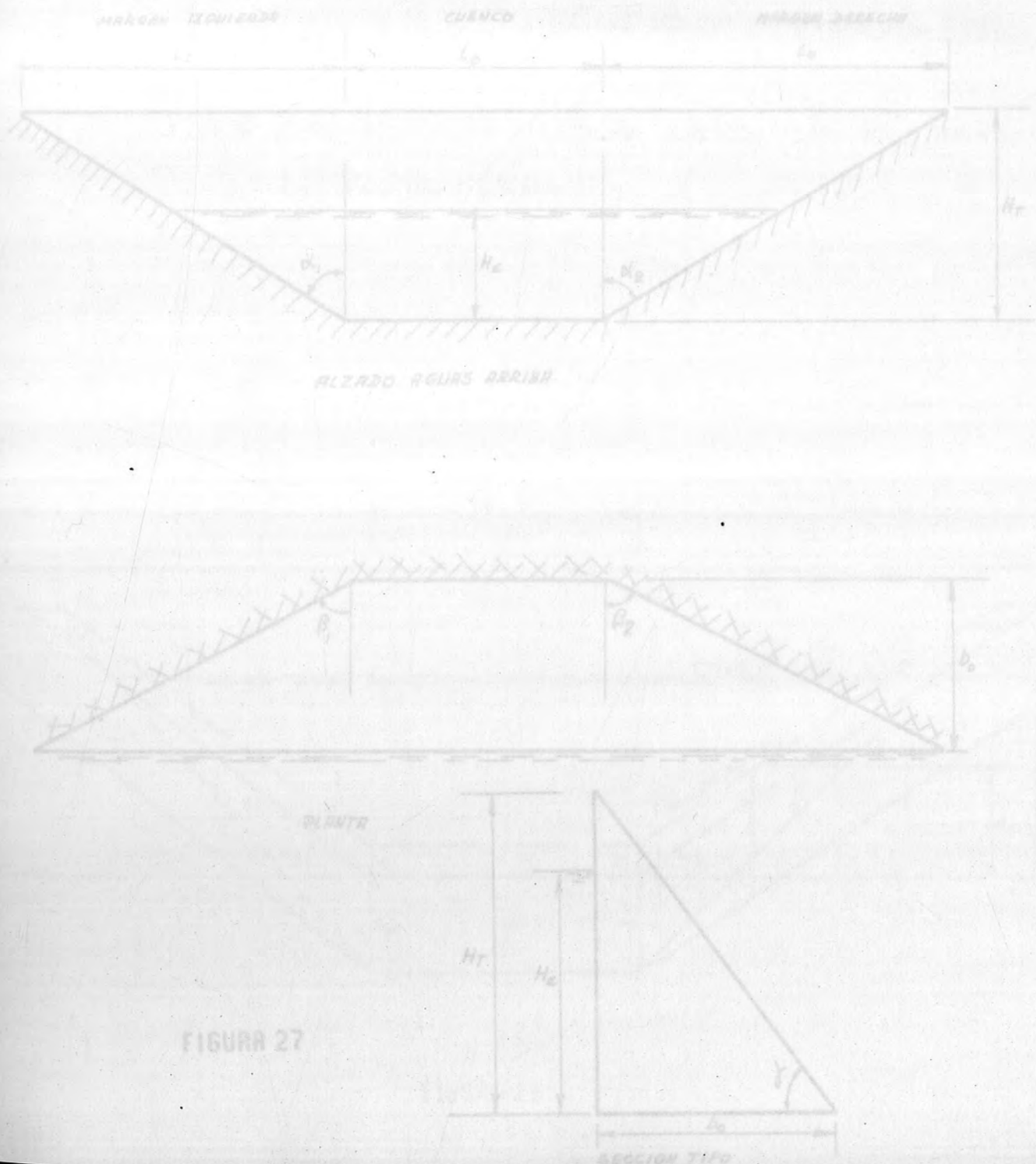
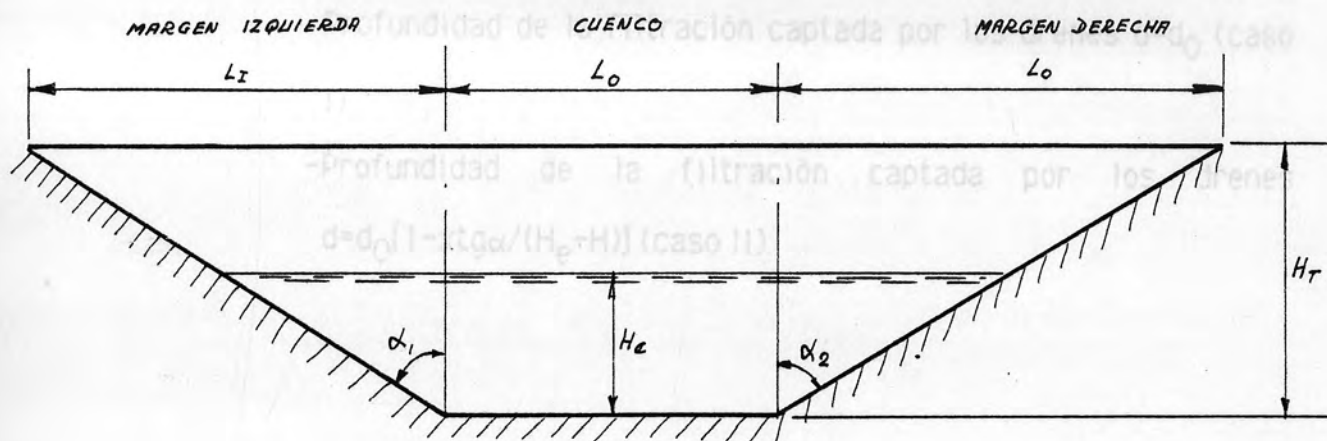


FIGURA 27

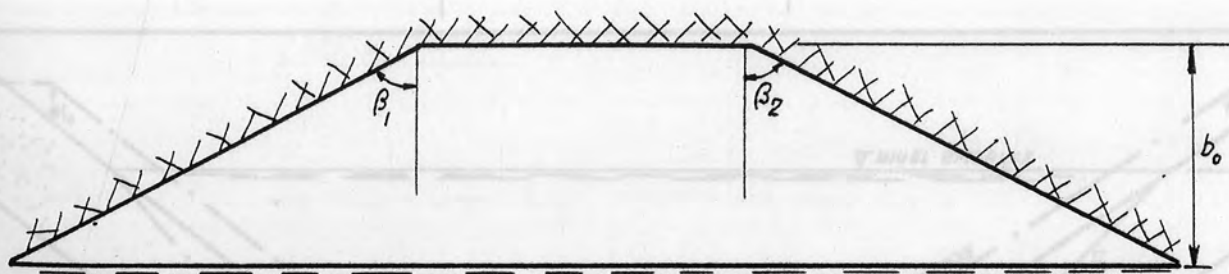
B.8.2.- MODELOS SIMPLES DE FILTRACION EN EL CIMIENTO DE UNA PRESA PARA ESTIMACION DEL ORDEN DE MAGNITUD DE LA PERMEABILIDAD MEDIA EQUIVALENTE EN UNA ZONA O EN EL CONJUNTO DEL CONTACTO

B.8.2.1.- Orden de magnitud de la permeabilidad en el contacto

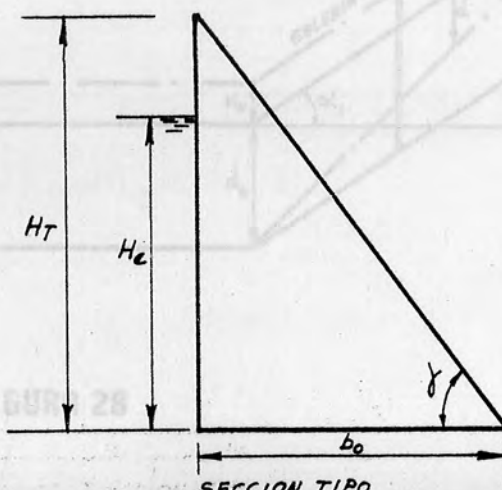
a) HIPOTESIS GEOMETRICAS - PRESA. SECCION TIPO TRIANGULAR



ALZADO. AGUAS ARRIBA



PLANTA



SECCION TIPO

FIGURA 27

FIGURA 28

b) Hipótesis de filtración

- Permeabilidad del cimiento, constante (K).
- Efecto pantalla constante: $U_A = B(H_e - H_c) + H_0$.
- Filtración radial en la cimentación con taladros de drenaje situados a distancia constante "C" del paramento aguas arriba.
- Profundidad de la filtración captada por los drenes $d = d_0$ (caso I).
- 1).
- Profundidad de la filtración captada por los drenes $d = d_0[1 - x \tan \alpha / (H_e - H)]$ (caso II).

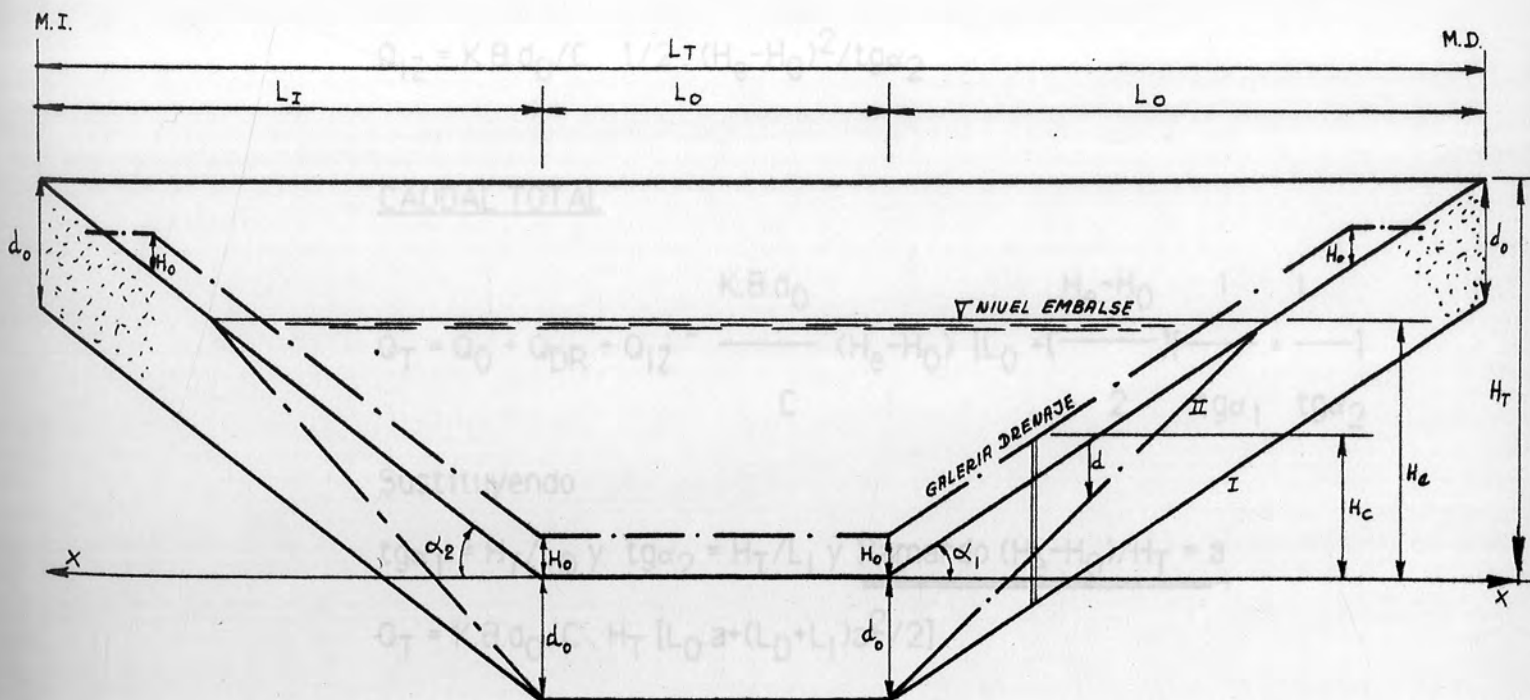


FIGURA 28

c) Expresiones matemáticas

Caudal. Zona del cuenco

$$Q_0 = B(H_e - H_0) \cdot K \cdot L_0 \cdot d_0 / C$$

$C \rightarrow$ distancia media de los taladros de drenaje al paramento

Caudal. Margen derecha

$$Q_{DR} = \int_0^{(H_e - H_0)/\tan \alpha_1} \frac{1}{C} \cdot K \cdot B \cdot d \cdot [(H_e - H_0) - x \tan \alpha_1] \cdot dx$$

$$Q_{DR} = K \cdot B \cdot d_0 / C \cdot 1/2 \cdot (H_e - H_0)^2 / \tan \alpha_1$$

Caudal. Margen izquierda

$$Q_{IZ} = K \cdot B \cdot d_0 / C \cdot 1/2 \cdot (H_e - H_0)^2 / \tan \alpha_2$$

CAUDAL TOTAL

$$Q_T = Q_0 + Q_{DR} + Q_{IZ} = \frac{K \cdot B \cdot d_0}{C} (H_e - H_0) \left[L_0 + \left(\frac{H_e - H_0}{2} \right) \left(\frac{1}{\tan \alpha_1} + \frac{1}{\tan \alpha_2} \right) \right]$$

Sustituyendo

$$\tan \alpha_1 = H_T / L_D \text{ y } \tan \alpha_2 = H_T / L_I \text{ y llamando } (H_e - H_0) / H_T = a$$

$$Q_T = K \cdot B \cdot d_0 / C \cdot H_T [L_0 \cdot a + (L_D + L_I) a^2 / 2]$$

B.8.2. d) Simplificación de la expresión general

Si se supone $B = 1,00$ cas igual a las expresadas en B.6.3.1.

$d_0 \rightarrow$ profundidad media del drenaje (P).

$c \rightarrow$ distancia media de los taladros de drenaje al paramento
aguas arriba.

$K_{GT} \rightarrow$ permeabilidad global de comparación, para todo el
conjunto del cimiento.

$$\underline{K_{GT} \approx Q_{DRENES} \cdot C/P \cdot 1/H_T [L_0 \cdot a + (L_D + L_I) a^2/2]} \quad (\text{Caso I})$$

B.8.2.2.- Orden de magnitud de la permeabilidad en una zona

- a) Hipótesis geométricas igual a las expresadas en B.6.3.1.
- b) Hipótesis de filtración igual a las consideradas en B.6.3.1, con profundidad de filtración captada por los drenes $d=d_0$ (Caso I).

- c) Expresión general del caudal de drenaje hasta una altura de cimienta H_c la expresión general

$$Q_0 = B(H_e - H_0) \cdot K \cdot L_0 \cdot d / C$$

$$Q_{IZ} = B \cdot K \cdot d_0 / C \cdot H_c / \operatorname{tg} \alpha_2 [(H_e - H_0) - H_c / 2]$$

$$Q_{DR} = B \cdot K \cdot d_0 / C \cdot H_c / \operatorname{tg} \alpha_1 [(H_e - H_0) - H_c / 2]$$

$$Q_p = K_{GZ} \cdot d_0 / C \cdot H_T \cdot a [L_0 \cdot (L_T - L_0) \cdot (H_c / H_T) \cdot (1 - 1/2a \cdot (H_c / H_T))]$$

- e) En el caso de suponer el valor "d" variable linealmente con x de la forma

$$d = d_0 [1 - x \operatorname{tg} \alpha / (H_e - H_0)]$$

(Caudal parcial hasta una altura $H_c \rightarrow Q_p$); $H_e \geq H_c$

$$a_{\min} = H_c / H_T$$

$$Q_p = B \cdot K \cdot d_0 / C \cdot H_T \cdot a [L_0 + (H_c / H_T) \cdot (L_T - L_0) \cdot (1 - 1/2 \cdot H_c / H_e - H_0)]$$

$$Q_p = B \cdot K \cdot d_0 / C \cdot H_T \cdot a [L_0 + (L_T - L_0) \cdot (H_c / H_T) \cdot (1 - 1/2a \cdot (H_c / H_T))]$$

d) Simplificación de la expresión general

-Gradiente medio, aguas arriba-drenaje; H_e / C ($B=1$).

-d profundidad media del drenaje p.

-c distancia media al paramento aguas arriba de los taladros de drenaje.

- K_{GZ} permeabilidad global de comparación de zona.

$$Q_p = K_{GZ} \cdot p / c \cdot H_T \cdot a [L_0 + (L_T - L_0) \cdot (H_c / H_T) \cdot (1 - 1/2a \cdot (H_c / H_T))]$$

e) En el caso de suponer el valor "d", variable linealmente con x de la forma:

$$d = d_0 [(1 - x \tan \alpha) / (H_e - H_0)]$$

se tiene: $a = (H_e - H_0) / H_T = 1,00$

$$Q_0 = B.(H_e - H_0).K.L_0.d_0/C$$

$$Q_{DR} = K.B.d_0/C . 1/3 . (H_e - H_0)^2 / \text{tg} \alpha_1$$

$$Q_{IZ} = K.B.d_0/C . 1/3 . (H_e - H_0)^2 / \text{tg} \alpha_2$$

$$\text{CAUDAL TOTAL } Q_T = K.B.d_0.H_T.[L_0.a + 1/3.a^2.(L_D + L_I)].1/c$$

$$K_{GTII} = Q_{DRENES}.C/C . 1/H_T[L_0.a + (L_D + L_I).a^2/3]$$

embalse lleno.

$$1/H_T.[L_0.a + (L_D + L_I).a^2/3].Q_{DRENES} . C/P$$

- f) Para valorar el orden de magnitud de la permeabilidad equivalente global del cimiento de una presa, teniendo en cuenta el efecto de aumento en la superficie de filtración que conlleva la elevación de embalse, se procedería de la forma siguiente:

$-Q_{\text{máx T}}$: Caudal drenado por los drenes de cimiento para embalse lleno.

$$-a = (H_e - H_0)/H_T \approx 1,00$$

B.8.3 - MODELO DE FILTRACION EN EL CIMIENTO DE UNA PRESA

$$K_{GT(I \text{ o } II)} \approx Q_{\text{máx } T} \cdot C / p \cdot H_T \cdot L_T \cdot \alpha / [1 + (L_0/L_T) \cdot (\alpha - 1)]$$

$$\alpha = 2 \text{ (modelo I)} ; \alpha = 3 \text{ modelo II}$$

f) Criterios de comparación de distintas zonas del cimiento de la presa

-Comparación a embalse lleno $a = (H_e - H_0)/H_T \approx 1,00$.

- $Q_{\text{máx } T}$; caudal drenado por todos los drenes de cimiento para embalse lleno.

- $Q_{\text{máx } Z}$; caudal drenado por todos los drenes de cimiento de la zona, para embalse lleno.

$$K_{GT} = Q_{\text{máx } T} \cdot C / p \cdot H_T \cdot 2 / (L_T + L_0) \quad (1)$$

$$K_{GZ} = (Q_{\text{máx } Z} / p \cdot H_T) \cdot 1 / [L_0 + (L_T - L_0)(1 - H_C/2H_T)(H_C/H_T)] \quad (2)$$

Hipótesis I $d = d_0$

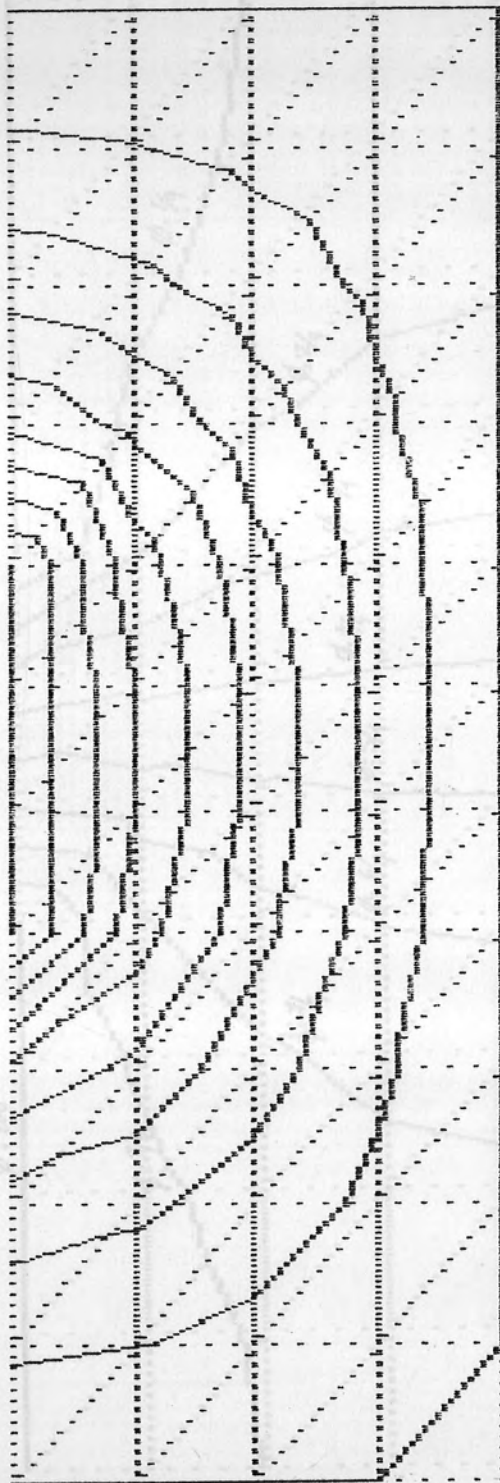
$$K_{GZ}/K_{GT} = Q_{\text{máx } Z}/Q_{\text{máx } T} \cdot (L_T + L_0) / [2L_T - (L_T - L_0)(H_C/H_T)^2]$$

B.8.3.- MODELO DE FILTRACION EN EL CIMIENTO DE UNA PRESA PARA VALORAR LA INFLUENCIA DEL INCREMENTO DE PERMEABILIDAD CON LA PROFUNDIDAD

La importancia de la forma de la red de filtración en el cimiento de una presa, hace que haya que considerar como determinante, la variación con la profundidad de la permeabilidad equivalente.

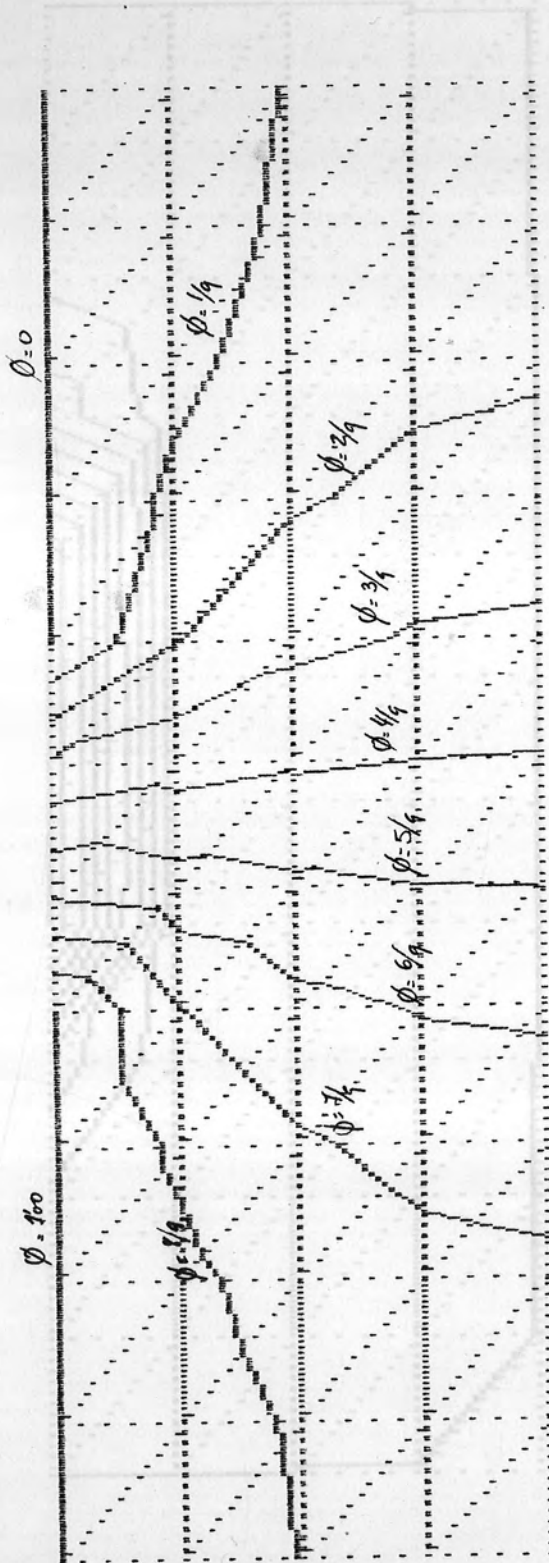
Para reflejar y poder comparar situaciones de auscultación hidráulica observadas, se ha reproducido a título de orientación, un pequeño programa para la estimación de la red de filtración en el caso supuesto en el que la permeabilidad isotrópica sea variable con la profundidad, como consecuencia del confinamiento del macizo rocoso. Este confinamiento, produce en el estado natural del macizo una mayor homogeneidad por la ausencia de efectos de meteorización y fisuraciones superficiales, ya que los estados tensionales de extensión están fuertemente compensados por el peso propio de la roca.

La comparación, indica, que con los órdenes de magnitud utilizados que reducen la permeabilidad decreciendo según valores relativos $K_p/K_{p+1} = 10$, existe un efecto de aproximación en las líneas de corriente y tienden a reproducir una filtración paralela en las proximidades del contacto presa-cimiento.

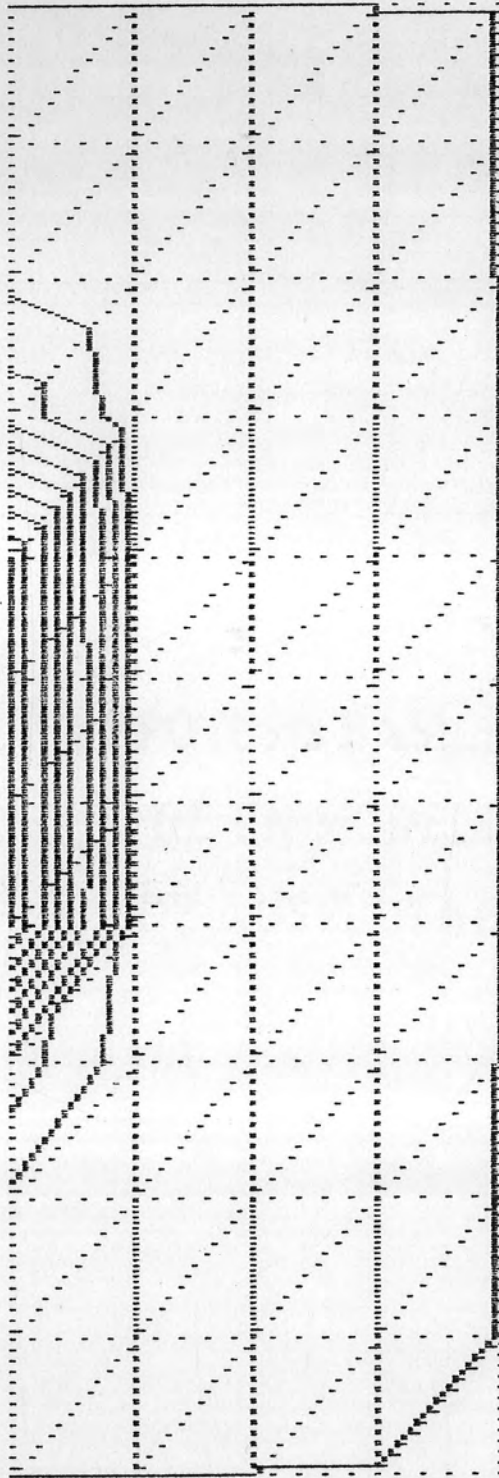


FILTRACION BAJO PRESA. LINEAS DE CORRIENTE. CASO $K_x = K_y = 1000$.





FILTRACION BAJO PRESA. EQUIPOTENCIALES. CASO $K_x = K_y = 1000$. ■



FILTRACION BAJO PRESA. LINEAS DE CORRIENTE. CASO $K=1000, 100, 10, 1$

■

ANEJO C

(INDICE DE CONTENIDOS)

C.1.- PLANTEAMIENTOS GENERALES Y SEPARACION DE LOS EFECTOS MODELIZABLES POR AUSCULTACION HIDRAULICA

C.1.1.- Consideraciones generales

C.1.2.- Parametros en la modelización de las condiciones de filtración en una sección transversal plana y datos de los que se dispone para su cuantificación

ANEJO C **HIPOTESIS BASICAS Y FORMULACION DE UN MODELO DETERMINISTA DE AUSCULTACION HIDRAULICA**

C.2.- PLANTEAMIENTO DE LAS HIPOTESIS DEL MODELO

C.2.1.- Características del flujo en la zona de filtración pantalla drenaje

C.2.1.1.- Consideraciones generales. Hipótesis sobre la filtración en el contacto presa-cimiento.

C.2.1.2.- Condicionantes para la aplicación del modelo por la hipótesis de filtración unidimensional en el contacto presa-cimiento.

ANEJO C

(INDICE DE CONTENIDOS)

C.1.- PLANTEAMIENTOS GENERALES Y SEPARACION DE LOS EFECTOS MODELIZABLES POR AUSCULTACION HIDRAULICA

C.1.1.- Consideraciones generales

C.1.2.- Parámetros que intervienen en la modelización de las condiciones de filtración en una sección transversal plana y datos de los que se dispone para su cuantificación

C.1.3.- Hipótesis necesarias para definir los parámetros que intervienen en las mediciones de filtración en una sección plana

C.2.- PLANTEAMIENTO DE LAS HIPOTESIS DEL MODELO

C.2.1.- Características del flujo en la zona de filtración pantalla drenaje

C.2.1.1.- Consideraciones generales. Hipótesis sobre la filtración en el contacto presa-cimiento.

C.2.1.2.- Condicionantes para la aplicación del modelo por la hipótesis de filtración unidimensional en el contacto presa-cimiento.

C.2.2.- Definiciones geométricas e hipótesis de contorno y de la

deformación

C.2.2.1.- Consideraciones generales.

C.4.- FORMULACIÓN C.2.2.2.- Hipótesis de contorno para la aplicación del modelo.

C.4.1.- C.2.2.3.- Datos mínimos necesarios para definir en el

C.4.2.- Formulación modelo la distribución de subpresiones.

C.2.3.- Modificaciones de la permeabilidad por el estado de deformación

C.4.2.2.- Hipótesis de distribución lineal en las

C.2.3.1.- Consideraciones generales.

C.2.3.2.- Modelos matemáticos de relación tensión efectiva-permeabilidad equivalente; deformación-permeabilidad equivalente y tensión efectiva-deformación.

C.2.3.3.- Influencia de la modificación zonal de la permeabilidad en el equilibrio hidráulico conjunto de la zona de filtración pantalla-drenaje.

C.3.- DISTRIBUCION DE LOS EFECTOS TENSIONALES-DEFORMACIONALES EN LA SECCION DE FILTRACION

C.3.1.- Definición de los parámetros utilizados en la formulación de un modelo de auscultación hidráulica determinista

C.3.2.- Hipótesis de distribución de la tensión efectiva y de la deformación

C.4.- FORMULACION DEL MODELO

C.4.1.- Hipótesis adoptadas para la formulación del modelo.

C.4.2.- Formulación del modelo.

C.4.2.1.- Hipótesis de distribución lineal en las tensiones efectivas.

C.4.2.2.- Hipótesis de distribución lineal en las deformaciones relativas.

C.1.1.- CONSIDERACIONES GENERALES

El objetivo del presente Anejo es precisar las hipótesis más simples y generalizables que permitan, con un número de datos de auscultación hidráulica deformacional limitado, valorar los efectos de campo en la conductividad hidráulica imputables a las modificaciones en las discontinuidades de la roca tratada, bajo efectos deformacionales variables que se suceden en el tiempo.

C.1.- PLANTEAMIENTOS GENERALES Y SEPARACION DE LOS EFECTOS MODELIZABLES POR AUSCULTACION HIDRAULICA

Para relacionar las modificaciones hidráulicas con las deformaciones instantáneas o diferidas en el tiempo es necesario seguir sistemáticamente la auscultación hidráulica desde la puesta en carga y observar las tendencias extrapolables de las magnitudes físicas medidas.

C.1.1.- CONSIDERACIONES GENERALES

El objetivo del presente Anejo es precisar las hipótesis más simples y generalizables que permitan, con un número de datos de auscultación hidráulica deformacional limitado, valorar los efectos de cambio en la conductividad hidráulica imputables a las modificaciones en las discontinuidades de la roca tratada, bajo efectos deformacionales variables que se suceden en el tiempo.

Además de las anomalías, corregibles a corto plazo si son conocidas, existe una forma de comportamiento general en el cimientó sólo observable directamente en él y que debe de estudiarse partiendo de las redes de filtración en zonas localizadas, bien sean estables ó sometidas en el tiempo a variaciones cuantificables.

Para relacionar las modificaciones hidráulicas con las deformaciones instantáneas ó diferidas en el tiempo es necesario seguir sistemáticamente la auscultación hidráulica desde la puesta en carga y observar las tendencias extrapolables de las magnitudes físicas medidas.

C.1.2.- Parámetros que intervienen en la modelización de las condiciones de filtración en una sección transversal plana y datos de los que se disponen para su cuantificación

Si en una zona significativa de la filtración se conocen los caudales en los drenes, los valores de las presiones manométricas en el recorrido principal del agua y las condiciones de contorno, se podrá encontrar la relación de estas magnitudes con las deformaciones relativas a lo largo de las líneas principales de filtración. Este esquema de planteamiento ideal, exige una toma de datos, sistemática en el tiempo, de la que normalmente no se dispone. Haciendo un somero repaso de los factores de influencia en la red de filtración de una sección transversal, en la que se produce una filtración de tipo radial embalse-drenaje, los parámetros que es necesario cuantificar están fundamentalmente orientados a definir los siguientes efectos:

- 1º Efectividad de las inyecciones de impermeabilización en la formación de una cortina de estanqueidad aguas arriba de la presa, y respuesta al estado de deformación variable que supone la modificación de la altura de embalse y los estados térmicos a corto y largo plazo.
- 2º Efectividad del drenaje para cortar la filtración hacia el pie de aguas abajo de la presa en idénticas condiciones de modificación por las acciones exteriores.

3º Formas características de evolución de las relaciones $q(H)$; $u(x,H)$ con $\xi(x,H)$; representando x la variable que indica la posición geométrica de un punto ó zona respecto al origen de la filtración.

Para conseguir estos objetivos en base a los datos que se pueden utilizar, es necesario plantear un modelo genérico de auscultación determinista con hipótesis sencillas que sustituyan la ausencia ó imprecisión de los datos disponibles.

A través del estudio realizado en el Anejo A, los datos disponibles que se relacionan con los efectos citados son:

- 1º Forma de evolución de las presiones manométricas en el pie de aguas arriba de la presa y en zonas inyectadas próximas a él. Los datos disponibles apuntan para "embalses altos" hacia valores definitivamente iguales a la altura de embalse ó con tendencia hacia ella sin que la teórica pantalla de impermeabilización suponga una discontinuidad evidente.
- 2º Forma de evolución de las presiones manométricas en el pie de aguas abajo de la presa en zonas situadas tras el drenaje. Los datos disponibles apuntan hacia presiones iguales a la cota de galería de drenaje, dando en ocasiones y en zonas específicas, índices de influencia del estado deformacional aguas abajo; para embalses altos, las presiones aumentan y

C.1.3. - sus valores medidos en altura de agua sobre cimientto, dan niveles superiores a los de la galería de drenaje.

transversal plana

No se suele disponer de datos que relacionen el caudal en el drenaje, con las presiones en él una vez obturado, aunque existen claros índices de que la presión media en la línea de drenaje real resulta de dos tipos de filtración: la que corta el drenaje y la que circula hacia el pié de aguas abajo sin haber sido interrumpida por él.

3º Las formas características de las evoluciones $q(H)$ y $u(x,H)$ son perfectamente conocidas para embalses altos y tienen en común la tendencia a manifestar formas de relación no lineal marcadas especialmente a partir de una altura de embalse "umbral" que se corresponde con modificaciones en los giros de cimientto de la misma tendencia; en el caso de las deformaciones, el efecto es de más difícil precisión por la ausencia general de valores relativos de la deformación en el cimientto, ó por la presentación de datos, cuando existen, con poca sensibilidad para su análisis cuantificado. en este caso es necesario hacer hipótesis de distribución de tensiones y habrá que utilizar expresiones que sean sencillas, manejables matemáticamente y que en cierta forma representen una deformación continua en toda la sección de filtración.

C.1.3.- Hipótesis necesarias para definir los parámetros que intervienen en la red de filtración en una sección transversal plana

En un planteamiento general, el modelo se define estableciendo zonalmente la relación $\xi \rightarrow K_e$ en tramos acotables, dentro de la zona completa de filtración; en estas zonas habrá que medir las deformaciones relativas en la dirección normal al flujo hidráulico y los factores de proporcionalidad entre los caudales y los gradientes (K_e); la comparación de las relaciones obtenidas en distintas zonas, permitirá generalizar ó acotar una validez zonal, para una relación tipo $\xi \rightarrow K_e$ genérica en la roca del cimientado estudiado.

El hecho de que la deformación se produzca por variación del nivel de embalse ó del estado térmico es indiferente, si se utiliza como indicador del cambio de permeabilidad las diferencias relativas en la deformación con respecto a un origen. Si la tiene, en cambio, si la deformación no es una medida directa y hay que interpretarla a través de estados tensionales supuestos en el cimientado, porque en este caso es necesario hacer hipótesis de distribución de tensiones y habrá que utilizar expresiones que sean sencillas, manejables matemáticamente y que en cierta forma representen una deformación continua en toda la sección de filtración.

En definitiva para poder expresar un modelo continuo de interpretación de los efectos hidráulicos en una sección, en base a los datos de que se disponen en una auscultación hidráulica convencional, habrá que plantear y tener posteriormente en cuenta en los resultados obtenidos, hipótesis que simplifiquen las formas de filtración. Los aspectos que tienen que definirse para de plantear un modelo global para la sección total de filtración son:

- 1º) Características del flujo en la zona de filtración pantalla-drenaje.
- 2º) Valores en el contorno de la distribución de subpresiones.
- 3º) Forma de modificación de la permeabilidad por el estado de deformación.
- 4º) Relación de la deformación con el estado tensional.
- 5º) Distribución de los efectos tensionales-deformacionales en la sección de filtración.

C.2.1.- CARACTERISTICAS DEL FLUJO EN LA ZONA DE FILTRACION: PANTALLA-DRENAJE

C.2.1.1.- Consideraciones generales. Hipótesis sobre la filtración en el contacto presa-cimiento

La filtración del agua a través del cimiento de una presa de fábrica, está condicionada por las características de la roca matriz y sus discontinuidades. Estas discontinuidades dan una heterogeneidad al medio de filtración que dificulta la modelización del flujo en el cimiento mediante su asimilación a un medio homogéneo.

C.2.- PLANTEAMIENTO DE LAS HIPOTESIS DEL MODELO

Se propone, para representar el flujo en la zona de contacto presa-cimiento, considerar que: "LA FILTRACION SE PRODUCE PREFERENTEMENTE EN DIRECCION PARALELA AL CONTACTO"

Esta proposición da limitaciones en cuanto al tipo de secciones a las que se debe de aplicar el modelo, tipos de roca de cimiento y características de inyecciones y drenaje realizados.

Se analizan a continuación las condiciones que ha de cumplir la zona modelizable, para que se cumpla mejor la hipótesis de flujo unidimensional y paralelo a la discontinuidad hormigón-roca.

C.2.1.- CARACTERISTICAS DEL FLUJO EN LA ZONA DE FILTRACION: PANTALLA-DRENAJE

C.2.1.1.- Consideraciones generales. Hipótesis sobre la filtración en el contacto presa-cimiento

La filtración del agua a través del cimiento de una presa de fábrica, está condicionada por las características de la roca matriz y sus discontinuidades. Estas discontinuidades dan una heterogeneidad al medio de filtración que dificulta la modelización del flujo en el cimiento mediante su asimilación a un medio homogéneo.

Además de la heterogeneidad del medio en si mismo, las inyecciones de impermeabilización y las perforaciones para el drenaje dan singularidad a las distintas zonas del contacto presa-cimiento.

Se propone, para representar el flujo en la zona de contacto presa-cimiento, considerar que: "LA FILTRACION SE PRODUCE PREFERENTEMENTE EN DIRECCION PARALELA AL CONTACTO".

Esta proposición da limitaciones en cuanto al tipo de secciones a las que se debe de aplicar el modelo, tipos de roca de cimiento y características de inyecciones y drenaje realizados.

Se analizan a continuación las condiciones que ha de cumplir la zona modelizable, para que se cumpla mejor la hipótesis de flujo unidimensional y paralelo a la discontinuidad hormigón-roca.

C.2.1.2.- Condicionantes de la aplicación del modelo por la hipótesis de filtración unidimensional en el contacto presa-cimiento

Al definir el flujo como unidimensional y paralelo al contacto presa-cimiento, las condicionantes que limitan la aplicación del modelo son: la elección de tipo de sección, las características zonales de la roca y los efectos de interacción pantalla-drenaje.

- a) Elección del tipo de sección. Se debe de aplicar el modelo a las secciones de la zona del cuenco y elegir con preferencia la ménsula central con el fin de poder hacer un análisis plano de la filtración por condiciones de simetría. En la ménsula central los factores secundarios que influyen en la filtración a través del cimiento, como son las precipitaciones ó el flujo de agua no radial, reducen su importancia frente a la variación de la altura de embalse.
- b) Tipo de roca y efecto de la inyección en ella. El tipo de roca que mejor encaja en la modelización es el que tiene en su zona superficial, fisuras pequeñas, gran densidad de fisuración y orientación de ellas en todas las direcciones; de tal forma que, al ser la superficie de contacto presa-cimiento un plano impermeable, para pequeñas profundidades, se puede considerar el flujo paralelo al contacto si la zona de inyección y de drenaje están separadas y/ó el drenaje es profundo.

Aún cuando la roca en su estado natural, está exenta de tensiones, excepto las de su propio confinamiento, el aumento de la permeabilidad isotrópica con la profundidad, favorece la aproximación de las líneas de corriente cerca del contacto y hace más aplicable la hipótesis de filtración horizontal. (Anejo B. Epígrafe 8.3). Si los piezómetros que miden la presión a lo largo del contacto presa-cimiento dán en todos los puntos una respuesta a la elevación de embalse, la filtración es, en su parte principal, paralela al contacto por ser ésta superficie condición de contorno de impermeabilidad.

c) Interacción pantalla-drenaje. La definición del "tipo de roca modelizable", que se ha realizado, conecta con las ideas sobre la "eficacia de inyección en terrenos impermeables con discontinuidades pequeñas". "Las inyecciones reducen los caudales de filtración y las presiones aguas abajo, en terrenos en los que existen fisuras grandes abiertas ó discontinuidades notables que reconducen la filtración a través de ellas. En rocas de matriz esencialmente impermeable, con fisuras pequeñas de difícil conexión, la penetración limitada de la inyección reduce poco la permeabilidad natural del terreno, aumentando su uniformidad, al mismo tiempo que se dificulta la captación por el drenaje del agua total infiltrada, al reducirse aún más la interconexión de las pequeñas vías de filtración. La inyección, si ha sido eficaz, evita vías claras de penetración de agua y hace más difícil su paso por la roca produciéndose una pérdida de carga por unidad de longitud

mayor, que en una zona de la misma roca sin inyectar, al aumentar el recorrido del agua.

En general, los mayores efectos de modificación de permeabilidades por estado tensional, se manifestarán en zonas de cimentación que respondan a un tipo de estructura de roca como la descrita en el apartado b. La interacción pantalla-drenaje, en este tipo de roca, será difícilmente separable y la presión en la línea teórica discontinua de drenaje longitudinal a lo largo del contacto, tenderá a establecer una presión media de equilibrio no necesariamente igual a la altura de la galería, por la influencia de la presión del agua confinada aguas abajo del drenaje.

Además de estos "piezómetros-índices" se necesitan otros. En algunos casos, en los que las cimentaciones de las presas han sido tratadas con inyecciones de consolidación en superficie, la estructura natural del terreno tiene características parecidas a las definidas como "mejor modelizables", al reducirse sus discontinuidades a las más pequeñas, no evitadas por la inyección.

En síntesis, al definir el tipo de roca y la forma de interacción pantalla-drenaje se está indicando la necesidad para la aplicación del modelo, de hacerlo en zonas de roca con alta homogeneidad estructural y con permeabilidad isotrópica variable por las aperturas ó cierres de fisuras preestablecidas, según el estado tensional. En estos casos, para estados de carga elevados, el punto de drenaje efectivo se situará aguas abajo del punto de drenaje real, por la penetración del agua hacia el pie de aguas bajo de la presa.

C.2.2.- DEFINICIONES GEOMETRICAS HIPOTESIS DE CONTORNO

C.2.2.1.- Consideraciones generales

El conocimiento de la distribución de subpresiones en el contacto presa-cimiento requiere en primer término, la instrumentación de la sección con "piezómetros testigos" que permitan conocer para distintas alturas de embalse las presiones del agua en los puntos del contorno. Con estos "piezómetros-testigos", se pueden valorar los efectos, sobre la distribución de subpresiones, de las heterogeneidades inducidas en el terreno por las inyecciones de impermeabilización y las perforaciones de drenaje.

Además de estos "piezómetros-testigos" se necesitan otros intermedios que reflejen para distintas alturas de embalse la forma de distribución de las presiones del agua en la base de la presa.

Un esquema general de instrumentación, para el conocimiento de la ley de subpresiones, en una sección transversal, podría ser el reflejado en la figura 1.

En general en las presas estudiadas en el Anejo A, los taladros de inyección y de drenaje, realizados en la cimentación están perforados desde la galería perimetral en vertical ó en abanico y a distintas profundidades. Los piezómetros disponibles, suelen estar situados en taladros intercalados con los de drenaje y reproducen en un gran número de ellos la altura correspondiente a la galería perimetral, según esquemas del tipo al representado en la figura 2.

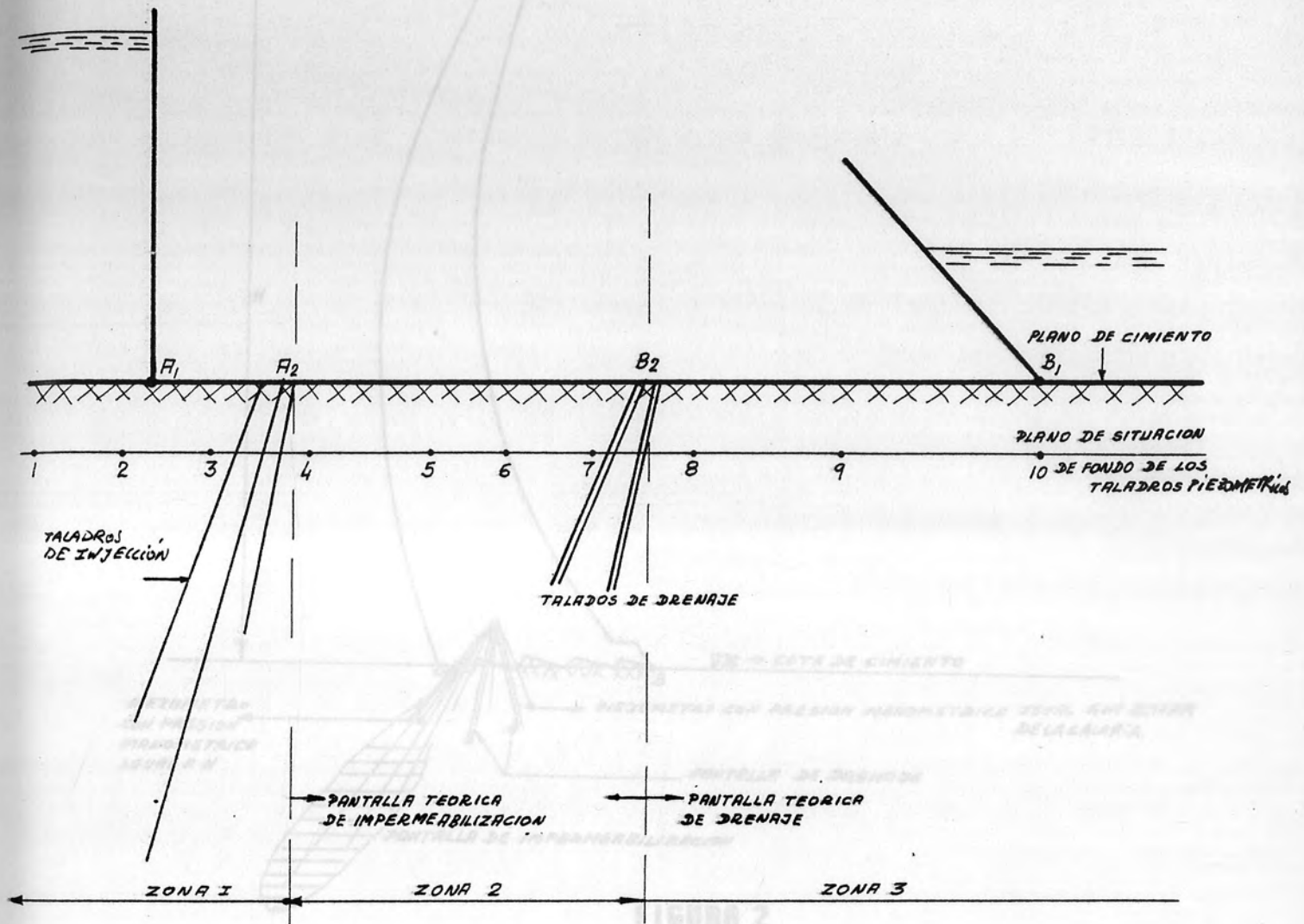


FIGURA 1

Piezómetros 1 y 10.- Piezómetros testigos de las condiciones de contorno en las zonas extremas aguas arriba y aguas abajo del contacto presa-cimiento.

Piezómetros 3 y 4.- Piezómetros testigos del efecto de las inyecciones de impermeabilización.

Piezómetros 7 y 8.- Piezómetros testigos del efecto del drenaje.

Piezómetros 2, 5, 6, y 9.- Piezómetros intermedios en las distintas zonas de filtración.

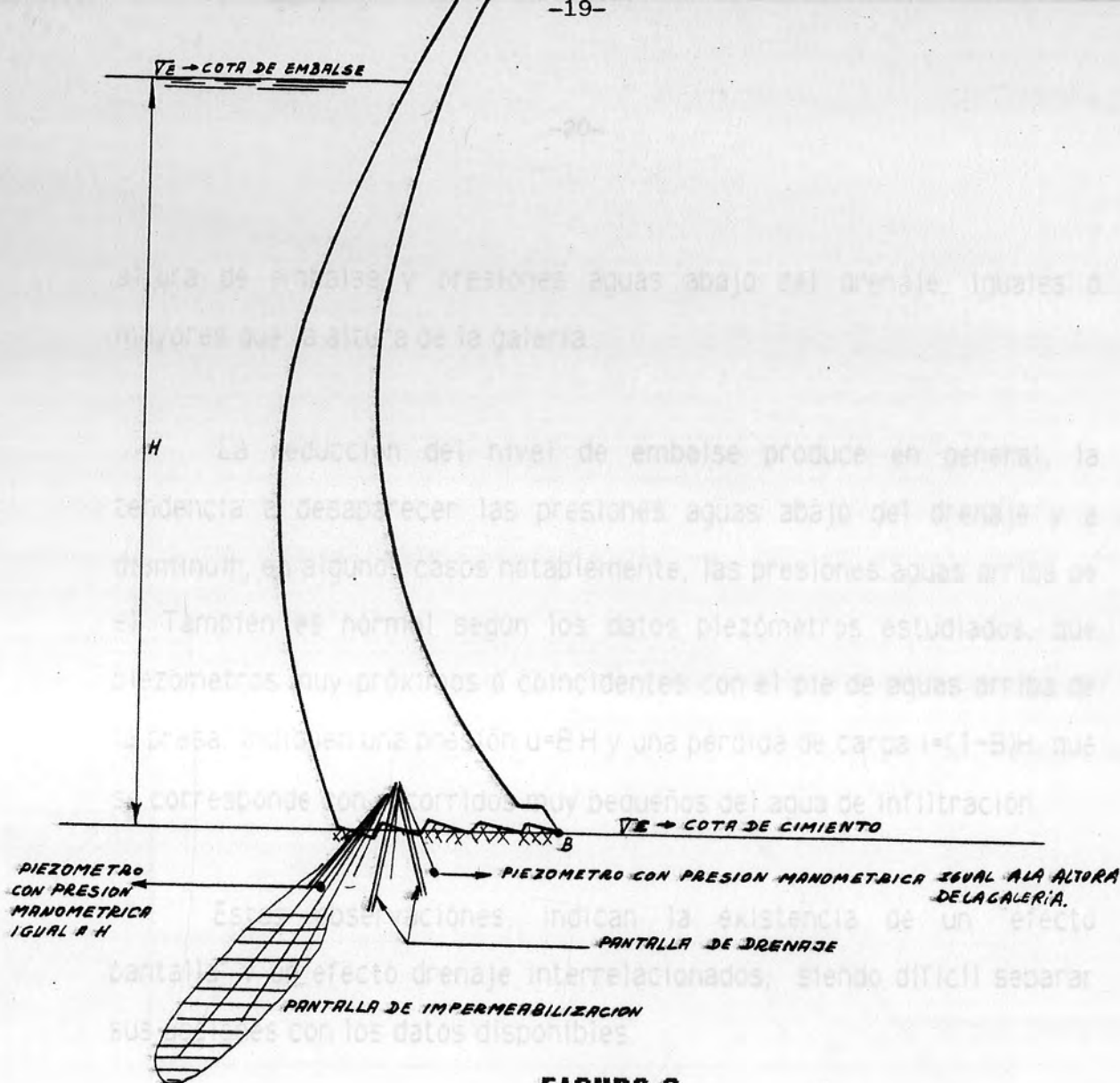


FIGURA 2

Al no disponer de "piezómetros testigos" y tener pocas secciones piezométricas bien definidas, en posición geométrica, las distribuciones de subpresión no se conocen con exactitud y es necesario recurrir a hipótesis generales y geométricas sobre los valores de contorno y sobre la separación en el contacto de distintas zonas de filtración.

A pesar de las limitaciones en el conocimiento de la distribución real de subpresiones, existen suficientes datos contrastados que indican la tendencia para embalses altos, a establecerse presiones en el pie de aguas arriba de la presa igual a la

altura de embalse y presiones aguas abajo del drenaje, iguales o mayores que la altura de la galería.

La reducción del nivel de embalse produce en general, la tendencia a desaparecer las presiones aguas abajo del drenaje y a disminuir, en algunos casos notablemente, las presiones aguas arriba de él. También es normal según los datos piezómetros estudiados, que piezómetros muy próximos o coincidentes con el pie de aguas arriba de la presa, indiquen una presión $u=B.H$ y una pérdida de carga $l=(1-B)H$, que se corresponde con recorridos muy pequeños del agua de infiltración.

Estas observaciones, indican la existencia de un "efecto pantalla" y un efecto drenaje interrelacionados, siendo difícil separar sus acciones con los datos disponibles.

El situar en un modelo, una pantalla de impermeabilización ó de drenaje vertical en un punto del contacto presa-cimiento, tiene un sentido estrictamente teórico. La eficacia de la inyección respecto a la reducción de subpresiones, la definen los gradientes reales medidos en la zona inyectada a distintas profundidades y la eficacia del drenaje, la ausencia de agua de infiltración aguas abajo de él.

Sin embargo, es necesario establecer estos límites teóricos para discretizar el contacto presa-cimiento mediante discontinuidades que separen zonas de diferente permeabilidad media, con comportamientos piezométricos claramente distintos.

Con este criterio se han definido las hipótesis geométricas y de contorno para la aplicación del modelo. El contraste de su validez para el análisis de una sección se podrá realizar con mayor ó menor precisión geométrica dependiendo de los datos piezométricos disponibles en ella.

C.2.2.2.- Hipótesis geométricas y de contorno para la aplicación del modelo

Hipótesis de contorno

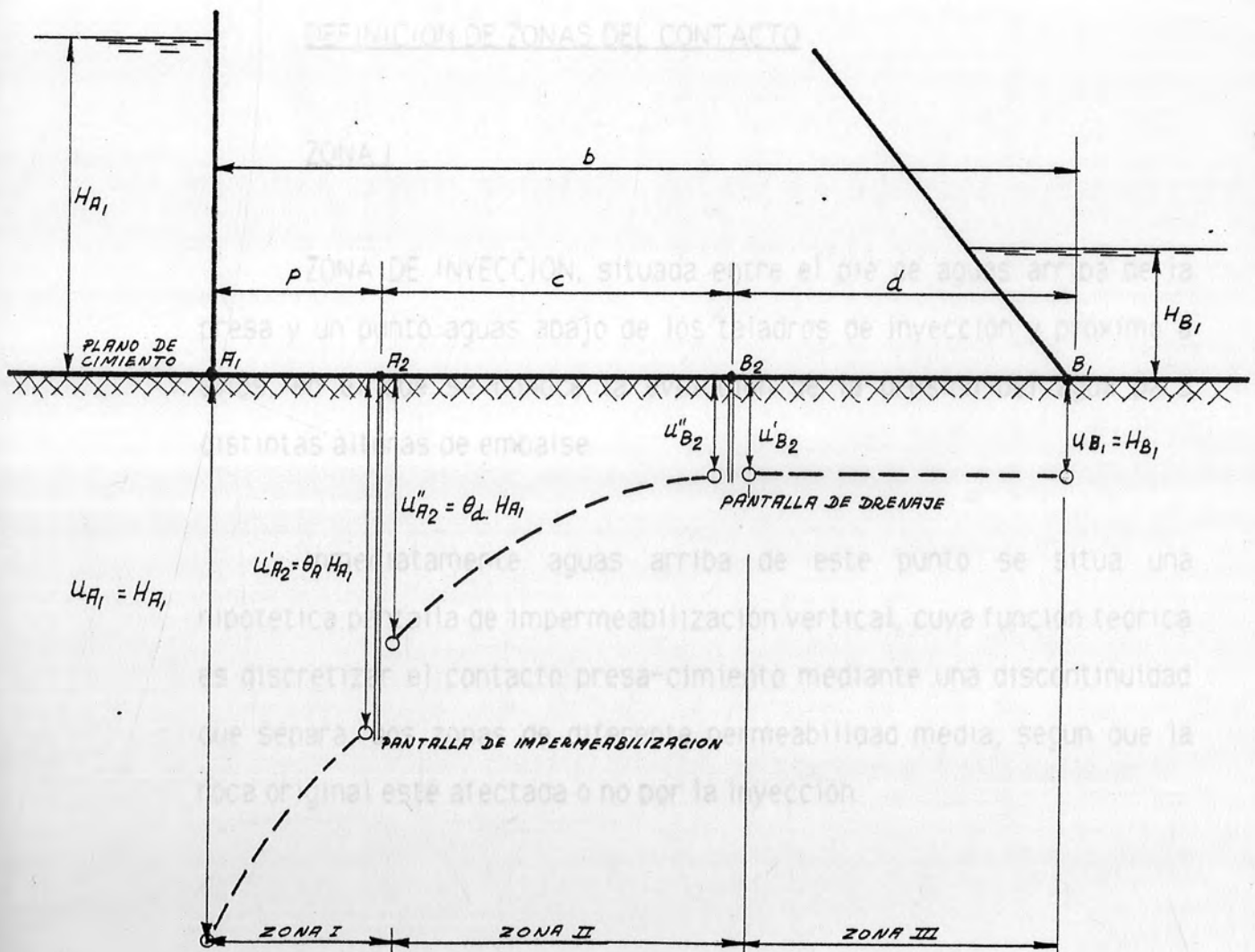


FIGURA 3

Se toma como referencia el plano de cimientto y se llama H_{A1} y H_{B1} a la altura de embalse sobre este plano, aguas arriba y aguas abajo. Se define la subpresión en el contacto presa-cimiento por los valores:

$$u_{A1} = H_{A1}; u'_{A2} = B_a H_{A1} \text{ (aguas arriba de la pantalla)}$$

$$u''_{A2} = B_d H_{A1} \text{ (aguas abajo de la pantalla)}$$

$$u_{B1} = H_{B1}; u'_{B2} = u''_{B2} = H_{B1} \text{ (aguas arriba y aguas abajo del drenaje)}$$

DEFINICION DE ZONAS DEL CONTACTO

ZONA I

ZONA DE INYECCION, situada entre el pié de aguas arriba de la presa y un punto aguas abajo de los taladros de inyección y próximo a ellos, en el que se conoce la evolución de la presión del agua para distintas alturas de embalse.

Inmediatamente aguas arriba de este punto se sitúa una hipotética pantalla de impermeabilización vertical, cuya función teórica es discretizar el contacto presa-cimiento mediante una discontinuidad que separa, dos zonas de diferente permeabilidad media, según que la roca original esté afectada o no por la inyección.

ZONA II

ZONA DE FILTRACION, PANTALLA-DRENAJE, en la que se establecen las condiciones de contorno para la aplicación del modelo.

ZONA III

ZONA DRENADA, limitada por el pié de aguas abajo de la presa y un punto próximo a los taladros de drenaje, y aguas abajo de él en el que no existe variación de la presión del agua con la altura de embalse.

Inmediatamente aguas arriba de este punto se sitúa una hipotética pantalla de drenaje vertical que discretiza el contacto presa-cimiento, separando dos zonas en las que el régimen de filtración es diferente.

En la Zona II existe un caudal de agua recogida por los drenes del cimiento, mientras que en la Zona III el estado de subpresión se considera uniforme, no existiendo gradiente hidráulico y permaneciendo el agua sin movimiento.

Los puntos que definen la posición de las pantallas de impermeabilización y drenaje, teóricas se interpretan físicamente de la siguiente forma:

Punto de situación de la pantalla de impermeabilización (A_2). La presión del agua en este punto sirve como "parámetro de contorno aguas-arriba" de la ley de subpresiones, en la zona de filtración pantalla-drenaje. Se expresa como $U''_{A2} = \theta_d H_{A1}$ y el valor $(1 - \theta_d) H_{A1}$ para distintas alturas de embalse, indica la pérdida de carga que se produce en la zona de inyección.

Punto de situación de la pantalla de drenaje (B_2). La presión del agua en este punto sirve como "parámetro de contorno aguas-abajo" en la zona de filtración pantalla-drenaje. Se expresa como $u''_{B2} = H_{B1}$ y se sitúa mediante el piezómetro más agua arriba de la zona drenada, que no modifica su presión manométrica con la altura de embalse.

Estos datos que se consideran mínimos para la aplicación a una sección del modelo son:

- 19) Algun piezómetro próximo o coincidente con el pie de aguas arriba de la presa y fuera de la zona de inyección que confirme la existencia de una presión en este punto igual a la altura de embalse sobre el plano de cimiento, ó bien que defina una pérdida de carga que sería indicativa de componente vertical en el flujo.

Caso de no disponer de este dato se tomara u_{A1} en el pie de aguas arriba de la presa ($u_{A1} = H_{A1}$).

C.2.2.3- Datos mínimos necesarios para definir con el modelo la distribución de subpresiones

La distribución de subpresiones en una sección transversal se conoce con exactitud si se tienen datos de presiones manométricas que definen las condiciones de contorno y la separación de zonas de filtración, de acuerdo con el esquema presentado en la figura 3.

Normalmente la disposición de datos es mucho más escasa y la definición de la ley de subpresiones hay que hacerla de acuerdo con las hipótesis planteadas en C.2.2.2. pero con un mínimo de datos que permitan contrastar su validez.

Estos datos que se consideran mínimos para la aplicación a una sección del modelo son:

- 1º) Algún piezómetro próximo o coincidente con el pié de aguas arriba de la presa y fuera de la zona de inyección que confirme la existencia de una presión en este punto igual a la altura de embalse sobre el plano de cimiento, ó bien que defina una pérdida de carga que sería indicativa de componente vertical en el flujo.

Caso de no disponer de este dato se tomara u_{A1} en el pié de aguas arriba de la presa. ($u_{A1} = H_{A1}$).

- 2º) Algún piezómetro próximo al pie de aguas arriba y situado en la zona de inyección ó aguas abajo de ella que confirme la existencia ó no, de un efecto pantalla representable por una discontinuidad puntual en la ley de subpresiones. $U_{A2} = \theta \cdot H_{A1}$; $U_{A1} - U_{A2} = (1 - \theta)H_{A1}$:

Este piezómetro servirá para comprobar si la presión en el pie de aguas arriba, se corresponde con la altura de embalse para una distribución de presiones, lineal entre este punto y el punto de drenaje efectivo. (Punto B₂).

- 3º) Piezómetros situados en la zona de filtración pantalla drenaje. Deberá de conocerse sus posiciones geométricas respecto al pie de aguas arriba y la forma de evolucionar en ellos la presión con respecto a la altura de embalse.
- 4º) Algún piezómetro próximo al pie de aguas abajo ó situado claramente en la zona de filtración "pantalla de drenaje-pié de aguas abajo" que confirme la hipótesis de distribución uniforme en esta zona, sobre todo para embalses altos. Caso de no disponer de estos piezómetros se tomará en el punto de drenaje real una presión manométrica igual a la de la galería de perforación del drenaje. El esquema de la figura 4, reproduce la situación de los piezómetros necesarios para el contraste y aplicación del modelo.

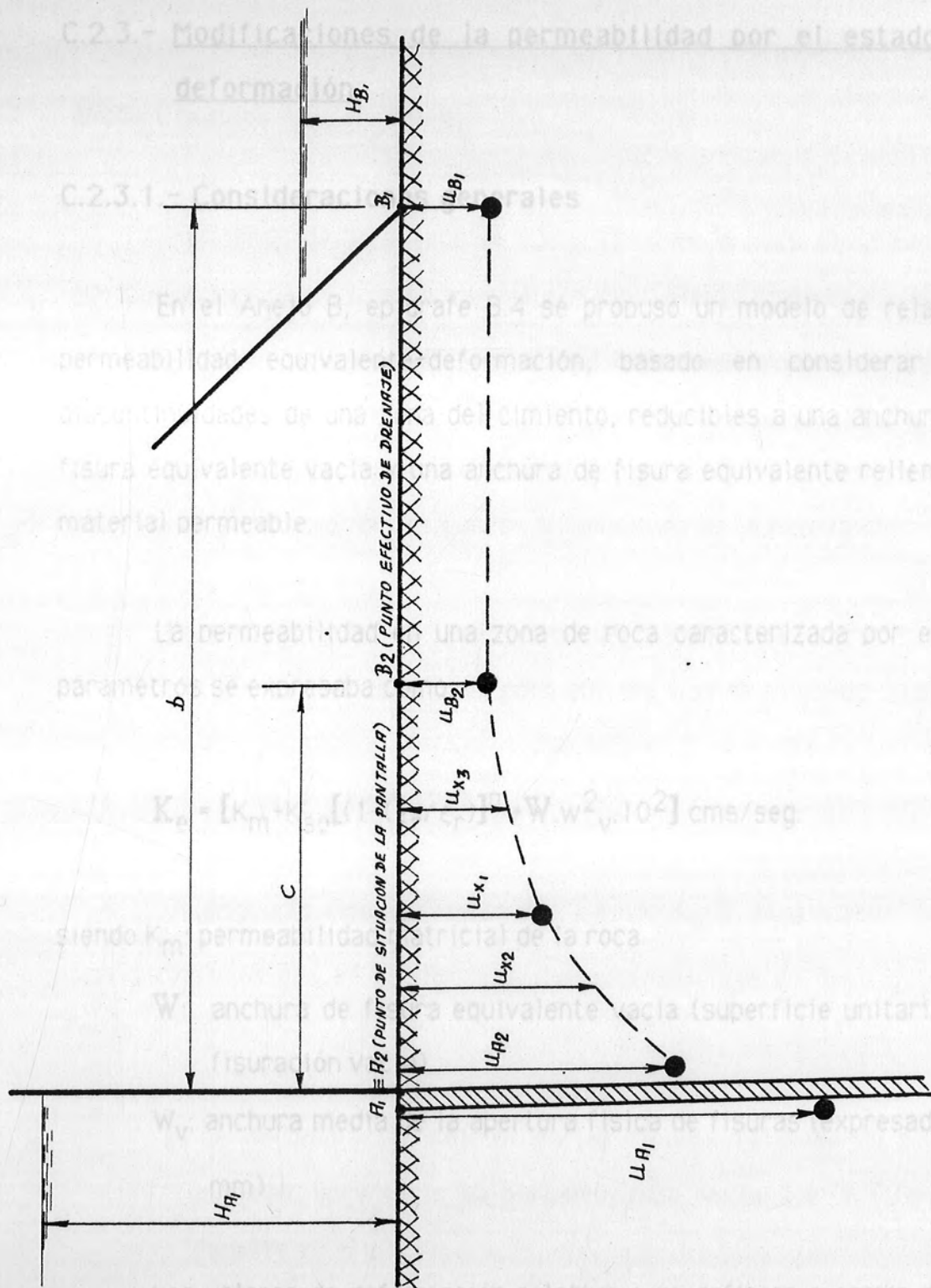


FIGURA 4

C.2.3.- Modificaciones de la permeabilidad por el estado de deformación

C.2.3.1.- Consideraciones generales

En el Anejo B, epígrafe B.4 se propuso un modelo de relación permeabilidad equivalente-deformación, basado en considerar las discontinuidades de una zona del cimentado, reducibles a una anchura de fisura equivalente vacía y una anchura de fisura equivalente rellena de material permeable.

La permeabilidad en una zona de roca caracterizada por estos parámetros se expresaba como:

$$K_e = [K_m + K_{s0} [(1 - (\xi_r / \xi_r))]^m + W \cdot w_v^2 \cdot 10^2] \text{ cms/seg.}$$

siendo K_m : permeabilidad matricial de la roca.

W : anchura de fisura equivalente vacía (superficie unitaria de fisuración vacía).

w_v : anchura media de la apertura física de fisuras (expresada en mm).

Los valores de deformación relativa ξ se definían a partir de un origen en el que la superficie de fisuración rellena era h_0 (anchura de

fisura equivalente rellena) y su índice de poros correspondiente e_0 . El límite de deformación a compresión ϵ_r estaría representado por una anchura mínima $h_{\min} = h_0 / (1 + e_0)$.

Partiendo de un estado de compresión de la roca saturada en el que pueda suponerse una permeabilidad equivalente igual a K_m , por no existir fisuras vacías abiertas y estar fuertemente comprimidas las fisuras rellenas, el proceso de decompresión tendrá su origen en la disminución de las acciones exteriores y/o el aumento de las presiones del agua en el interior de los huecos irreducibles de la matriz rocosa.

Esta decompresión producirá un cambio de permeabilidad discontinuo a medida que el agua pase por las vías de circulación que se van abriendo y exigirá un tiempo de acoplamiento de la red de filtración, a la nueva estructura de la roca.

Un esquema tipo de "forma de relación $K_p \rightarrow \epsilon$ en una zona" podría ser la representada en la figura 5, que se explicaría en las siguientes fases:

- a) La decompresión inicial en las fisuras rellenas no produce aumento apreciable de permeabilidad hasta que la filtración penetra en ellas

b) La extensión de las fisuras rellenas se produce instantáneamente y va acompañada del inicio de aperturas en pequeñas discontinuidades ó de filtración del agua en ellas si no estaban perfectamente cerradas.

c) Al continuar el proceso de decompresión se produce una rápida apertura de fisuras vacías y la filtración se dá preferentemente a través de ellas aumentando progresivamente su anchura media aún, con las limitaciones que produce su confinamiento zonal.

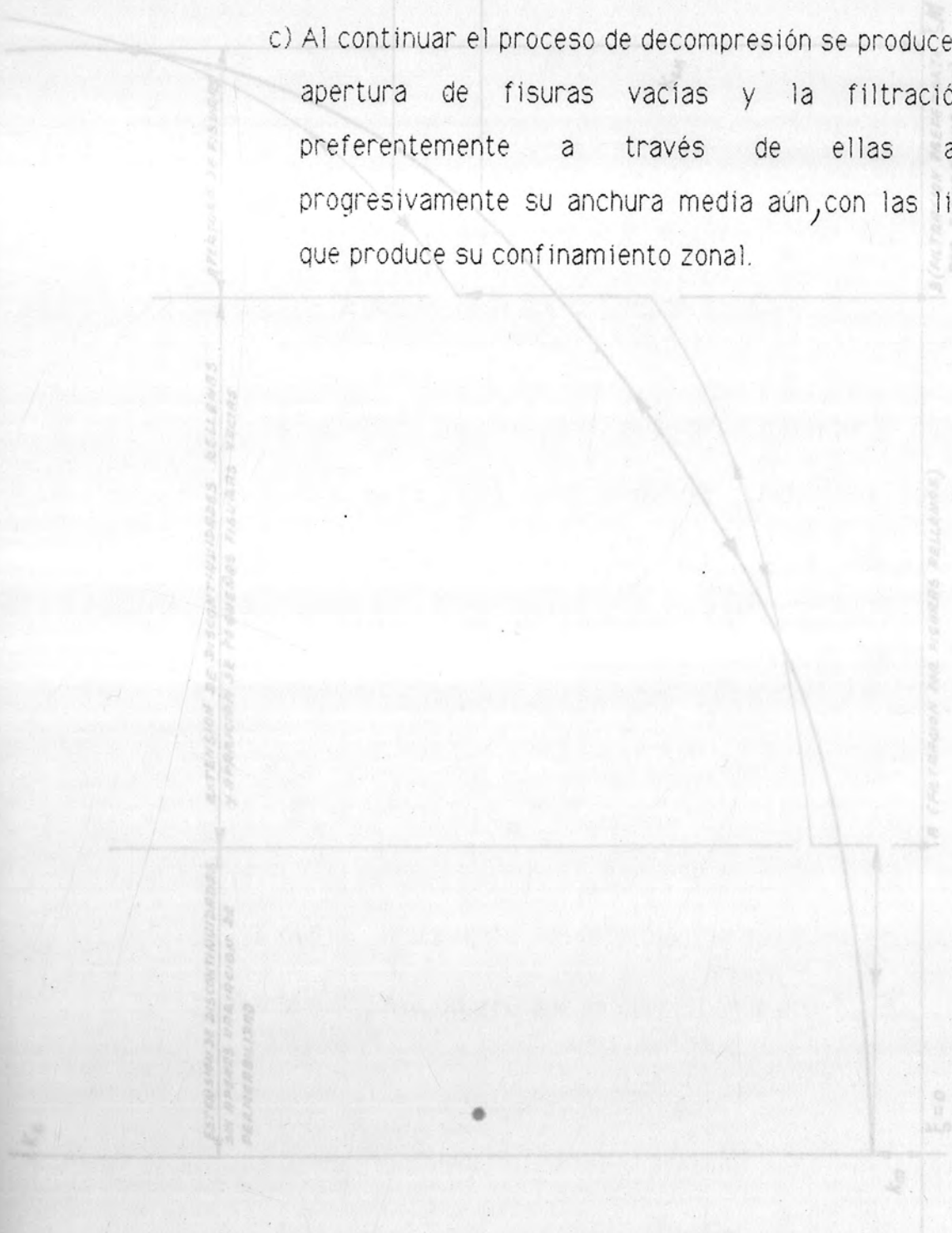


FIGURA 5

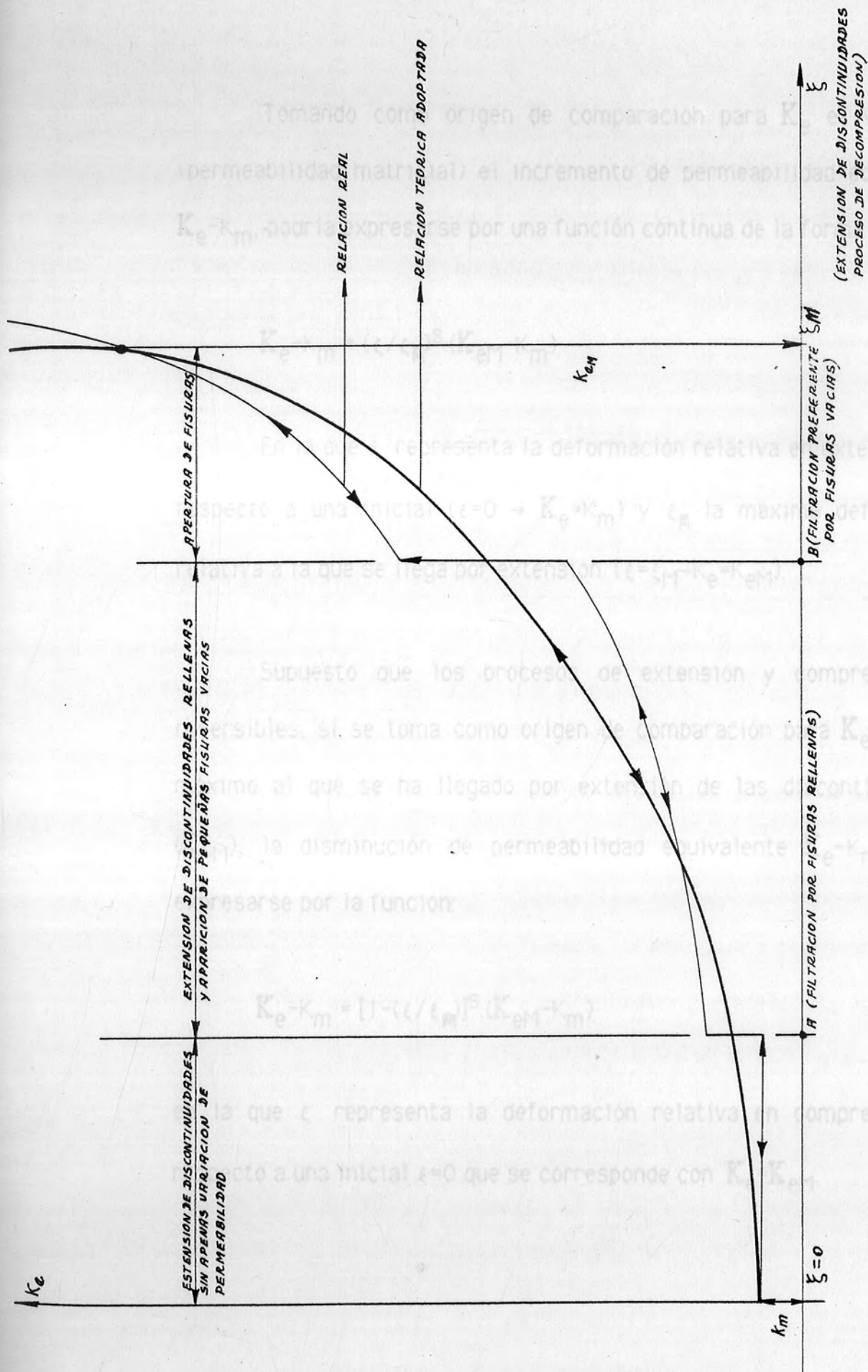


FIGURA 5

Tomando como origen de comparación para K_e el valor K_m , (permeabilidad matricial) el incremento de permeabilidad equivalente $K_e - K_m$, podría expresarse por una función continua de la forma:

$$K_e - K_m = (\xi / \xi_M)^S (K_{eM} - K_m)$$

En la que ξ representa la deformación relativa en extensión con respecto a una inicial ($\xi=0 \rightarrow K_e=K_m$) y ξ_M la máxima deformación relativa a la que se llega por extensión. ($\xi=\xi_M \rightarrow K_e=K_{eM}$).

Supuesto que los procesos de extensión y compresión son reversibles, si se toma como origen de comparación para K_e el valor máximo al que se ha llegado por extensión de las discontinuidades, (K_{eM}), la disminución de permeabilidad equivalente $K_e - K_m$, podría expresarse por la función:

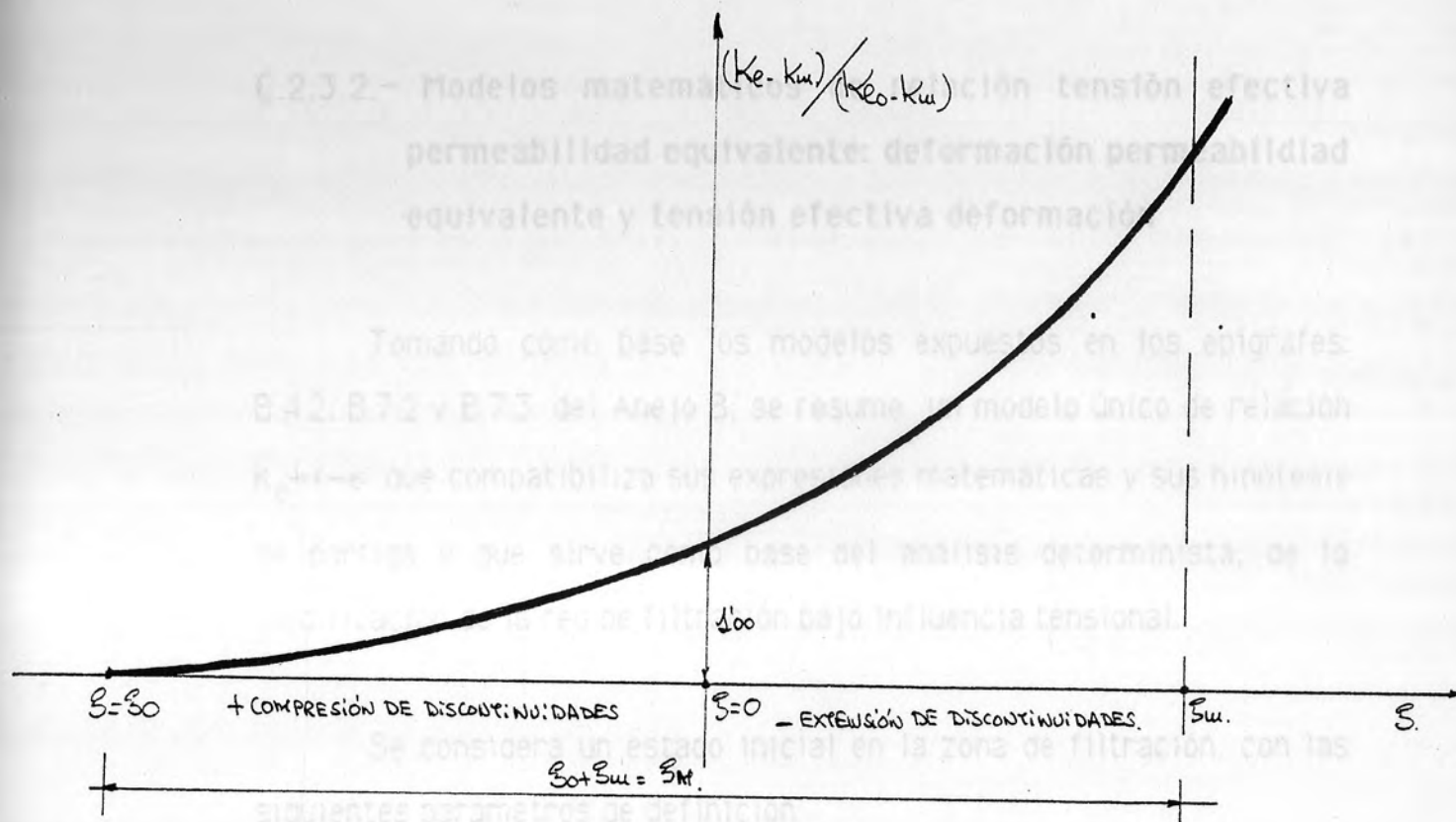
$$K_e - K_m = [1 - (\xi / \xi_M)]^S (K_{eM} - K_m)$$

en la que ξ representa la deformación relativa en compresión con respecto a una inicial $\xi=0$ que se corresponde con $K_e=K_{eM}$.

Supuesto un estado de referencia zonal, en el que la permeabilidad equivalente y la deformación relativa se representen por dos parámetros K_{e0} y ξ_0 ; el efecto de extensión o compresión de discontinuidades se expresará indistintamente por una relación $\xi \rightarrow K_e$ en función de estos dos parámetros:

$$(K_e - K_m) / (K_{e0} - K_m) = (1 - \xi / \xi_0)^S \quad (1)$$

En esta expresión la variable ξ representa el incremento de deformación relativa con respecto a la que corresponde al estado de referencia ξ_0 y su valor máximo negativo $-\xi_m$ lo definirá la máxima extensión posible de las discontinuidades, compatible con el confinamiento de la zona a la que representa la variable ξ ; de igual manera $+\xi_0$ representa el valor máximo de compresión posible partiendo del estado tomado como referencia. Existen por tanto, dos parámetros que acotan la validez de la expresión (1) y que se corresponden con la disminución de discontinuidades máxima por efecto de compresión (ξ_0) y el incremento máximo de las discontinuidades por efecto de extensión ($-\xi_m$), siempre con respecto al estado de referencia; siendo $\xi_0 + \xi_m = \xi_m$



Para fijar los límites de validez de la ley tomada como referencia, para este estado de compresión $K_e - K_m / K_{e0} - K_m = (1 - \epsilon / \epsilon_0)^S$ habrá que conocer los valores de ϵ_m y ϵ_0 que a partir de un estado de referencia, representen los valores máximos de extensión y compresión de discontinuidades.

Como para la comprobación de la ley, una vez aplicada en la zona de filtración, se van a utilizar estados tensionales deducidos del modelo reducido ó del cálculo, los límites de validez se expresarán mediante hipótesis de comportamiento tensión efectiva-deformación basadas en los modelos matemáticos definidos en los epígrafes B.4.2, B.7.2 y B.7.3 que se desarrollan a continuación en el siguiente epígrafe C.2.3.2.

C.2.3.2.- Modelos matemáticos de relación tensión efectiva permeabilidad equivalente: deformación permeabilidad equivalente y tensión efectiva deformación

Tomando como base los modelos expuestos en los epígrafes: B.4.2; B.7.2 y B.7.3. del Anejo B, se resume un modelo único de relación $K_e \rightarrow \epsilon \rightarrow \sigma'$ que compatibiliza sus expresiones matemáticas y sus hipótesis de partida y que sirve como base del análisis determinista, de la modificación de la red de filtración bajo influencia tensional.

Se considera un estado inicial en la zona de filtración, con las siguientes parámetros de definición:

$[\sigma'_0(x)]$; tensión efectiva de compresión, perpendicular al flujo, tomada como referencia; para este estado de compresión se toma el origen de incrementos de las deformaciones relativas ϵ_0 y la permeabilidad de comparación K_{e0} .

$[\sigma'_1; -\sigma'_0]$; máximo incremento de tensión efectiva que produce modificación en la permeabilidad, y en la de deformación. Para mayores incrementos de tensión efectiva la permeabilidad es la mínima K_m (permeabilidad matricial) y la deformación la máxima a compresión con respecto al estado de referencia $(+\epsilon_0)$.

C.2.3.2.- Modelos matemáticos de relación tensión efectiva permeabilidad equivalente: deformación permeabilidad equivalente y tensión efectiva deformación

Tomando como base los modelos expuestos en los epígrafes: B.4.2; B.7.2 y B.7.3. del Anejo B, se resume un modelo único de relación $K_e \rightarrow \epsilon \rightarrow \sigma'$ que compatibiliza sus expresiones matemáticas y sus hipótesis de partida y que sirve como base del análisis determinista, de la modificación de la red de filtración bajo influencia tensional.

Se considera un estado inicial en la zona de filtración, con las siguientes parámetros de definición:

$[\epsilon'_0(x)]$; tensión efectiva de compresión, perpendicular al flujo, tomada como referencia; para este estado de compresión se toma el origen de incrementos de las deformaciones relativas ϵ_0 y la permeabilidad de comparación K_{e0} .

$[\epsilon'_1, -\epsilon'_0]$; máximo incremento de tensión efectiva que produce modificación en la permeabilidad, y en la de deformación. Para mayores incrementos de tensión efectiva la permeabilidad es la mínima K_m (permeabilidad matricial) y la deformación la máxima a compresión con respecto al estado de referencia $(+\epsilon_0)$.

$[\epsilon'_{11} + \epsilon'_0]$; máxima disminución de tensión efectiva que produce, una permeabilidad por franca apertura de fisuras ($K_e \rightarrow \infty$) y una deformación asintótica por extensión ($\xi \rightarrow -\infty$), cuando se llega a un valor absoluto en tracción que se considera como límite máximo de la tensión efectiva a efectos de permeabilidad.

Se considera la extensión de discontinuidades con respecto al estado de referencia como deformación negativa y la compresión de discontinuidades como deformación positiva.

Se prescinde en la expresión de K_e del valor K_m , (permeabilidad matricial), entendiendo que sus valores representan un incremento de permeabilidad equivalente sobre la permeabilidad matricial de la roca.

Con estas definiciones y nomenclatura las expresiones matemáticas utilizadas serán:

relación tensión efectiva/deformación:

$$\left[\frac{(\epsilon'_{11} + \epsilon'_0)}{(\epsilon'_{11} + \epsilon')} \frac{(\epsilon'_1 - \epsilon'_0)}{(\epsilon'_1 - \epsilon'_0)} \right] = \left[1 - \frac{\xi}{\xi_0} \right]^r; \quad r > 0$$

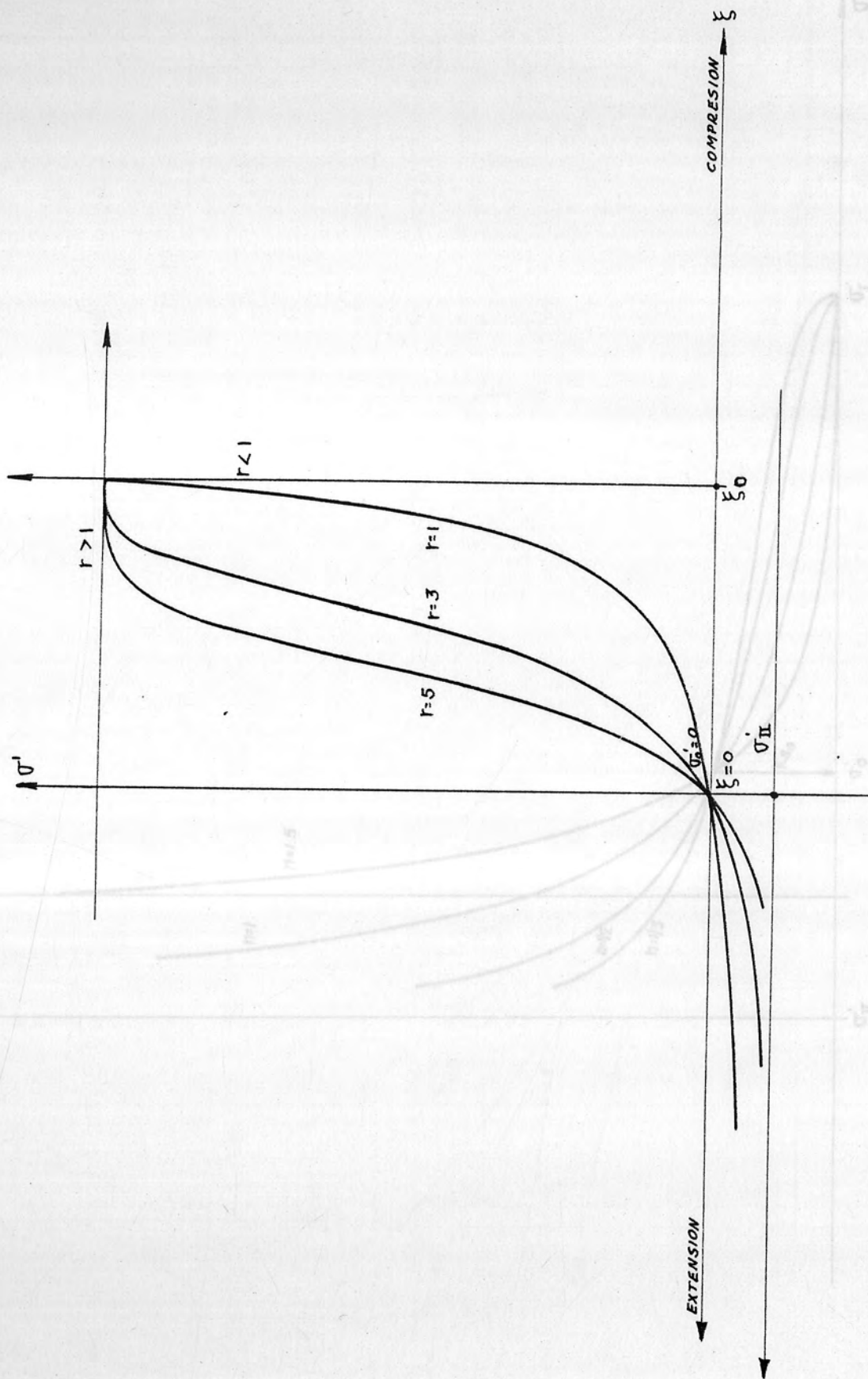


FIGURA 6

FIGURA 7

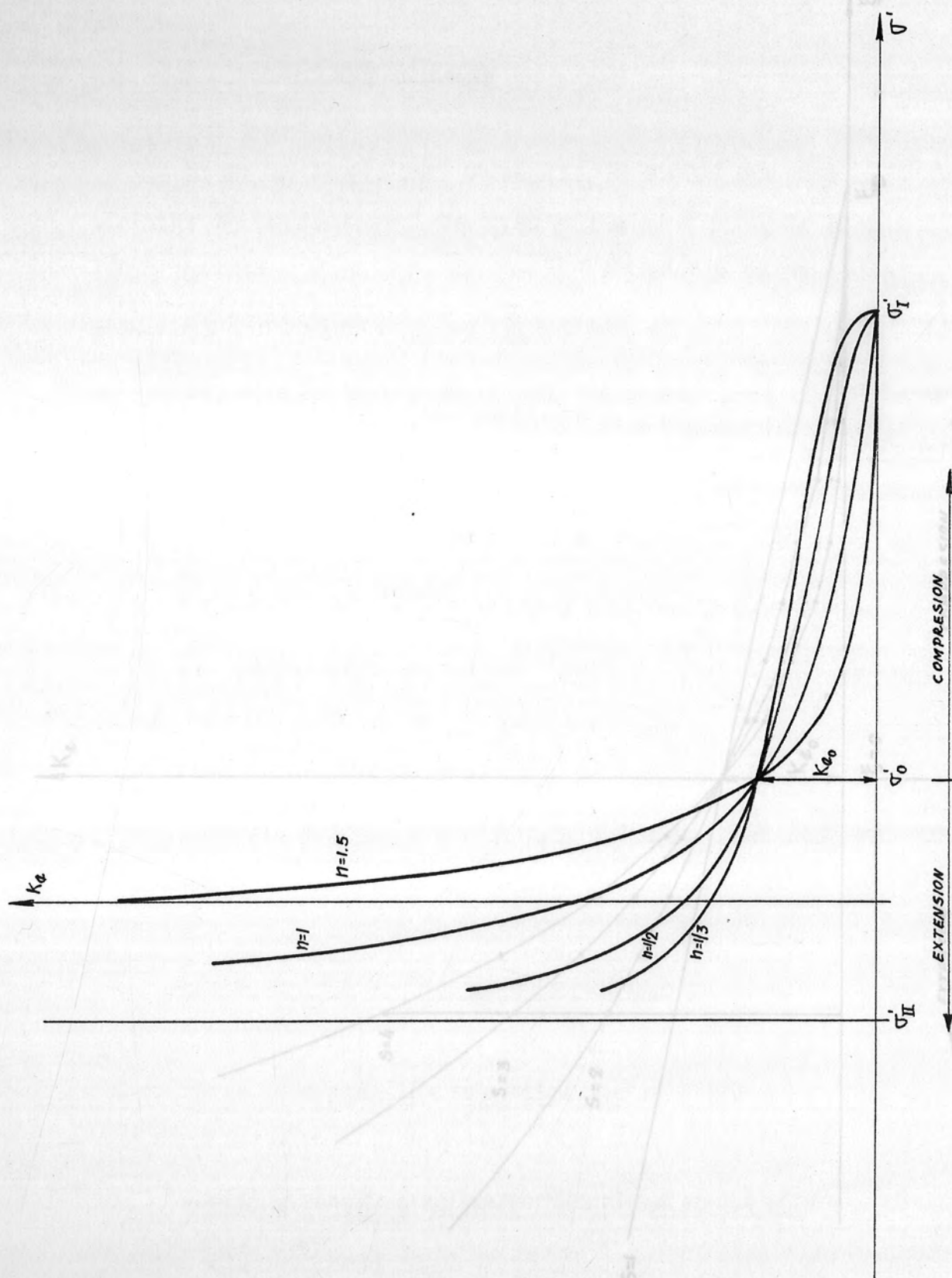


FIGURA 7

Expresiones simplificadas

Si en las expresiones anteriores, se supone que el estado de variación de las tensiones efectivas en cualquier punto de la zona de filtración está acotado entre valores muy alejados de su límite máximo absoluto a compresión (σ_1), en las expresiones anteriores el término $(\sigma_1 - \sigma)/(\sigma_1 - \sigma_0)$ tenderá a la unidad, suponiendo para el estado de referencia una tensión efectiva arbitraria dentro del dominio de tensión de cualquier punto de la zona de filtración.

$(\sigma_1 - \sigma)/(\sigma_1 - \sigma_0) \rightarrow 1.00$ si $\sigma_1 \gg \sigma$ y σ_0 en cualquier punto.

Para que $\xi \rightarrow \infty \rightarrow \sigma \rightarrow \sigma_1$, $\xi \rightarrow \xi_0 \rightarrow \sigma \rightarrow \sigma_0$

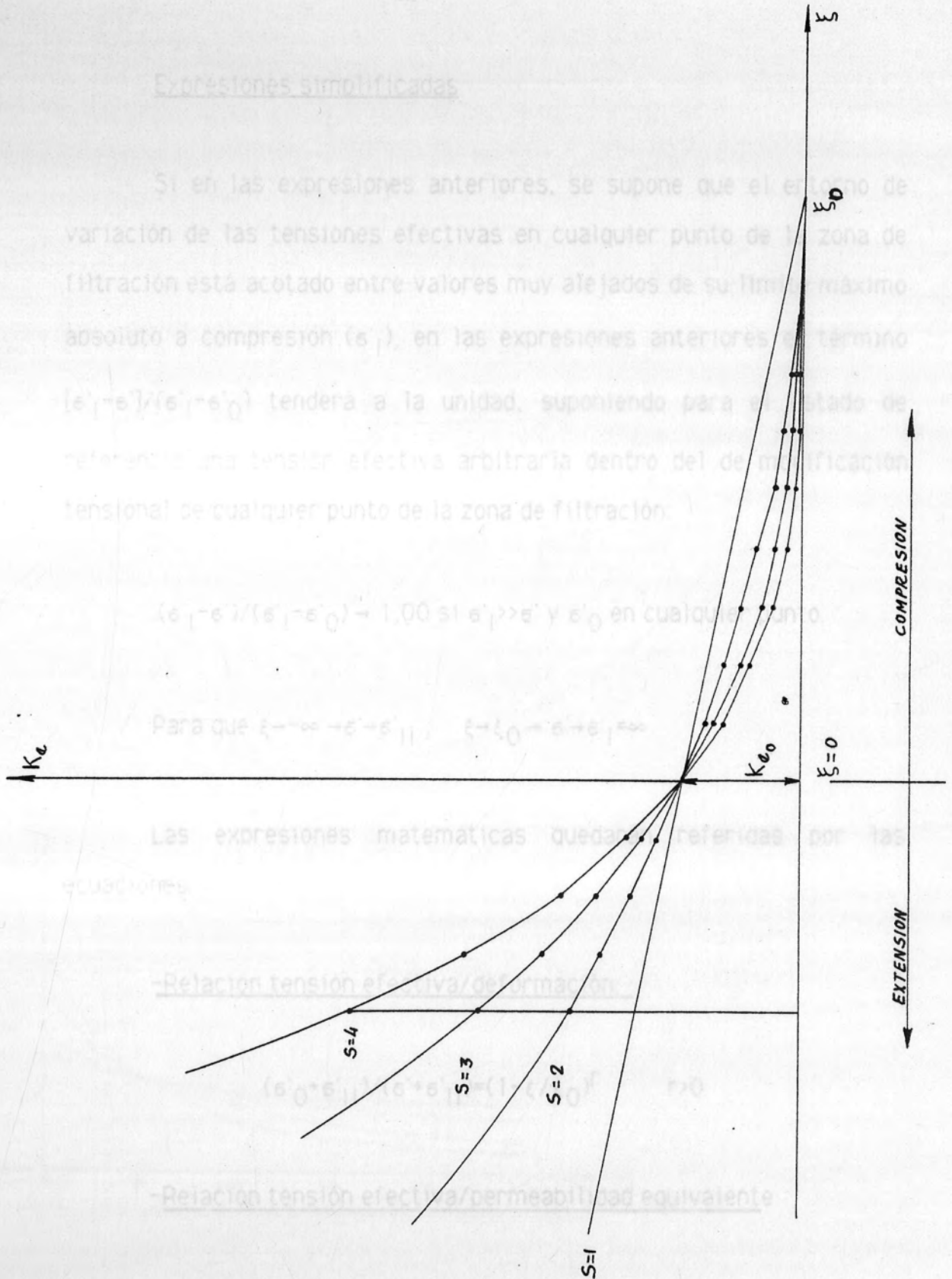


FIGURA 8

Expresiones simplificadas

Si en las expresiones anteriores, se supone que el entorno de variación de las tensiones efectivas en cualquier punto de la zona de filtración está acotado entre valores muy alejados de su límite máximo absoluto a compresión (σ'_1), en las expresiones anteriores el término $(\sigma'_1 - \sigma')/(\sigma'_1 - \sigma'_0)$ tenderá a la unidad, suponiendo para el estado de referencia una tensión efectiva arbitraria dentro del de modificación tensional de cualquier punto de la zona de filtración:

$$(\sigma'_1 - \sigma')/(\sigma'_1 - \sigma'_0) \rightarrow 1,00 \text{ si } \sigma'_1 \gg \sigma' \text{ y } \sigma'_0 \text{ en cualquier punto.}$$

$$\text{Para que } \xi \rightarrow -\infty \rightarrow \sigma' \rightarrow \sigma'_{II}; \quad \xi \rightarrow \xi_0 \rightarrow \sigma' \rightarrow \sigma'_I = \infty$$

Las expresiones matemáticas quedarán referidas por las ecuaciones:

-Relación tensión efectiva/deformación:

$$(\sigma'_0 + \sigma'_{II})/(\sigma' + \sigma'_{II}) = (1 - \xi/\xi_0)^r \quad r > 0$$

-Relación tensión efectiva/permeabilidad equivalente:

$$(\sigma'_0 + \sigma'_{II})/(\sigma' + \sigma'_{II})^n = K_e/K_{e0} \quad n > 0$$

-Permeabilidad equivalente/deformación:

C.2.3.3.- Influencia de la modificación zonal de la permeabilidad equivalente/deformación:

$$K_e/K_{e0} = (1 - \xi/\xi_0)^s \quad s > 0; \quad s = r \cdot n$$

La figura 9 representa estas relaciones para algunos valores de los parámetros n , r y s .

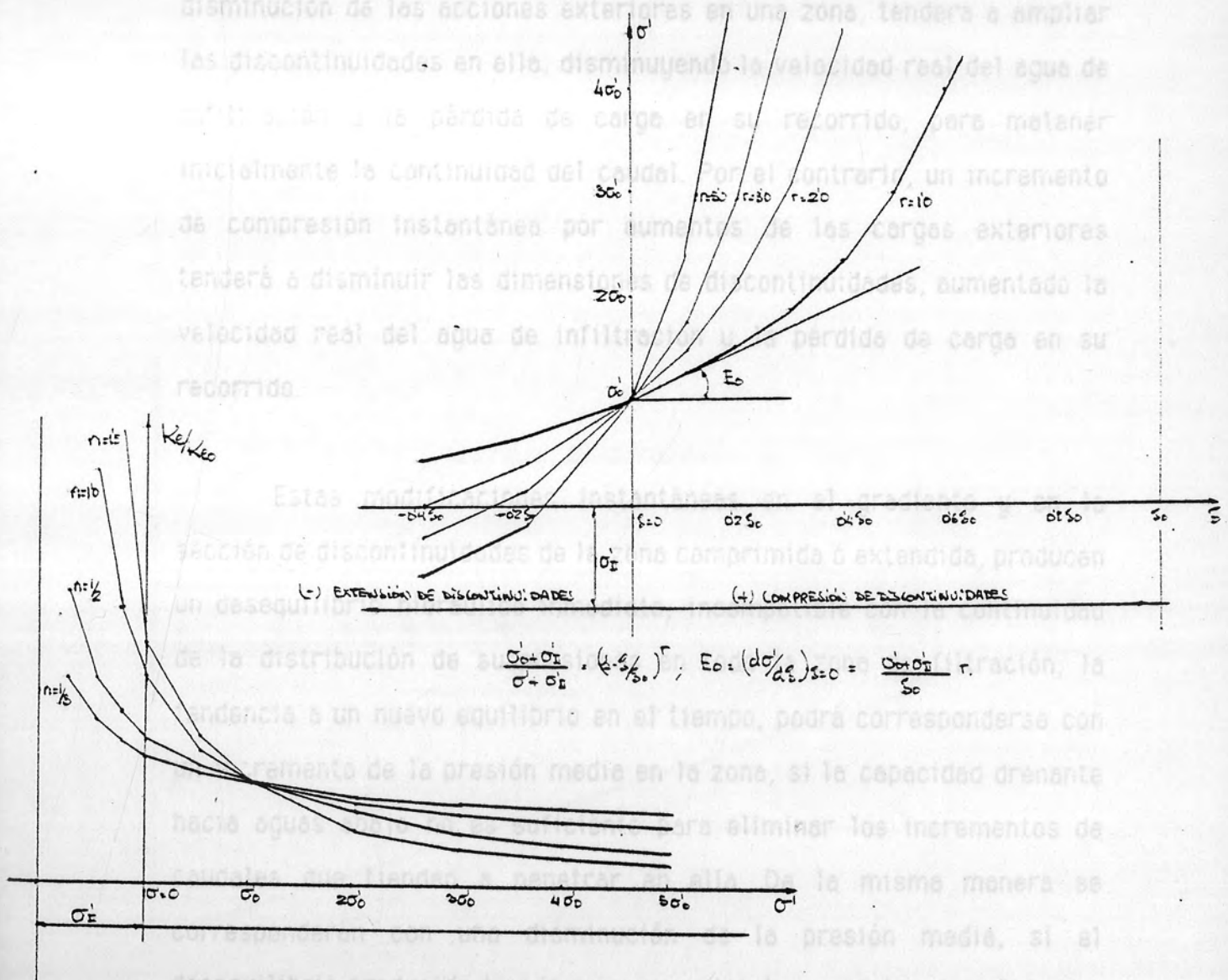


FIGURA 9

C.2.3.3.- Influencia de la modificación zonal de la permeabilidad en el equilibrio hidráulico de conjunto de la zona de filtración embalse-drenaje

En general, la decompresión instantánea producida por la disminución de las acciones exteriores en una zona, tenderá a ampliar las discontinuidades en ella, disminuyendo la velocidad real del agua de infiltración y la pérdida de carga en su recorrido, para mantener inicialmente la continuidad del caudal. Por el contrario, un incremento de compresión instantánea por aumentos de las cargas exteriores tenderá a disminuir las dimensiones de discontinuidades, aumentando la velocidad real del agua de infiltración y la pérdida de carga en su recorrido.

Estas modificaciones instantáneas en el gradiente y en la sección de discontinuidades de la zona comprimida ó extendida, producen un desequilibrio hidráulico inmediato, incompatible con la continuidad de la distribución de subpresiones en toda la zona de filtración; la tendencia a un nuevo equilibrio en el tiempo, podrá corresponderse con un incremento de la presión media en la zona, si la capacidad drenante hacia aguas abajo no es suficiente para eliminar los incrementos de caudales que tienden a penetrar en ella. De la misma manera se corresponderán con una disminución de la presión media, si el desequilibrio producido tiende a incrementar los caudales de salida con respecto a los de entrada en la zona.

Las modificaciones de permeabilidad equivalente por las cargas exteriores dependerán, por tanto, de la facilidad de extensión ó compresión de las discontinuidades en la zona y de la forma de su distribución en todo el recorrido del agua de infiltración, ya que la tendencia a mantenerse fijas las condiciones de contorno modifica en el interior de la zona de filtración, la distribución de subpresiones.

Esquemáticamente los modelos de comportamiento instantáneos tendrían una representación del tipo a la que se dibuja en la figura 10.

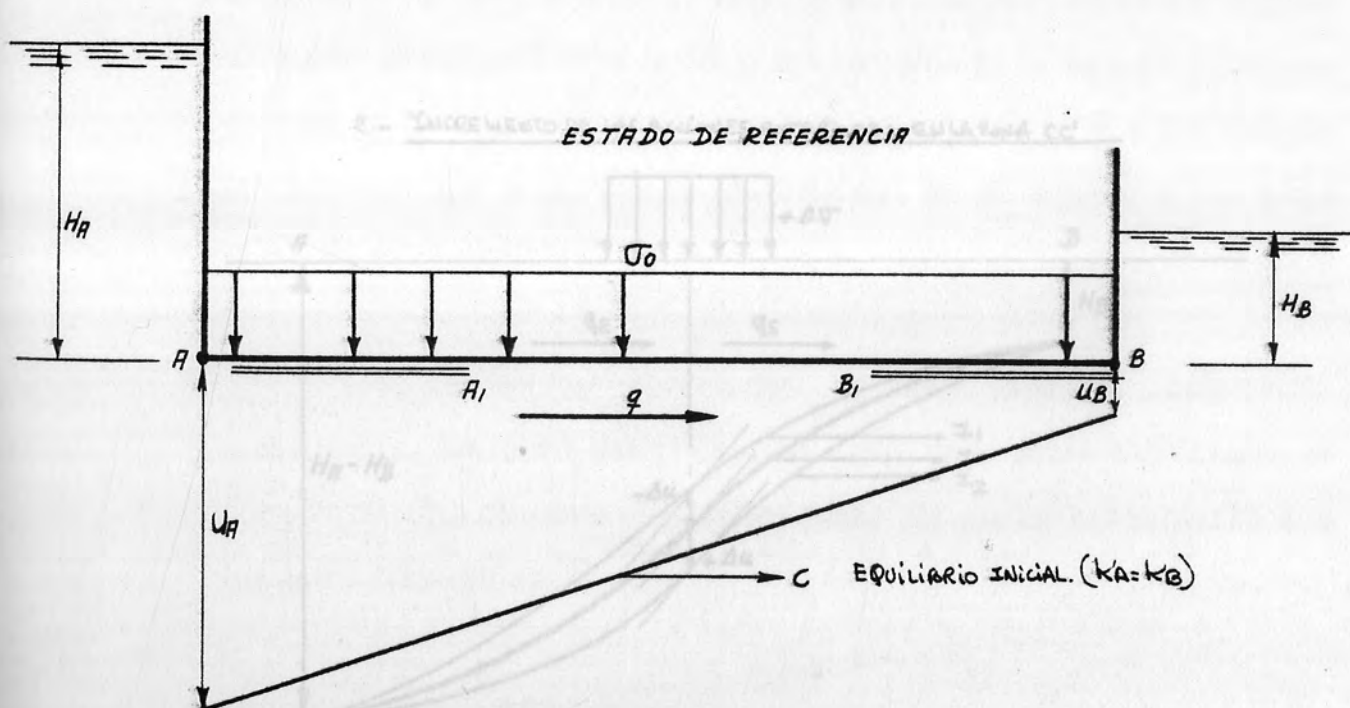
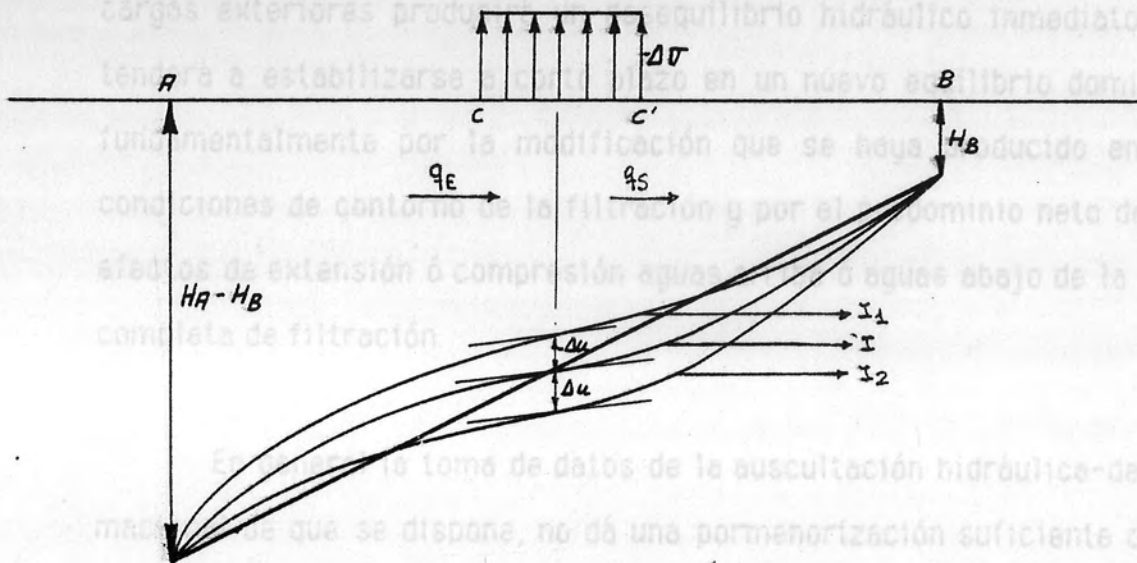
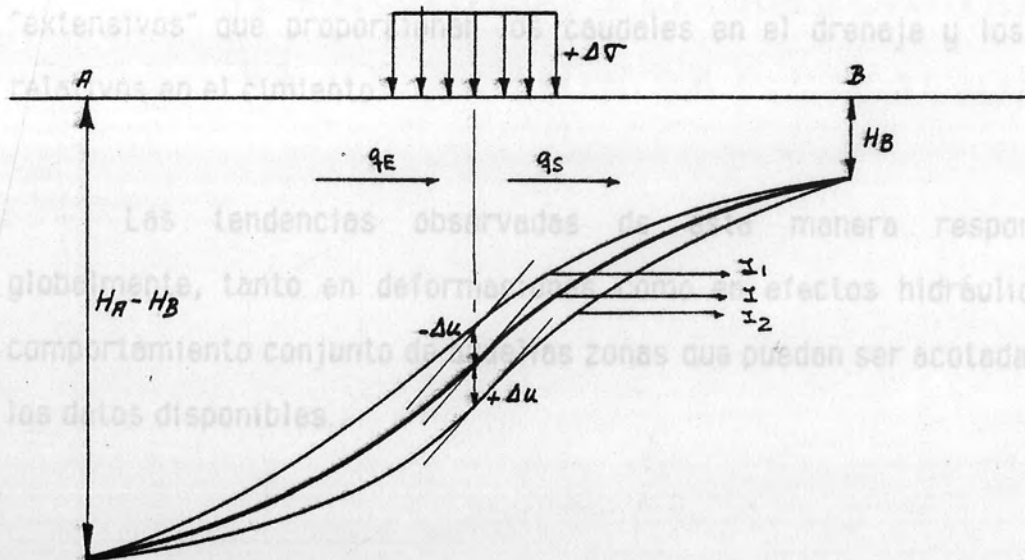


FIGURA 10 (1)

1.- DISMINUCIÓN DE LAS ACCIONES EXTERIORES EN LA ZONA CC'



2.- INCREMENTO DE LAS ACCIONES EXTERIORES EN LA ZONA CC'



I.- DESEQUILIBRIO INMEDIATO EN LA ZONA C.C' POR EXTENSIÓN O COMPRESIÓN DE DISCONTINUIDADES

I₁.- q_S tiende a ser mayor que q_E

I₂.- q_S tiende a ser menor que q_E

FIGURA 10(2)

Si se consideran los efectos de extensión ó compresión de discontinuidades en toda la sección de filtración, la modificación de las cargas exteriores producirá un desequilibrio hidráulico inmediato que tenderá a estabilizarse a corto plazo en un nuevo equilibrio dominado fundamentalmente por la modificación que se haya producido en las condiciones de contorno de la filtración y por el predominio neto de los efectos de extensión ó compresión aguas arriba ó aguas abajo de la zona completa de filtración.

En general la toma de datos de la auscultación hidráulica-deformacional de que se dispone, no dá una pormenorización suficiente como para la aplicación zonal del modelo, con varios tramos distintos en la zona de filtración y deberán de establecerse hipótesis simplificativas que expliquen el comportamiento zonal del conjunto de la zona de filtración en base a los indicadores intermedios de subpresión y a los valores "extensivos" que proporcionan los caudales en el drenaje y los giros relativos en el cimientó.

Las tendencias observadas de esta manera responderán globalmente, tanto en deformaciones como en efectos hidráulicos al comportamiento conjunto de aquellas zonas que puedan ser acotadas, con los datos disponibles.

C.3.1.- Definición de los parámetros utilizados en la formulación de un modelo de auscultación hidráulica determinista

A través de los epígrafes anteriores se han venido fijando las hipótesis simplificadoras básicas que permiten con un número de datos de auscultación hidráulica-deformacional, limitado, plantear un modelo de filtración en el que se haga intervenir los efectos de flexotracción inducidos en el cemento por modificaciones en su estado de deformación. El modelo teórico definido en (C.2.3.2) define la relación deformabilidad-conductividad hidráulica en un punto, tomando para ello un estado de referencia arbitrario σ_0 al que corresponde una permeabilidad k_0 .

C.3.- DISTRIBUCION DE LOS EFECTOS TENSIONALES-DEFORMACIONALES EN LA SECCION DE FILTRACION

La aplicación de este modelo a la filtración hace necesario pasar de la definición intensiva en un punto de las relaciones $\epsilon_x \rightarrow k_{ex}$ ó $\sigma_x \rightarrow k_{ex}$, a una definición extensiva entre dos secciones límites acotadas dentro de la zona de filtración, en las que se conozcan las condiciones de contorno y su forma de evolución para distintos estados conocidos de deformación; es así necesario, definir una "permeabilidad equivalente zonal entre dos secciones", suponiendo conocida la distribución de deformaciones ó lo que es lo mismo la distribución de las tensiones efectivas.

C.3.1.- Definición de los parámetros utilizados en la formulación de un modelo de auscultación hidráulica determinista

A través de los epígrafes anteriores se han venido fijando las hipótesis simplificativas básicas que permiten con un número de datos de auscultación hidráulica-deformacional, limitado, plantear un modelo de filtración en el que se haga intervenir los efectos de flexotracción inducidos en el cimiento por modificaciones en su estado de deformación. El modelo teórico definido en (C.2.3.2) define la relación deformabilidad-conductividad hidráulica en un punto, tomando para ello un estado de referencia arbitrario ϵ'_0 al que corresponde una permeabilidad conocida K_{e0} .

La aplicación de este modelo teórico a una zona completa de filtración hace necesario pasar de la definición intensiva en un punto de las relaciones $\epsilon'_x \rightarrow K_{ex}$ ó $\epsilon'_x \rightarrow K_{ex}$, a una definición extensiva entre dos secciones límites acotadas dentro de la zona de filtración, en las que se conozcan las condiciones de contorno y su forma de evolución para distintos estados conocidos de deformación; es así necesario, definir una "permeabilidad equivalente zonal entre dos secciones", suponiendo conocida la distribución de deformaciones ó lo que es lo mismo la distribución de las tensiones efectivas.

Puesto que el contraste del modelo se hará normalmente en base a los datos tensionales suministrados por modelos teóricos de cálculo ó modelos reducidos experimentales, se adoptará como criterio general utilizar para la definición del modelo, parámetros que expresen el estado tensional.

TENSION EFECTIVA EN UN PUNTO A EFECTOS DE PERMEABILIDAD

Se considera como tensión efectiva en un punto de la sección de filtración a efectos de permeabilidad, a la diferencia entre la tensión total transmitida por las acciones exteriores y la presión del agua, incrementado este valor en una tensión efectiva ϵ'_{11} que en valor absoluto representa el límite de tracción de la roca a efectos de permeabilidad.

PERMEABILIDAD EQUIVALENTE ZONAL ENTRE DOS SECCIONES DE FILTRACION

Se define como "Permeabilidad equivalente zonal entre dos secciones de filtración a un valor de permeabilidad constante entre las dos secciones, tal que para una distribución no uniforme de pérdida de carga en la zona, dé el mismo caudal de filtración que el que se produciría entre las dos secciones con un gradiente constante.

C.3.2.- Hipótesis adoptadas para la formulación del modelo

La formulación del modelo, en toda una zona de filtración, exige considerar una forma de distribución tensional ó de distribución de deformaciones relativas, que dé continuidad a la ley de subpresiones y permita formular la "permeabilidad equivalente zonal entre dos secciones de filtración". Se propone para la formulación del modelo dos hipótesis posibles.

- I) HIPOTESIS DE DISTRIBUCION LINEAL DE LAS TENSIONES EFECTIVAS.
- II) HIPOTESIS DE DEFORMACION RELATIVA LINEAL EN LA ZONA DE FILTRACION.

Ambas hipótesis, serán equivalentes si el módulo de elasticidad no varía con la tensión efectiva; si se produce variación del módulo de elasticidad la formulación del modelo, podrá expresarse bien en la hipótesis I ó en la hipótesis II, dependiendo de los datos que se tengan para el contraste de los valores obtenidos por su aplicación a partir de los datos de la auscultación hidráulica.

En caso de considerar la hipótesis II, partiendo de un estado de referencia arbitrario, el giro equivalente en la zona de filtración acotada para la modelización, vendrá definido por el desplazamiento relativo en sus puntos límites, de tal forma que, si para todos los puntos de la zona de filtración, se puede considerar $\epsilon'_x = \epsilon'_0$; $\epsilon_x = 0$; el giro relativo respecto a este estado de referencia será: $\delta_{\text{equivalente}} =$

$$\epsilon_A - \epsilon_B / L_{AB}$$

C.4.1.- Hipótesis adoptadas para la formulación del modelo

Primera HIPOTESIS.- Supuesta definida la zona de filtración entre dos puntos del contacto presa-cimiento, se considera que "La filtración se produce preferentemente en dirección paralela al contacto en profundidades pequeñas.

Segunda HIPOTESIS.- Entre dos secciones cualesquiera de la zona de filtración perpendiculares al contacto se supone aplicable la continuidad del caudal para una misma profundidad en ambas secciones.

Tercera HIPOTESIS.- El régimen de filtración es asimilable a una filtración Darcy en toda la zona de filtración.

C.4.- FORMULACION DEL MODELO

Cuarta HIPOTESIS.- Existe una relación directa entre la tensión efectiva en un punto de la sección de filtración y la permeabilidad equivalente en este punto que viene dada por la expresión

$$K_{ex} = \left[\frac{\sigma'_0 + \sigma'_{II}}{\sigma'_x + \sigma'_{II}} \right]^n K_{e0}$$

siendo σ'_0 una tensión efectiva de referencia para la que $K_{ex} = K_{e0}$ y σ'_{II} el parámetro que define la resistencia a tracción del terreno a efectos de permeabilidad, siendo ambos valores σ'_0 y σ'_{II} iguales para cualquier punto de la sección de filtración.

Quinta HIPOTESIS.- Entre dos puntos cualesquiera de la sección de filtración la distribución de tensiones efectivas es lineal.

C.4.1.- Hipótesis adoptadas para la formulación del modelo

Primera HIPOTESIS.- Supuesta definida la zona de filtración entre dos puntos del contacto presa-cimiento, se considera que "La filtración se produce preferentemente en dirección paralela al contacto en profundidades pequeñas.

Segunda HIPOTESIS.- Entre dos secciones cualesquiera de la zona de filtración perpendiculares al contacto se supone aplicable la continuidad del caudal para una misma profundidad en ambas secciones.

Tercera HIPOTESIS.- El régimen de filtración es asimilable a una filtración Darcy en toda la zona de filtración.

Cuarta HIPOTESIS.- Existe una relación directa entre la tensión efectiva en un punto de la sección de filtración y la permeabilidad equivalente en este punto que viene dada por la expresión

$$K_{ex} = \left[(\sigma'_0 + \sigma'_{II}) / (\sigma'_x + \sigma'_{II}) \right]^n \cdot K_{e0}$$

siendo σ'_0 una tensión efectiva de referencia para la que $K_{ex} = K_{e0}$ y σ'_{II} el parámetro que define la resistencia a tracción del terreno a efectos de permeabilidad, siendo ambos valores σ'_0 y σ'_{II} iguales para cualquier punto de la sección de filtración.

Quinta HIPOTESIS.- Entre dos puntos cualesquiera de la sección de filtración la distribución de tensiones efectivas es lineal.

C.4.2.- Formulación del modelo

*En toda la formulación siguiente, el valor de la máxima compresión posible en las discontinuidades, con respecto al estado tomado como referencia, se simboliza con el ξ_r , teniendo idéntico significado que ξ_0 en la formulación contenida en el epígrafe C.3.

1) FORMULACION GENERAL

- (I) Expresión de la permeabilidad equivalente en un punto, en función de su tensión efectiva

$$\frac{k_e}{k_{eo}} = \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_I} \cdot \frac{\sigma'_I - \sigma'_0}{\sigma'_I - \sigma'_0} \right)^n$$

- (II) Expresión de la deformación en un punto, en función de su tensión efectiva

$$\left(1 - \frac{\xi}{\xi_r} \right)^r = \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_I} \cdot \frac{\sigma'_I - \sigma'_0}{\sigma'_I - \sigma'_0} \right)$$

- (III) Expresión de la permeabilidad equivalente en un punto, en función de su deformación

$$\frac{k_e}{k_{eo}} = \left(1 - \frac{\xi}{\xi_r} \right)^s ; \quad \text{siendo} \quad s = r \cdot n$$

C.4.2 2) EXPRESIONES SIMPLIFICADAS

Si se considerará:

a) Formulación simplificada:

$(\epsilon'_I - \epsilon') / (\epsilon'_I - \epsilon'_0) \rightarrow 1,00$ si $\epsilon'_I \gg \epsilon'$ y ϵ'_0 en cualquier punto.

y $(\xi \rightarrow -\infty; \epsilon' \rightarrow \epsilon'_{II}); (\xi \rightarrow \xi_0; \epsilon' \rightarrow \epsilon'_I = \infty)$

Las expresiones matemáticas anteriores quedarán referidas por las ecuaciones:

-Relación tensión efectiva/deformación:

$$(\epsilon'_0 + \epsilon'_{II}) / (\epsilon' + \epsilon'_{II}) = (1 - \xi / \xi_0)^r \quad r > 0$$

-Relación tensión efectiva/permeabilidad equivalente:

$$(\epsilon'_0 + \epsilon'_{II}) / (\epsilon' + \epsilon'_{II})^n = K_e / K_{e0} \quad n > 0$$

-Permeabilidad equivalente/deformación:

$$K_e / K_{e0} = (1 - \xi / \xi_0)^s \quad s > 0; \quad s = r \cdot n$$

C.4.2.1.- Hipótesis de distribución lineal en las tensiones efectivas

a) Formulación simplificada.

$$\sigma'_I \gg \sigma' \text{ y } \sigma'_0; \quad \frac{k_e}{k_{e0}} = \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'} \right)^n$$

b) Linealidad de las tensiones efectivas.

$$\sigma' = \sigma'_A - (\sigma'_A - \sigma'_B) \frac{x}{b}$$

c) Ecuación de continuidad del caudal: $-du/dx \cdot k_{ex} = \text{cte.}$

$$\begin{aligned} \frac{\int_x^B du}{\int_A^B du} &= \frac{\int_x^B - \frac{dx}{k_{ex}} \text{cte}}{\int_A^B - \frac{dx}{k_{ex}} \text{cte}} = \frac{\int_{\sigma'_x}^{\sigma'_B} \frac{\text{cte} \cdot b}{(\sigma'_A - \sigma'_B) k_{e0}} \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'} \right)^{-n} d\sigma'}{\int_{\sigma'_A}^{\sigma'_B} \frac{\text{cte} \cdot b}{(\sigma'_A - \sigma'_B) k_{e0}} \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'} \right)^{-n} d\sigma'} = \\ &= \frac{\int_{\sigma'_x}^{\sigma'_B} \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'} \right)^n d\sigma'}{\int_{\sigma'_A}^{\sigma'_B} \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'} \right)^n d\sigma'} = \frac{\left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_x} \right)^{n+1} - \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_B} \right)^{n+1}}{\left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_A} \right)^{n+1} - \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_B} \right)^{n+1}} = \\ &= \frac{u - u_B}{u_A - u_B} = \frac{\left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_B} \right)^{n+1} - 1}{\left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_A} \right)^{n+1} - 1} \end{aligned}$$

C.4.2.2 d) Permeabilidad equivalente entre los puntos A y B. Formaciones relativas

$$k_{e(A-B)} = \frac{b}{\int_A^B \frac{dx}{k_{ex}}} = \frac{b(\sigma'_A - \sigma'_B) / b \cdot k_{e0} (n+1)}{\left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_A}{\sigma'_{II} + \sigma'_B} \right)^{n+1} - 1} \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_B} \right)^n \left(\frac{1}{\sigma'_{II} + \sigma'_B} \right)$$

b) Linealidad de las deformaciones relativas

$$k_{e(A-B)} = \frac{(n+1) k_{e0} \left(\frac{\sigma'_A + \sigma'_{II}}{\sigma'_B + \sigma'_{II}} - 1 \right)}{\left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_A}{\sigma'_{II} + \sigma'_B} \right)^{n+1} - 1} \cdot \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'_B} \right)^n$$

Condición de continuidad del caudal: $-QI/dx \cdot k_{ex} = Cte$

$$\frac{u_A - u_B}{u_A - u_B} = \frac{\left(\frac{\epsilon_T - \epsilon_X}{\epsilon_T - \epsilon_B} \right)^{-s+1} - 1}{\left(\frac{\epsilon_T - \epsilon_A}{\epsilon_T - \epsilon_B} \right)^{-s+1} - 1}$$

d) Permeabilidad equivalente entre los puntos A y B.

$$\frac{k_{e(A-B)}}{k_{e0}} = \frac{(-s+1) \left(\frac{\epsilon_T - \epsilon_A}{\epsilon_T - \epsilon_B} - 1 \right)}{\left(\frac{\epsilon_T - \epsilon_A}{\epsilon_T - \epsilon_B} \right)^{-s+1} - 1} \cdot \left(\frac{\epsilon_T}{\epsilon_T - \epsilon_B} \right)^{-s}$$

C.4.2.2.- Hipótesis de distribución lineal en las deformaciones relativas

a) Formulación simplificada.

-Al valor $(\sigma'_{II} + \sigma'_B)$ se le denominará X en correspondencia con la posición del punto x en la zona de filtración. De tal forma que:

$$\frac{k_e}{k_{e0}} = \left(\frac{\xi_r - \xi_x}{\xi_r - \xi_B} \right)^s$$

b) Linealidad de las deformaciones relativas.

$$\xi = \xi_A - (\xi_A - \xi_B)x/b$$

-Tensiones efectivas a efectos de permeabilidad

c) Ecuación de continuidad del caudal: $-du/dx \cdot k_{ex} = \text{cte.}$

-Por la hipótesis de distribución lineal de tensiones efectivas.

$$\frac{u - u_B}{u_A - u_B} = \frac{\left(\frac{\xi_r - \xi_x}{\xi_r - \xi_B} \right)^{-s+1} - 1}{\left(\frac{\xi_r - \xi_A}{\xi_r - \xi_B} \right)^{-s+1} - 1}$$

$$X = A - (A - B)x/b; \quad \frac{X}{B} = \frac{A}{B} - \left(\frac{A}{B} - 1 \right) \left(\frac{x}{b} \right)$$

d) Permeabilidad equivalente entre los puntos A y B.

-A la variable (x/b) que expresa la posición en un punto de la zona de filtración, se le denominará a .

-Las expresiones quedan de la forma:

$$\frac{k_e - (A - B)}{k_{e0}} = \frac{(-s+1) \left(\frac{\xi_r - \xi_A}{\xi_r - \xi_B} - 1 \right)}{\left(\frac{\xi_r - \xi_A}{\xi_r - \xi_B} \right)^{-s+1} - 1} \cdot \left(\frac{\xi_r}{\xi_r - \xi_B} \right)^{-s}$$

$$\frac{k_e(A - B)}{k_{e0}} = \frac{(n+1) \cdot \left(\frac{A}{B} - 1 \right)}{\left(\frac{A}{B} \right)^{n+1} - 1} \cdot \left(\frac{C}{B} \right)^n$$

SIMPLIFICACION DE NOMENCLATURA DE LAS EXPRESIONES

1) HIPOTESIS DE DISTRIBUCION LINEAL Y TENSIONES EFECTIVAS

-Al valor $(\sigma'_{II} + \sigma'_X)$ se le denominará X en correspondencia con la posición del punto en la zona de filtración. De tal forma que:

$$(\sigma'_{II} + \sigma'_A) = A$$

$$(\sigma'_{II} + \sigma'_B) = B \quad \text{Tensiones efectivas a efectos de permeabilidad}$$

$$(\sigma'_{II} + \sigma'_0) = C$$

-Por la hipótesis de distribución lineal de tensiones efectivas.

$$X = A - (A-B)x/b; \quad \frac{X}{B} = \frac{A}{B} - \left(\frac{A}{B} - 1\right) \left(\frac{x}{b}\right)$$

-A la variable (x/b) que expresa la posición en un punto de la zona de filtración, se le denominará a.

-Las expresiones quedan de la forma:

$$* \frac{u - u_B}{u_A - u_B} = \frac{\left(\frac{A}{B} - \left(\frac{A}{B} - 1\right)a\right)^{n+1} - 1}{\left(\frac{A}{B}\right)^{n+1} - 1}$$

$$* \frac{k_{e(A-B)}}{k_{e0}} = \frac{(n+1) \cdot \left(\frac{A}{B} - 1\right)}{\left(\frac{A}{B}\right)^{n+1} - 1} \cdot \left(\frac{C}{B}\right)^n$$

siendo $s=r/n$, $s/r=n$ y con linealidad en la deformación se puede expresar

esta SIMPLIFICACION DE NOMENCLATURA DE LAS EXPRESIONES para la

hipótesis de linealidad en las tensiones efectivas a efectos de

II) HIPOTESIS DE DISTRIBUCION LINEAL DE LAS DEFORMACIONES RELATIVAS

$$\xi_r - \xi_A = E_A$$

$$\xi_r - \xi_B = E_B$$

$$\xi_r - \xi_x = E_x$$

$$* \frac{u - u_B}{u_A - u_B} = \frac{\left\{ \left(\frac{E_A}{E_B} \right) - \left\{ \left(\frac{E_A}{E_B} \right) - 1 \right\} a \right\}^{-s+1} - 1}{\left(\frac{E_A}{E_B} \right)^{-s+1} - 1}$$

$$* \frac{k_{e(A-B)}}{k_{e0}} = \frac{(-s+1) \left(\frac{E_A}{E_B} - 1 \right)}{\left(\frac{E_A}{E_B} \right)^{-s+1} - 1} \cdot \left(\frac{\xi_r}{E_B} \right)^{-s}$$

Si $\sigma'_I \gg \sigma'_0$ y σ' y $\xi \rightarrow \xi_r$ para $\sigma' \rightarrow \infty$

$k_{e0} \rightarrow$ se corresponde con $\xi=0$ y $\sigma'=\sigma'_0$

$$\frac{\xi_r - \xi_x}{\xi_r} = \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'} \right)^{1/r} ; \quad \frac{k_e}{k_{e0}} = \left(\frac{\sigma'_{II} + \sigma'_0}{\sigma'_{II} + \sigma'} \right)^{s/r}$$

siendo $s=r.n$; $s/r=n$ y con linealidad en la deformación se puede expresar esta formulación en función de los parámetros definidos para la hipótesis de linealidad en las tensiones efectivas a efectos de permeabilidad.

$$\left(\frac{x}{B}\right)^{-1/r} = \left(\frac{A}{B}\right)^{-1/r} - \left\{ \left(\frac{A}{B}\right)^{-1/r} - 1 \right\} a \rightarrow \text{linealidad de deformación.}$$

$$* \quad \frac{u - u_B}{u_A - u_B} = \frac{\left(\frac{x}{B}\right)^{n-1/r} - 1}{\left(\frac{A}{B}\right)^{n-1/r} - 1} ;$$

$$* \quad \frac{k_{e(A-B)}}{k_{e0}} = \frac{(-nr+1) \left(\frac{A}{B}\right)^{-1/r} - 1}{\left(\frac{A}{B}\right)^{n-1/r} - 1} \cdot \left(\frac{C}{B}\right)^n$$

ANEJO D

MA GENERAL DE APLICACION DEL MODELO.
RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MENSULA CENTRAL DE
LA PRESA DE ALMENDRA

ANEJO D

(INDICE DE CONTENIDOS)

D.1 - FORMA GENERAL DE APLICACION DEL MODELO

D.1.1.- Consideraciones generales.

D.1.2.- Definición de las curvas características $u(x,H)$, $q(H)$, $\epsilon(x,H)$ con los datos disponibles de auscultación hidráulica-deformacional)

D.2 - APLICACION DEL MODELO CON LOS DATOS DISPONIBLES DE AUSCULTACION HIDRAULICA DEFORMACIONAL, EN LA MENSULA CENTRAL DE LA PRESA DE ALMENDRA.

D.2.1.- Datos disponibles de auscultación hidráulica y deformacional en la mensula central de la presa de Almendra para la aplicación, en ella del modelo.

FORMA GENERAL DE APLICACION DEL MODELO.

RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MENSULA CENTRAL DE LA PRESA DE ALMENDRA

D.2.2.- Curvas características obtenidas para el ajuste del modelo

D.2.3.- Deducción de las tensiones efectivas tomadas como base para el ajuste del modelo.

D.2.4.- Valores obtenidos para los parámetros n y ϵ' , con hipótesis fijas para las presiones del agua en los límites de la zona de filtración.

ANEJO D

(INDICE DE CONTENIDOS)

D.1.- FORMA GENERAL DE APLICACION DEL MODELO

D.1.1.- Consideraciones generales.

D.1.2.- Definición de las curvas características $u(x,H)$; $q(H)$; $\epsilon(x,H)$ con los datos disponibles de auscultación hidráulica-deformacional.

D.2.- APLICACION DEL MODELO CON LOS DATOS DISPONIBLES DE AUSCULTACION HIDRAULICA DEFORMACIONAL, EN LA MENSULA CENTRAL DE LA PRESA DE ALMENDRA.

D.2.1.- Datos disponibles en la ménsula central de la presa de Almendra para la aplicación, en ella del modelo.

D.2.1.1.- Datos disponibles de auscultación hidráulica.

D.2.1.2.- Datos disponibles de auscultación deformacional.

D.2.1.3.- Datos disponibles de estados tensionales.

D.2.2.- Curvas características $u(x,H)$; $q(H)$; utilizadas para el ajuste del modelo.

D.2.3.- Deducción de las tensiones efectivas tomadas como base para el ajuste del modelo.

D.2.4.- Valores obtenidos para los parámetros n y ϵ'_{11} con hipótesis fijas para las presiones del agua en los límites de la zona de filtración.

D.2.5.- Curvas características de caudales obtenidos por la modelización. Comparación con los caudales reales aforados en el drenaje.

D.1.- FORMA GENERAL DE APLICACION DEL MODELO

D.1.1.- Consideraciones generales

En el Anejo C, se ha desarrollado un modelo generico, basado en las hipótesis contenidas en el epigrafe C.4.1, cuya formulación se expresa en el epigrafe C.4.2. En este modelo generico intervienen como parámetros, las presiones del agua en los límites de la zona en la que se aplica y se utilizan como datos las relaciones $u(x,H)$ en algún punto determinado, en base a la relación permeabilidad equivalente-tensión efectiva definida en C.2.3.2 se establece la forma de distribución de

D.1.- FORMA GENERAL DE APLICACION DEL MODELO
continuidad del caudal, régimen de filtración Darcy y distribución lineal de las tensiones efectivas en la zona de filtración acotada para la modelización.

Se eligen como parámetros de ajuste del modelo, los estados tensionales al ser los datos normalmente disponibles, aún cuando proceden de modelos reducidos en los que no interviene para la obtención de las tensiones, los efectos internos del agua en el cimiento y las variaciones de módulo elástico de la roca por estado tensional.

La expresión de la distribución de presiones en un punto genérico de la zona de filtración, es de la forma:

$$\frac{u_x - u_B}{u_A - u_B} = \frac{[(x/B)^{n+1} - 1]}{(A/B)^{n+1} - 1} \quad (1)$$

D.1.1.- Consideraciones generales

En el Anejo C, se ha desarrollado un modelo genérico, basado en las hipótesis contenidas en el epígrafe C.4.1, cuya formulación se expresa en el epígrafe C.4.2. En este modelo genérico intervienen como parámetros, las presiones del agua en los límites de la zona en la que se aplica y se utilizan como datos las relaciones $u(x,H)$ en algún punto intermedio; en base a la relación permeabilidad equivalente-tensión efectiva definida en C.2.3.2 se establece la forma de distribución de subpresiones de acuerdo con las hipótesis de flujo paralelo al contacto, continuidad del caudal, régimen de filtración Darcy y distribución lineal de las tensiones efectivas en la zona de filtración acotada para la modelización.

Se eligen como parámetros de ajuste del modelo, los estados tensionales al ser los datos normalmente disponibles, aún cuando proceden de modelos reducidos en los que no interviene para la obtención de las tensiones, los efectos internos del agua en el cimiento y las variaciones de módulo elástico de la roca por estado tensional.

La expresión de la distribución de presiones en un punto genérico de la zona de filtración, es de la forma:

$$\frac{u_x - u_B}{u_A - u_B} = \frac{[(x/B)^{n+1} - 1]}{(A/B)^{n+1} - 1} \quad (1)$$

siendo: u_x ; presión del agua en un punto intermedio de la zona modelizada.

u_A ; presión del agua en el punto límite aguas arriba de la zona modelizada.

u_B ; presión del agua en el punto límite aguas abajo de la zona modelizada.

A, B y X: tensiones efectivas a efectos de permeabilidad en los límites y puntos intermedios de la zona modelizada.

$$(X = \sigma_x - u_x + \sigma'_{||}).$$

Supuesto conocidos al menos en tres puntos de la zona de filtración las relaciones características de variación de la presión con la altura de embalse, dos de estas relaciones se podrán utilizar como condiciones de contorno y la correspondiente al punto intermedio servirá para definir los valores de los parámetros n y $\sigma'_{||}$ siempre en la hipótesis de distribución lineal de las presiones efectivas entre los límites de la zona modelizada, y supuesto que en estos límites se conocen las tensiones efectivas para las distintas alturas de embalse.

La forma de aplicación del modelo en una zona acotada, perteneciente al contacto presa-cimiento en los límites fijados por la pantalla y el drenaje de filtración, reproducirá los siguientes pasos:

-A partir de los valores u_A , u_B y u_x , conocidos directamente por la auscultación hidráulica, para distintas alturas de embalse, se obtiene:

$$(u_x - u_B) / (u_A - u_B) = f_1(x, H)$$

-La posición relativa del piezómetro ó piezómetros que se utilizan para definir u_x , dentro de la zona de filtración modelizada, se expresan a través de la variable $a = x/L_{AB}$ siendo: x la distancia del piezómetro al límite de aguas arriba de la zona y L_{AB} la longitud total de la zona modelizada.

-La tensión efectiva a efectos de permeabilidad en el punto será: $X = A - (A-B)a$ como consecuencia de la hipótesis de distribución lineal de tensiones efectivas; el valor de la presión en un punto genérico de la zona modelizada, es sustituyendo en (1):

$$\frac{u(a) - u_B}{u_A - u_B} = \frac{[(A/B) - ((A/B) - 1)a]^{n+1} - 1}{(A/B)^{n+1} - 1} = f_1(a, H)$$

Esta distribución depende para cada altura de embalse de dos parámetros (A/B) y n , tendiendo a la distribución lineal cuando $A \rightarrow B$, es decir, cuando en la zona modelizada se produce una distribución uniforme en las tensiones efectivas.

$$A \rightarrow B; u(a) = (u_A - u_B) \cdot (1-a) + u_B$$

$$u \forall A \text{ y } B; \quad u(a=0) = u_A; \quad u(a=1) = u_B$$

-Supuesto dos alturas de embalse H_1 y H_2 para las que se conocen las tensiones efectivas en los límites tomados para la filtración (ϵ'_A y ϵ'_B), será posible obtener los valores de n y ϵ'_{II} que ajustan la curva de presiones del agua definidas en el punto (a); es decir, partiendo de los datos, que se indican a continuación se procede al ajuste de las curvas $(u(a)-u_B)/(u_A-u_B) = f_1(a, H)$ para las alturas H_1 y H_2 y se obtienen los valores de los parámetros n y ϵ'_{II} al aplicar a la ecuación (1) los valores de las tensiones efectivas en los límites A y B.

DATOS:

Para $H_1 \rightarrow u_{A1}, u_{B1}; u(a)_1$

$H_2 \rightarrow u_{A2}, u_{B2}; u(a)_2$ Auscultación Hidráulica

$$\epsilon'_{A1} = (\epsilon_{A1} - u_{A1}); \epsilon'_{A2} = (\epsilon_{A2} - u_{A2}) *$$

$$\epsilon'_{B1} = (\epsilon_{B1} - u_{B1}); \epsilon'_{B2} = (\epsilon_{B2} - u_{B2}) *$$

(*) Modelo reducido ó modelo teórico de cálculo combinado con los valores de las presiones obtenidas por auscultación hidráulica.

Caudales reales medidos en el drenaje

-Una vez obtenidos estos parámetros se puede establecer para todas las alturas de embalse observadas, las formas de variación de las tensiones efectivas ϵ'_A y ϵ'_B a través de las curvas características $(u(a)-u_B)/(u_A-u_B)=f_1(a,H)$ si se conocen VH los límites de las presiones en el contorno.

-La relación de caudales con la altura de embalse representada por medio de una función $q(H)$ servirá de contraste para confirmar la validez de los parámetros obtenidos.

La curva de caudales teórica definida por el modelo responde a la expresión:

$$q = (n+1) \cdot K_0 (C/B)^n (u_A - u_B) \cdot [(A/B) - 1] / [(A/B)^{n+1} - 1]$$

Forma de expresión de la relación de los caudales teóricos, para una siendo K_0 y C valores de referencia que definen la relación $K_{ex} \rightarrow \epsilon'$ para una altura de embalse en la que sea conocida. La comparación de las curvas de caudales reales, con las obtenidas en la modelización, se hará tomando como referencia una altura de embalse H_1 a la que corresponde un caudal q_1 tanto en el modelo como en el drenaje real. Esta altura de referencia y su caudal correspondiente servirán de comparación para estudiar la evolución de los caudales medidos en los drenes del cimiento con los obtenidos en el modelo:

Caudales reales medidos en el drenaje:

Altura de embalse tomada como referencia H_1 .

Caudal en drenaje que se corresponde con la altura $H_1 \rightarrow q_1$.

Forma de expresión de los caudales reales en el drenaje para una altura genérica H ; $(q/q_1) \cdot (H_1/H) = f_2(H)$.

Caudales modelizados

-Altura de embalse tomada como referencia H_1 .

-Curva de caudales teóricos definidos por el modelo para H_1 .

$$q_1 = \frac{(n+1) \cdot [(A/B-1)]_1}{[(A/B)^{n+1}-1]_1} K_0 \cdot (C/B)_1^n (u_A-u_B)_1$$

-Forma de expresión de la relación de los caudales teóricos, para una altura genérica H , según el modelo:

$$\frac{q}{q_1} = \frac{[(A/B-1)]}{[(A/B)^{n+1}-1]} \cdot \frac{[(A/B)^{n+1}-1]_1}{[(A/B-1)]_1} \cdot \left(\frac{B_1}{B}\right)^n \cdot \frac{(u_A-u_B)}{(u_A-u_B)_1}$$

La forma de aplicación del modelo a una sección completa de filtración vendrá condicionada por la precisión y el grado de certidumbre que se tenga sobre los datos de auscultación hidráulica y sobre los estados tensionales que se consideren valores fijos para el ajuste.

D.1.2. Con estas salvedades y siempre tomando dos estados tensionales conocidos para unas alturas H_1 y H_2 la definición de los parámetros ϵ' y n se hará a partir de las curvas de relación (u_x/H) , que representan una medición intensiva puntual y dan un mayor grado de certidumbre a los valores medidos. La curva de caudales reales servirá para el contraste de los valores obtenidos en la modelización, con los valores reales en el drenaje.

También, se podrá proceder al ajuste en base a tres estados tensionales conocidos utilizando para ello la curva de relación q/H ; en este caso las curvas de definición de presiones en los puntos de la zona de filtración, servirán de contraste a los resultados obtenidos al compararse con las curvas características reales obtenida por la auscultación. La curva de relación $q(H)$, representa una medición extensiva a toda la superficie de filtración por lo que, los valores medidos tienen una incertidumbre mayor al ser el caudal del drenaje una parte del caudal total de la filtración que puede variar en su relación q_{TOTAL}/q_{DRENES} para las distintas alturas de embalse.

D.1.2.- Definición de las curvas características $u(x,H)$; $q(H)$ y $\epsilon(x,H)$

Los datos de auscultación hidráulica-deformacional proporcionan valores de las presiones manométricas en distintos puntos del cimiento, caudales de filtración recogidos por el sistema de drenaje y desplazamientos relativos entre puntos de la estructura de la presa ó en puntos de ella próximos al cimiento y referidos a un anclaje profundo. La forma de evolución de $u(x,H)$; $q(H)$ y $\epsilon(x,H)$, está limitada para su observación a los recorridos normales de oscilación de embalse que, en las presas estudiadas, suelen ser no mayores de un 50% del máximo posible, por sus límites de explotación normal.

Los niveles de embalse más bajos, que se pueden observar con sistematización, se producen en épocas de estiaje y suelen ser poco estables en el tiempo al iniciarse en los primeros meses de otoño el nuevo llenado de embalse. Por este motivo, la observación de las magnitudes hidráulicas en los niveles más bajos, suele estar afectada por los efectos temporales de inercia a la disipación de subpresiones y caudales a los que acompañan los efectos de recuperación de giros en el cimiento, dando valores que en realidad se corresponden con niveles de embalse superior y que tienden en el tiempo a estabilizarse en valores menores si el embalse permanece fijo.

En épocas invernales los efectos de nivel de embalse, mantenido a cotas altas durante períodos prolongados, se superpone a los de estado térmico, produciéndose la lógica oscilación de las magnitudes hidráulicas por la suma en el cimientó de las tensiones que proceden de la deformación conjunta de arcos y ménsulas al modificarse las condiciones térmicas de la estructura del hormigón. La limitación de datos disponibles, a las alturas máximas de embalse, reduce la interpretación del modelo al no conocerse la forma de evolución de las presiones, los caudales y los giros de cimientó desde su origen, en situaciones de nivel de embalse bajo, con efecto predominante de peso propio. Se llega así a la necesidad de elegir en el modelo como parámetro de interpretación, la resistencia a "tracción hidráulica" del cimientó (σ'_{11}) y se estudia la forma de evolución de los estados tensionales e hidráulicos hacia un estado tomado como límite de fisuración y que se corresponde con una fisuración neta aguas arriba del cimientó.

En el proceso total de decompresión por elevación del nivel de embalse, existe como condicionante fundamental la extensión de pequeñas discontinuidades aguas arriba; la influencia notable en las magnitudes hidráulicas dificulta la aplicación del modelo con los datos disponibles, y los efectos conjuntos de flexotracción que se tratan de reflejar se hacen discontinuos, al aparecer zonas netamente fisuradas aguas arriba ya preestablecidas, a partir de la altura de embalse que se ha dado en denominar "umbral" y que tipifica el cambio neto de comportamiento hidráulico en el cimientó.

Teniendo en cuenta estas observaciones previas, la forma de expresión de las magnitudes hidráulicas-deformacionales se hará a partir de los valores $u(x,H)$; $q(H)$; $\xi(x,H)$ que pueden ser medidos y se definirán las curvas características, modelizando por ajuste matemático las tendencias que resultan más claras en las formas de evolución de las magnitudes medidas para los recorridos de embalse disponibles.

Se elige, para expresar estas magnitudes, relaciones basadas siempre en el tipo de evolución, definido por las curvas:

$$u(x,H) = (du/dH)_{H=0} H + (u_1 - (du/dH)_{H=0} H_1) (H/H_1)^r$$

$$q(H) = (dq/dH)_{H=0} H + (q_1 - (dq/dH)_{H=0} H_1) (H/H_1)^r$$

$$\xi(x,H) = (d\xi/dH)_{H=0} H + (\xi_1 - (d\xi/dH)_{H=0} H_1) (H/H_1)^r$$

Estas curvas tienen como puntos de ajuste fundamentales $H=H_1$ y $H=0$.

Expresión general

Para $(H=H_1)$; $u(x,H) = u_1$; $q(H) = q_1$; $\xi(x,H) = \xi_1$;

Para $(H=0)$; $u(x,H) = 0$; $q=0$; $\xi=0$.

Expresión de (dm/dH)

y se establecen con dos criterios: definir un estado inicial en base a las acciones de compresión debidas al peso propio y un estado de referencia que "tipifica" el cambio neto de comportamiento hidráulico en el

cimiento. La variable H expresa la modificación de nivel de embalse a partir de un nivel de comparación fijo, que se toma en la galería baja de la presa, en la ménsula central.

Para calcular los parámetros que expresan las tendencias de las curvas reales, se toma como referencia la altura aproximada de embalse que corresponde con el nivel denominado altura de embalse "umbral", a partir del cual se manifiestan notablemente los efectos de extensión. Para esta altura los valores de u_{crit} , q_{crit} y ξ_{crit} servirán de comparación con los correspondientes a alturas de embalses superiores e inferiores a ella. Para la definición de los parámetros $(du/dH)_0$ y r se utilizan las alturas máximas y mínima de observación y los valores de u , q y ξ conocidos en ellas por auscultación hidráulica-deformacional.

Siendo m la magnitud física cuyos valores reales se ajustan, las curvas características genéricas que representan las tendencias observadas, serán del tipo:

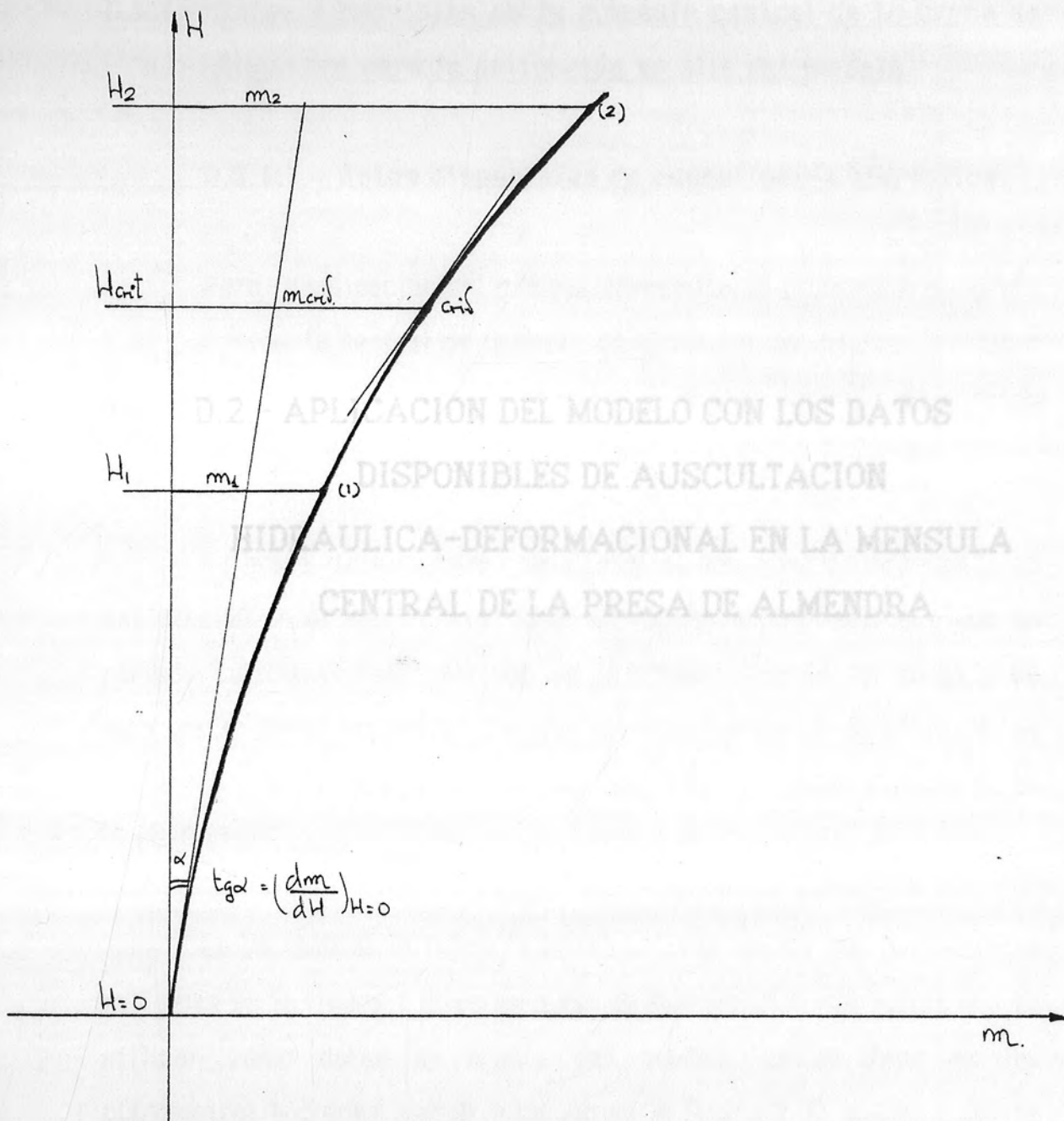
Expresión general

$$m = (dm/dH)_{H=0} H + (m_{crit} - (dm/dH)_{H=0} H_{crit}) (H/H_{crit})^r$$

Expresión de (dm/dH)

$$dm/dH = (dm/dH)_{H=0} + r \cdot (m_{crit}/H_{crit} - (dm/dH)_{H=0}) \cdot (H/H_{crit})^{r-1}$$

para $H=H_{crit}$; $(dm/dH)_{H=H_{crit}} = r \cdot (m_{crit}/H_{crit}) + (dm/dH)_{H=0}(1-r)$



ESQUEMA DE LAS CURVAS CARACTERISTICAS ($u(x,H)$, $q(H)$, $S(x,H)$)
TOMADAS PARA EL AJUSTE DE LAS MAGNITUDES HIDRAULICO-DEFORMACIONALES
MEDIDAS POR AUSCULTACION

D.2.1.- Datos disponibles en la ménsula central de la presa de Almendra para la aplicación en ella del modelo

D.2.1.1.- Datos disponibles de auscultación hidráulica

Para la aplicación del modelo, formulado en el Anejo C (epígrafe C.4) a la ménsula central de la presa de Almendra, se utilizan los datos de auscultación hidráulica y de deformación, obtenidos en el período comprendido entre las fechas: (1) - 11-I-79 y (2) - 9-VII-81.

D.2.- APLICACION DEL MODELO CON LOS DATOS DISPONIBLES DE AUSCULTACION

HIDRAULICA-DEFORMACIONAL EN LA MENSULA CENTRAL DE LA PRESA DE ALMENDRA

La presa de Almendra, construida en los años 60, comienza su explotación en el año 1961. Los datos de auscultación hidráulica y de deformación, obtenidos en el período suficientemente alejado de la primera puesta en carga y se interpretan como "estables", para la definición a través de ellos de las curvas características del comportamiento hidráulico-deformacional, en el contacto.

La sección de la ménsula central, tiene las formas geométricas definidas en la figura 1 y las medidas de auscultación hidráulica que se utilizan como datos de ajuste del modelo, se obtienen en los piezómetros y drenes que se incluyen en la figura 2. El cuadro I define las características geométricas necesarias para la identificación de las medidas piezométricas con las posiciones relativas de los piezómetros y el drenaje. El cuadro II resume los valores de presiones y caudales representados en las figuras sucesivas (3, 4, 5, 6 y 7).

D.2.1.- Datos disponibles en la ménsula central de la presa de Almendra para la aplicación en ella del modelo

D.2.1.1.- Datos disponibles de auscultación hidráulica

Para la aplicación del modelo, formulado en el Anejo C (epígrafe C.4) a la ménsula central de la presa de Almendra, se utilizan los datos de auscultación hidráulica deformacional correspondiente al período comprendido entre las fechas: ① → 11-I-79 y ③① → 9-VII-81.

La presa de Almendra, construida en los años 60, comienza su explotación en el año 71. Los datos utilizados se corresponden con un período suficientemente alejado de la primera puesta en carga y se interpretan como "estables", para la definición a través de ellos de las curvas características del comportamiento hidráulico-deformacional, en el contacto.

La sección de la ménsula central, tiene las formas geométricas definidas en la figura 1 y las medidas de auscultación hidráulica que se utilizan como datos de ajuste del modelo, se obtienen en las piezómetros y drenes que se incluyen en la figura 2. El cuadro I define las características geométricas necesarias para la identificación de las medidas piezométricas con las posiciones relativas de los piezómetros y el drenaje. El cuadro II resume los valores de presiones y caudales representados en las figuras sucesivas (3, 4, 5, 6 y 7).

INDICE DE FIGURAS Y CUADROS

Figura 1.- Forma geométrica de la ménsula central.

Figura 2.- Situación de los piezómetros y el drenaje en el contacto de la ménsula central con el terreno.

Cuadro I.- Características geométricas de la disposición de piezómetros y drenes.

Cuadro II.- Valores de la presión del agua en los piezómetros disponibles. Valores del caudal en el Dren P.B.24.

Figura 3(1).- Esquema simplificado de la distribución de subpresiones en el contacto presa-cimiento.

Figura 3(2).- Esquema simplificado de la distribución de subpresión en un plano profundo del cimiento.

Figura 4.- Evolución de las presiones sobre cimiento con la altura de embalse, en el piezómetro PRM-26 (P-1) tomado como límite aguas arriba de la zona de filtración.

Figura 5.- Evolución de las presiones sobre cimiento con la altura de embalse, en el piezómetro PPM-26 (P-2) tomado como indicador de la relación $(u(x,H))$ en un punto intermedio de la zona de filtración.

PASA DE ALMENDRA: MENSURA CENTRAL

Figura 6(1) y (2).- Evolución de las presiones en el cimiento, con la altura de embalse, en los piezómetros PPMF (P-A) y PBMF (P-B).

Figura 7.- Evolución de los caudales de filtración con la altura de embalse en el Dren Profundo PB-24.

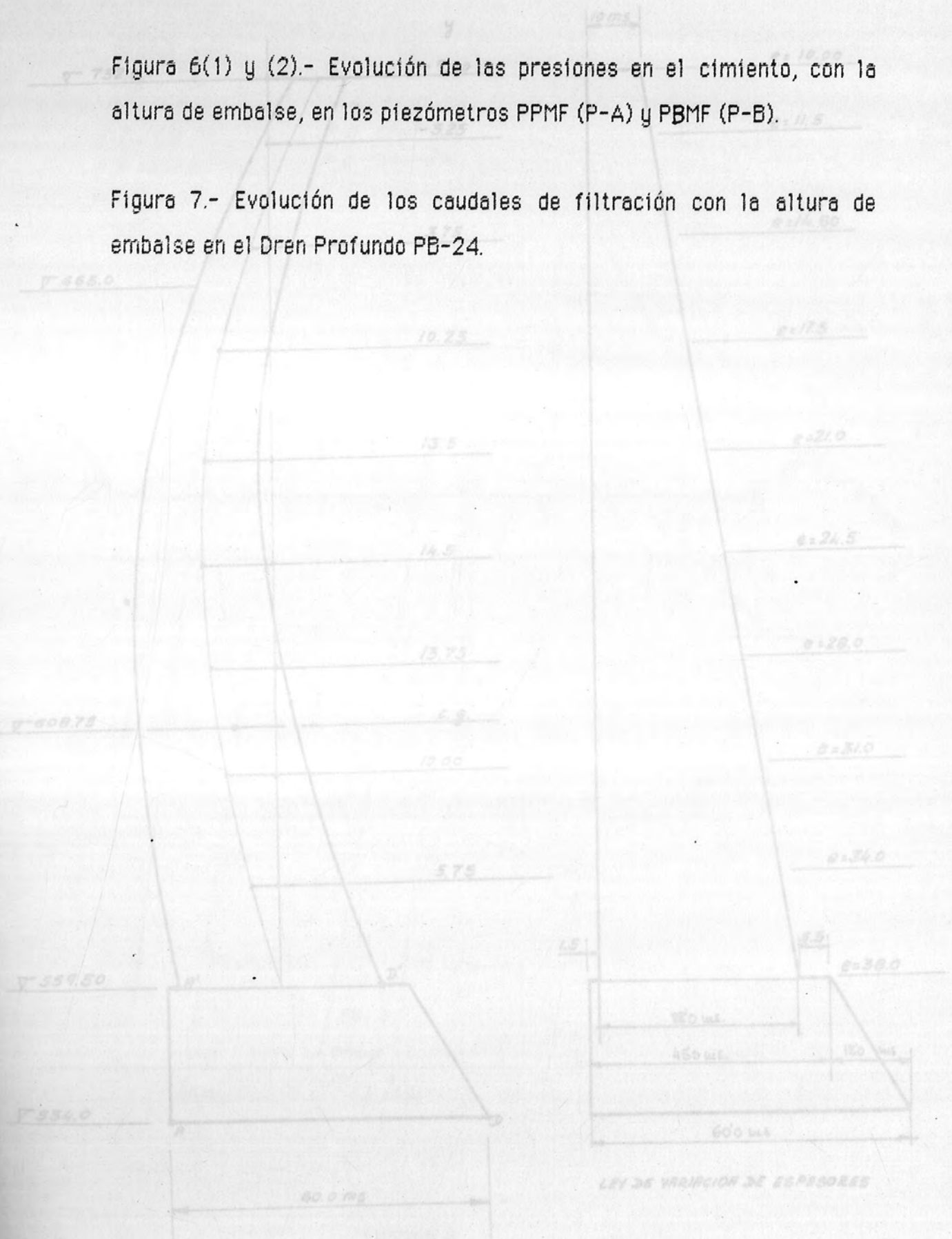


FIGURA 1

PRESA DE ALMENDRA. MENSULA CENTRAL

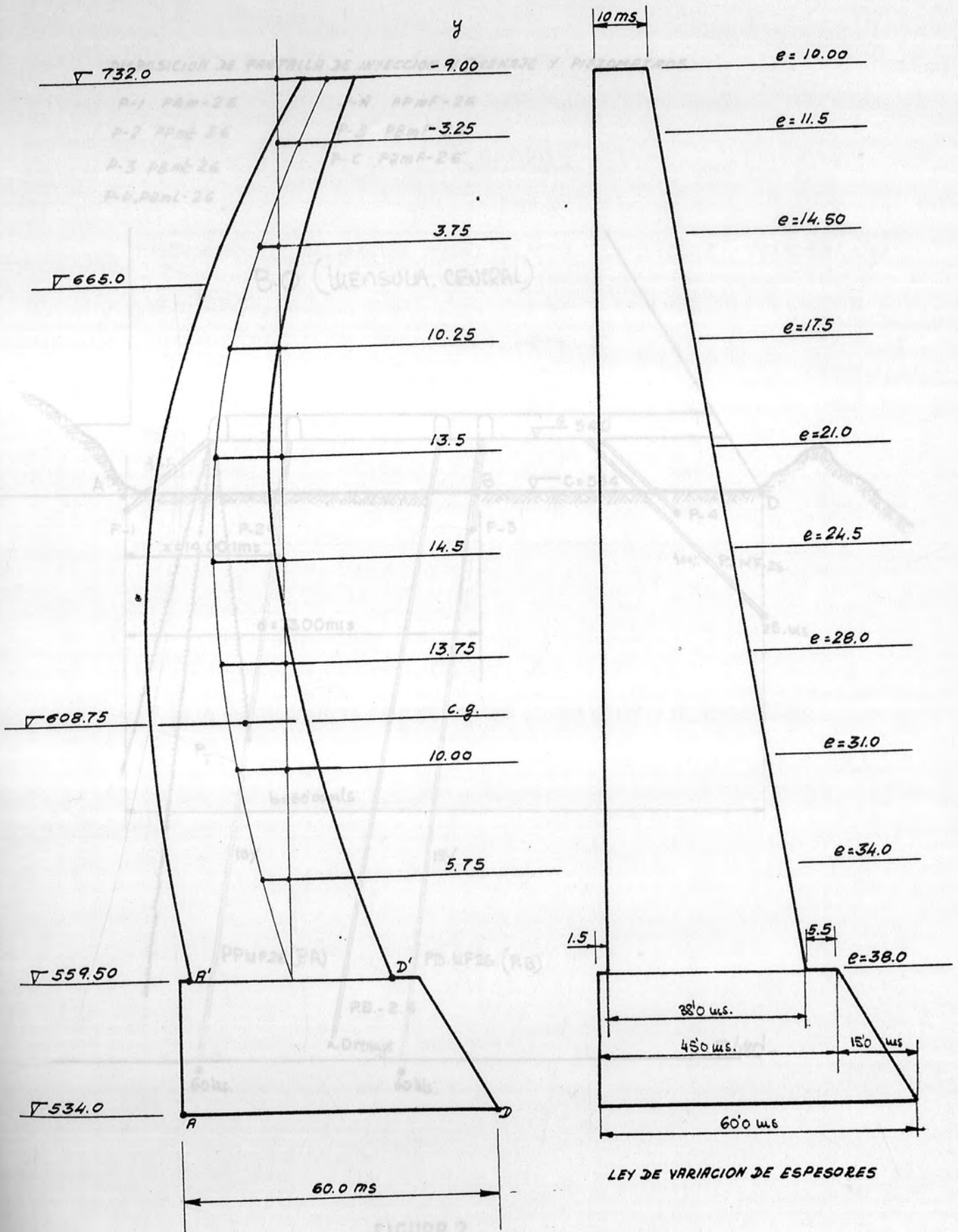


FIGURA 1

DISPOSICION DE PANTALLA DE INYECCION Y DRENAJE Y PIEZOMETROS

P-1 PRm-26

P-A PPMF-26

P-2 PPM-26

P-B PBMF-26

P-3 PBM-26

P-C PBMF-26

P-4, PjML-26

CUADRO I

PIEZOMETRO	INCLINACION	PROF. TALADRO	COTA FONDO	POSICION (x/b)
------------	-------------	---------------	------------	----------------

B.O (MEANSULA. CENTRAL)

PRM-26(P-1)	75%	3 ms	531	0
-------------	-----	------	-----	---

PPM-26(P-2)	0%	3 ms	531	0.233
-------------	----	------	-----	-------

PBM-26(P-3)	0%	3 ms	531	0.550
-------------	----	------	-----	-------

PjML-26(P-4)	100%	3 ms	531	0.933
--------------	------	------	-----	-------

PPMF-26(P-A)	15%	3 ms	534	0.117
--------------	-----	------	-----	-------

PBMF-26(P-B)	15%	3 ms	534	0.808
--------------	-----	------	-----	-------

PjMF-26(P-C)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-D)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-E)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-F)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-G)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-H)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-I)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-J)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-K)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-L)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-M)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-N)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-O)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-P)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-Q)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-R)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-S)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-T)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-U)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-V)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-W)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-X)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-Y)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-Z)	100%	3 ms	534	0.808
--------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-AA)	100%	3 ms	534	0.808
---------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-AB)	100%	3 ms	534	0.808
---------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-AC)	100%	3 ms	534	0.808
---------------	------	------	-----	-------

PjMF-26(P-AD)	100%	3 ms	534	0.808
---------------	------	------	-----	-------

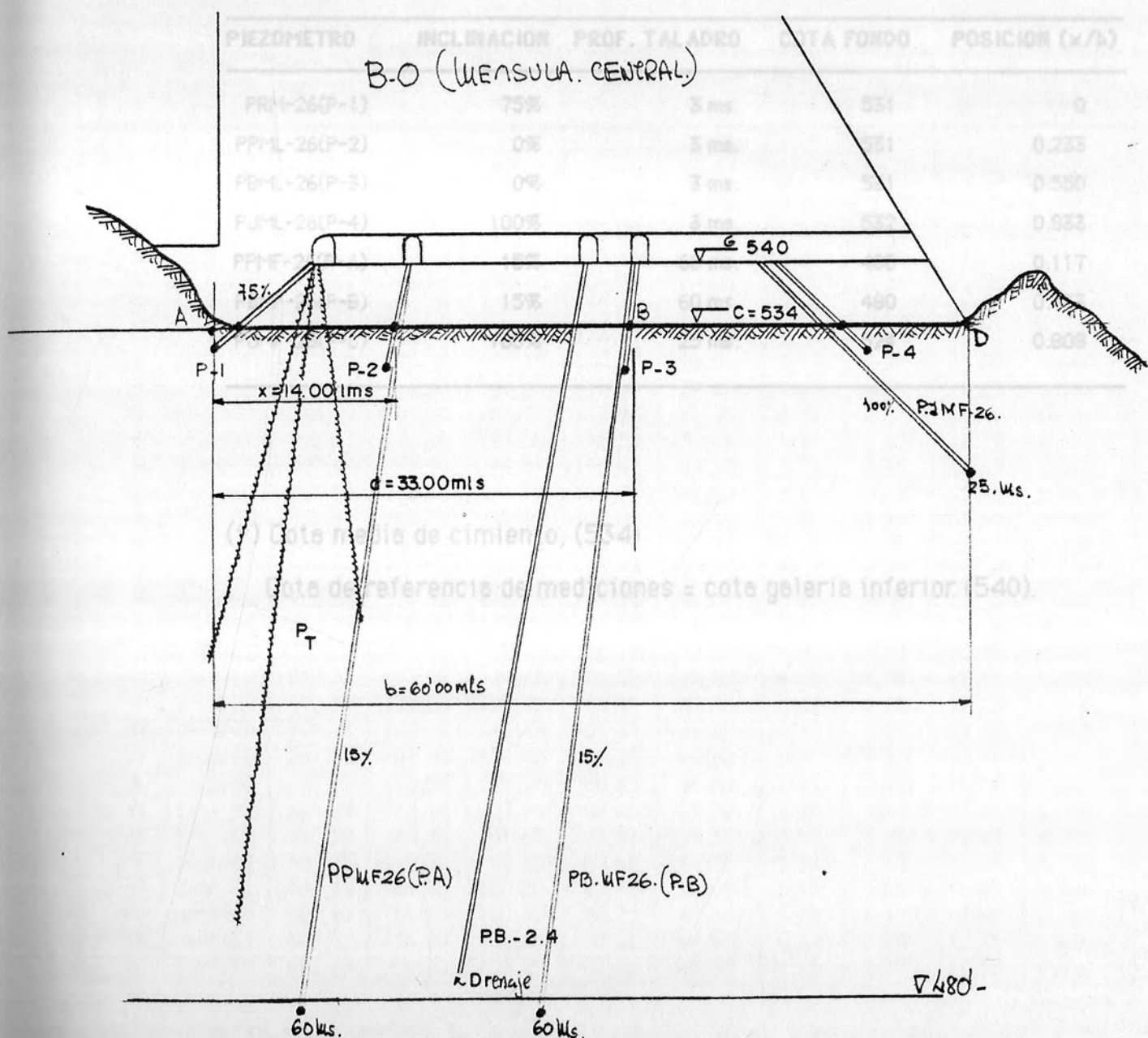


FIGURA 2

CUADRO II

VALORES DE LAS PRESIONES DEL BLOQUE O CAJALAS TRENADAS

CUADRO I

PIEZOMETRO	INCLINACION	PROF. TALADRO	COTA FONDO	POSICION (x/b)
PRM-26(P-1)	75%	3 ms.	531	0
PPML-26(P-2)	0%	3 ms.	531	0.233
PBML-26(P-3)	0%	3 ms.	531	0.550
PJML-26(P-4)	100%	3 ms.	532	0.833
PPMF-26(P-A)	15%	60 ms.	480	0.117
PBMF-26(P-B)	15%	60 ms.	480	0.433
PJMF-26(P-C)	100%	25 ms.	524	0.808

(*) Cota media de cimiento, (534)

Cota de referencia de mediciones = cota galería inferior (540).

* Presiones medidas en altura de columna de agua sobre la cota 534.
* Caudales medidos en P.B. 24 en litros/min.

CUADRO II

VALORES DE LAS PRESIONES DEL AGUA EN EL BLOQUE O. CAUDALES DRENADOS

	FECHA DE MEDICIÓN	COTA DE EMBALSE	PIEZOMETRO PRML P-1	PIEZOMETRO PRMF P-A	PIEZOMETRO PPML P-2	PIEZOMETRO PBMLF P-B	PIEZOMETRO PBML P-3	PIEZOMETRO PJM.F P-D	PIEZOMETRO PJML P-4	CAUDALES EN DREN PB.24
1	11-I-79	713,72	176,80	121,75		49,70	5,74	9,85	12,25	0,525
2	1-II-79	720,15	181,30	135,05	125,15	56,90	5,94	9,15	12,25	0,527
3	1-III-79	729,48	186,30	129,45	113,25	62,10	6,45	9,15	13,35	0,757
4	5-IV-79	729,90	187,10	121,45	111,15	60,50	6,24	7,35	13,35	0,640
5	3-V-79	729,65	186,80	118,65	109,45	61,00	6,09	6,35	13,55	0,660
6	7-VI-79	729,99	190,10	124,95	117,45	61,10	6,23	6,35	13,55	0,674
7	5-VIII-79	725,41	188,10	128,45	125,15	59,10	6,14	6,35	13,35	0,718
8	2-VIII-79	722,28	186,10	127,75	122,75	56,00	5,92	6,35	13,35	0,640
9	6-IX-79	719,60	182,50	125,05	118,05	54,20	5,95	6,35	13,25	0,591
10	4-X-79	715,32	177,90	122,95	113,95	52,30	5,74	6,35	13,15	0,640
11	1-XI-79	713,11	178,80	121,05	110,95	51,00	5,61	6,35	13,15	0,625
12	13-XII-79	707,46	173,50	116,45	106,45	49,20	5,74	6,35	13,15	0,500
13	10-I-80	705,38	170,30	115,65	105,95	48,40	5,60	6,35	12,95	0,560
14	7-II-80	704,42	168,50	113,95	105,05	48,20	5,67	6,35	13,05	0,500
15	6-II-80	704,95	168,80	114,25	105,95	48,30	5,86	6,35	13,05	0,500
16	1-IV-80	702,53	166,30	113,45	104,25	47,70	5,95	6,35	13,05	0,540
17	15-IV-80	708,86	171,30	116,45	108,45	49,30	5,93	6,35	12,95	0,490
18	12-VI-80	711,79	173,90	118,95	11,25	49,80	5,94	6,35	13,15	0,550
19	10-VII-80	712,82	176,30	118,25	108,15	50,00	5,91	6,35	12,95	0,528
20	7-VII-80	712,77	173,90	119,65	109,45	50,30	6,09	6,35	13,15	0,600
21	4-IX-80	712,63	175,30	123,45	108,45	50,20	6,02	6,35	13,05	0,540
22	2-X-80	707,14	167,30	116,15	101,45	49,00	6,18	6,35	13,15	0,500
23	13-XI-80	701,02	161,30	111,45	95,05	46,90	6,17	6,35	13,15	0,496
24	11-XII-80	691,92	152,50	105,25	88,25	44,50	5,92	6,35	13,05	0,458
25	8-I-81	685,85	147,10	102,45	84,45	42,50	5,66	6,35	12,85	0,406
26	5-II-82	686,28	146,30	101,45	83,65	42,50	5,56	6,35	12,95	0,452
27	5-III-81	683,75	144,30	99,65	83,45	41,70	5,64	6,35	12,95	0,394
28	2-IV-81	684,44	146,30	100,20	82,95	42,00	5,85	6,35	12,95	0,393
29	14-V-81	689,80	151,80	102,85	86,25	43,10	6,10	6,35	12,95	0,398
30	11-VI-81	692,72	154,80	104,45	87,25	43,50	6,12	6,35	12,35	0,408
31	9-VII-81	693,69	155,80	105,45	87,25	43,50	6,39	6,35	12,55	0,410

* Presiones medidas en altura de columna de agua sobre la cota 534'.

* Caudales medidos en P.B.24 en litros/min.

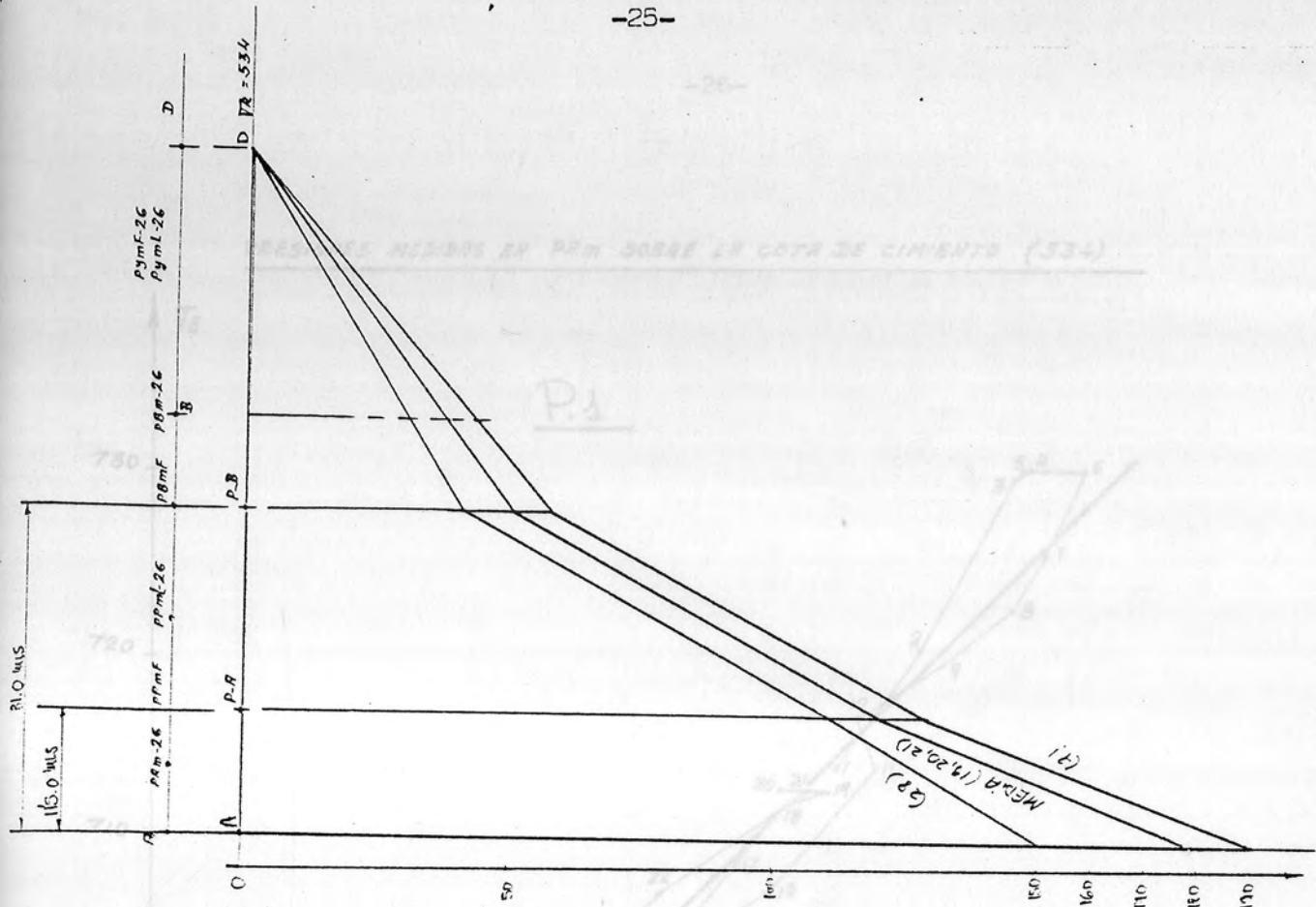


FIGURA 32)

USORRE LA 61A 534'
(MIS. COLUMNA DE AGUA)

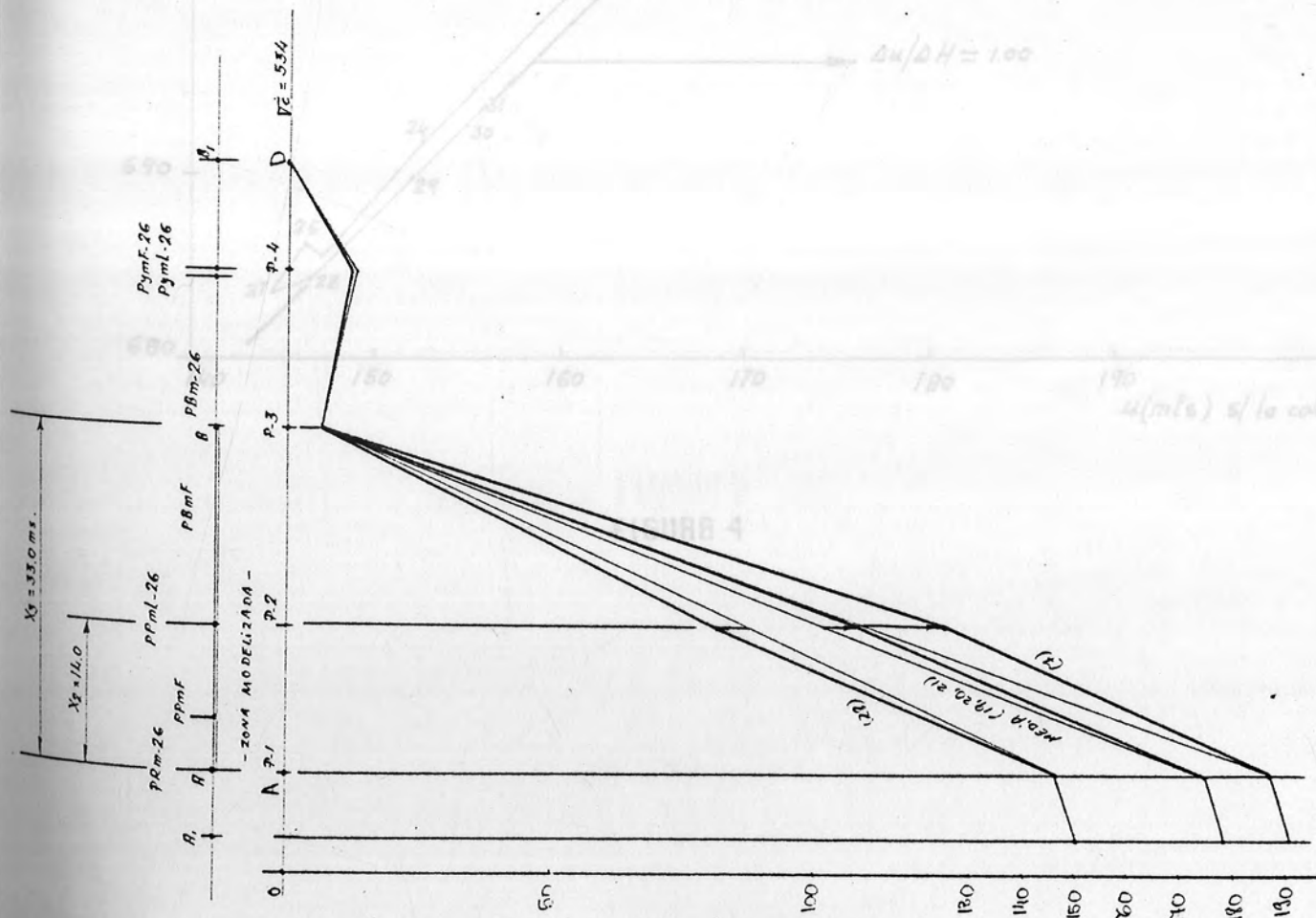


FIGURA 30)

USORRE LA 7534'
(MIS. de columna de agua)

PRESIONES MEDIDAS EN PRM SOBRE LA COTA DE CIMIENTO (534)

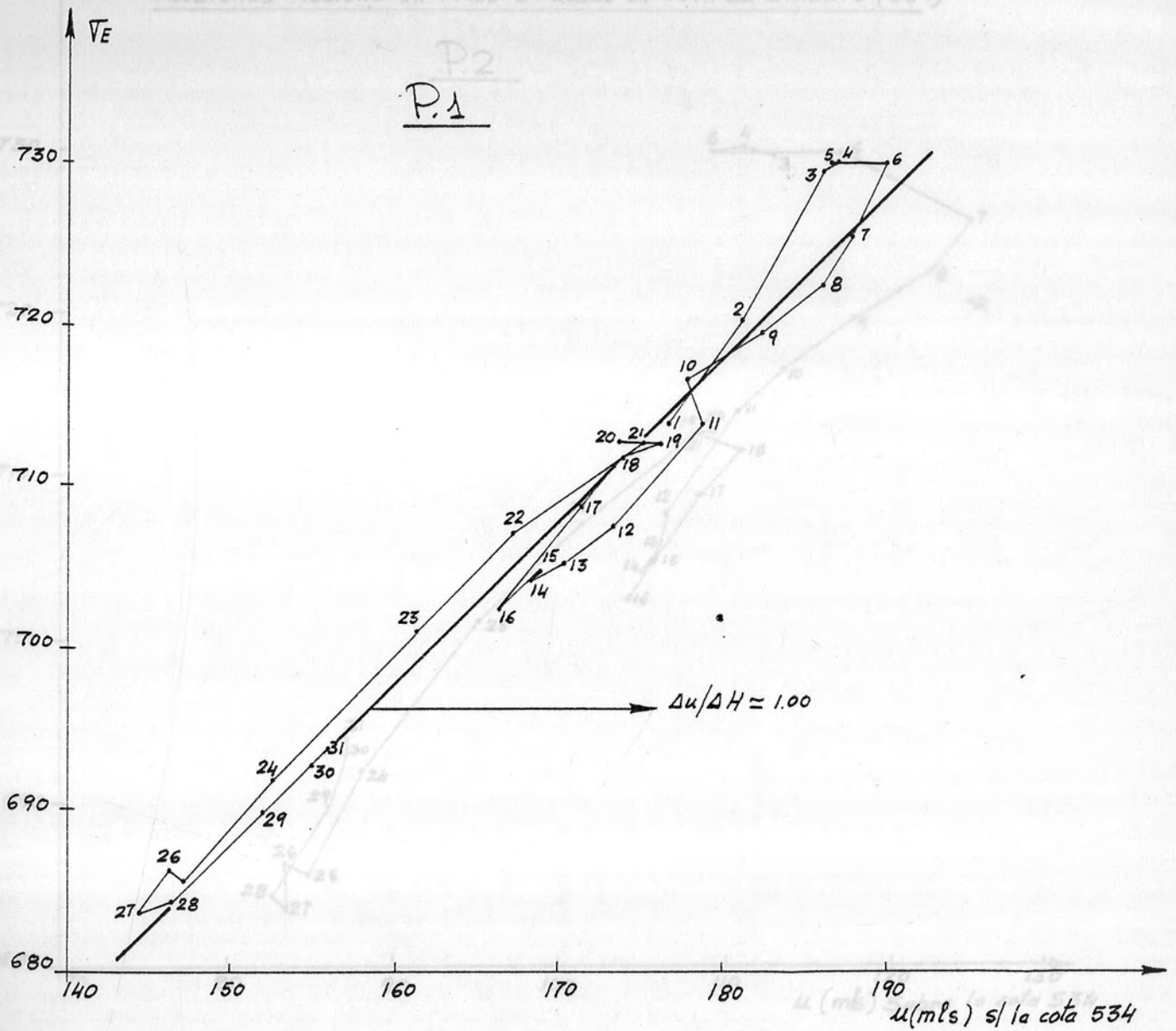


FIGURA 5
FIGURA 4

PRESIONES MEDIDAS EN PPML-2 SOBRE LA COTA DE CIMIENTO (534)

P.2

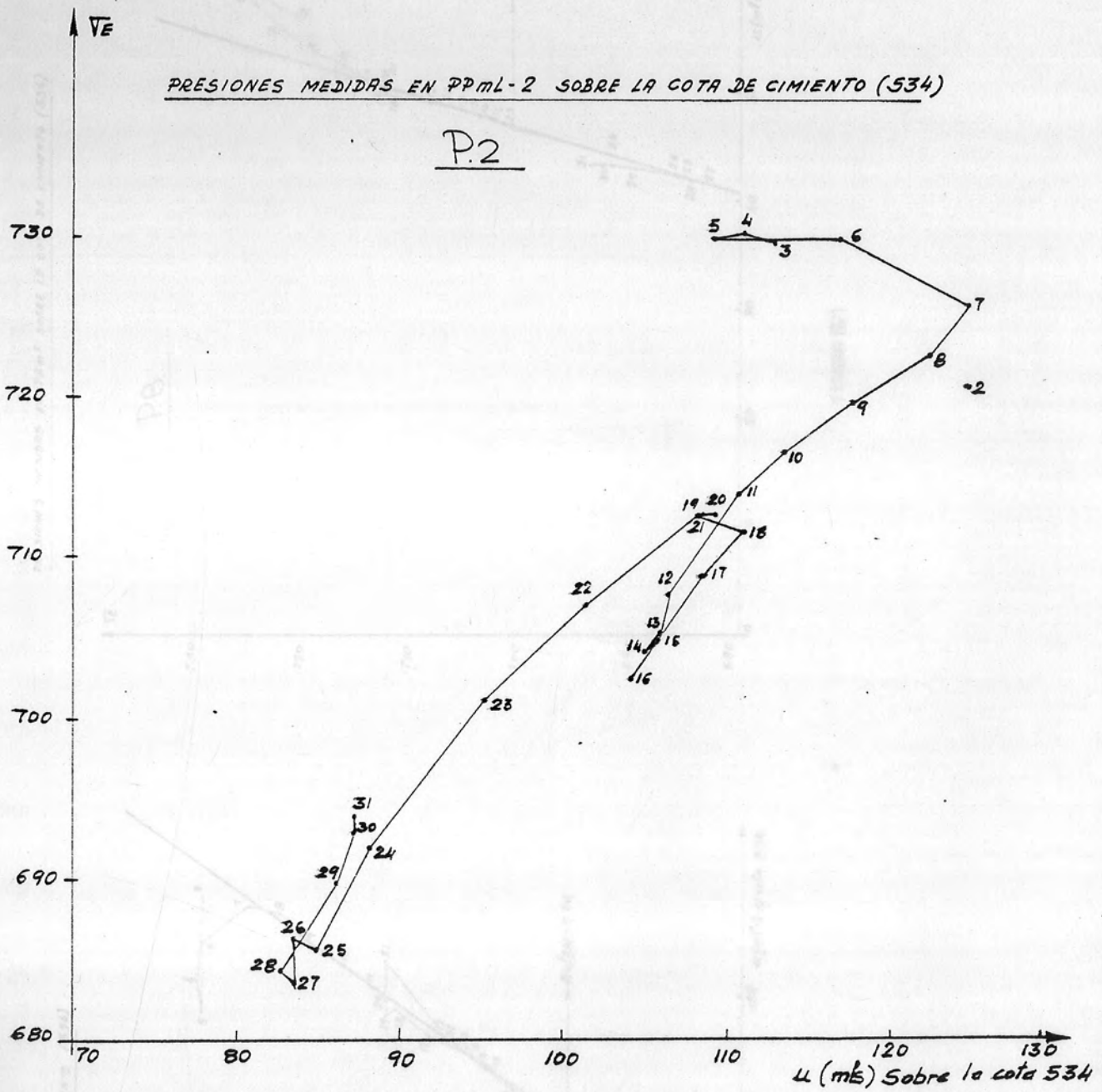


FIGURA 5

PRESIONES MEDIDAS EN PPMF SOBRE LA COTA DE CIMIENTO (534)

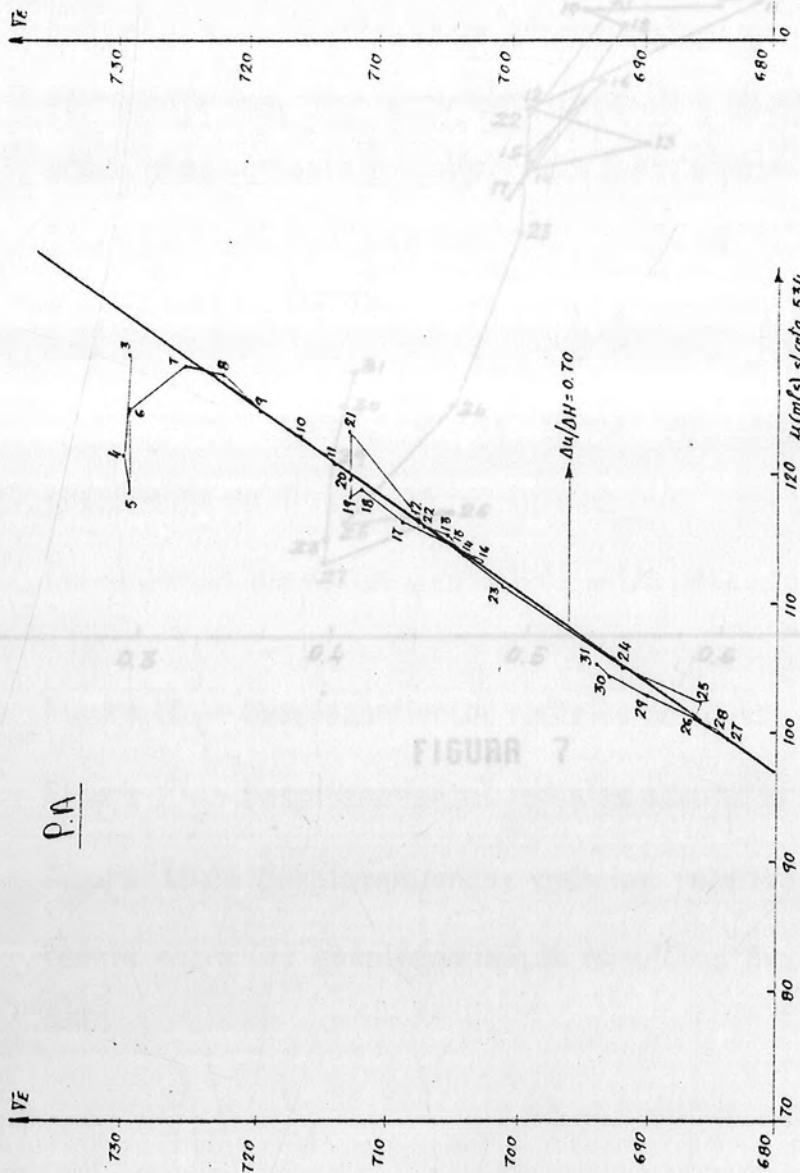


FIGURA 60

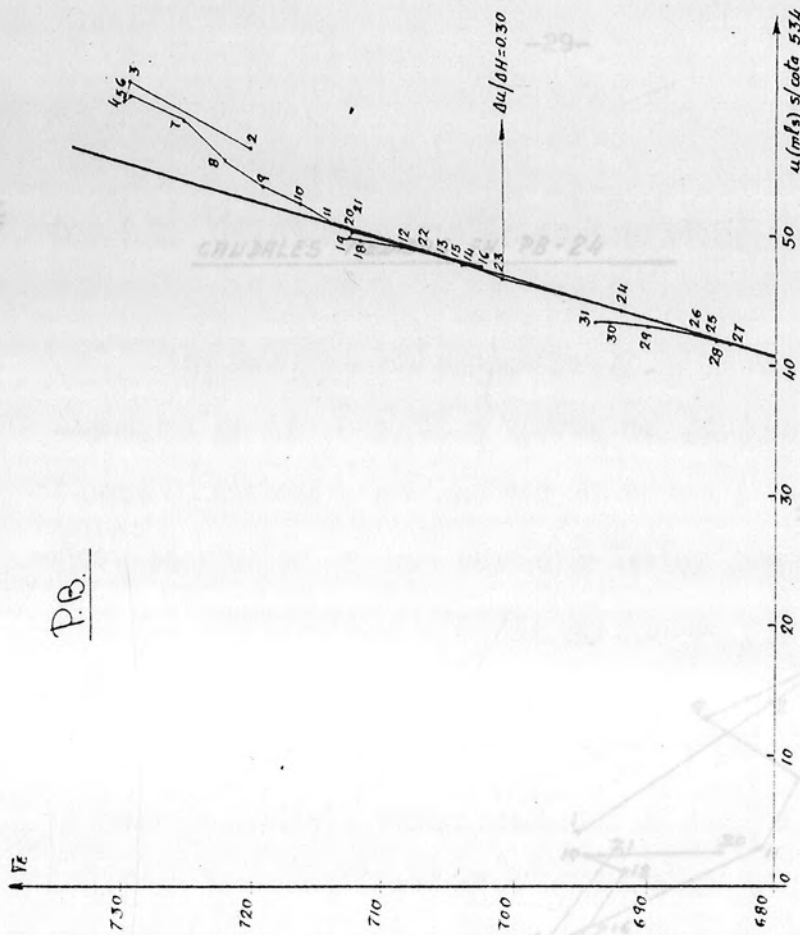


FIGURA 62

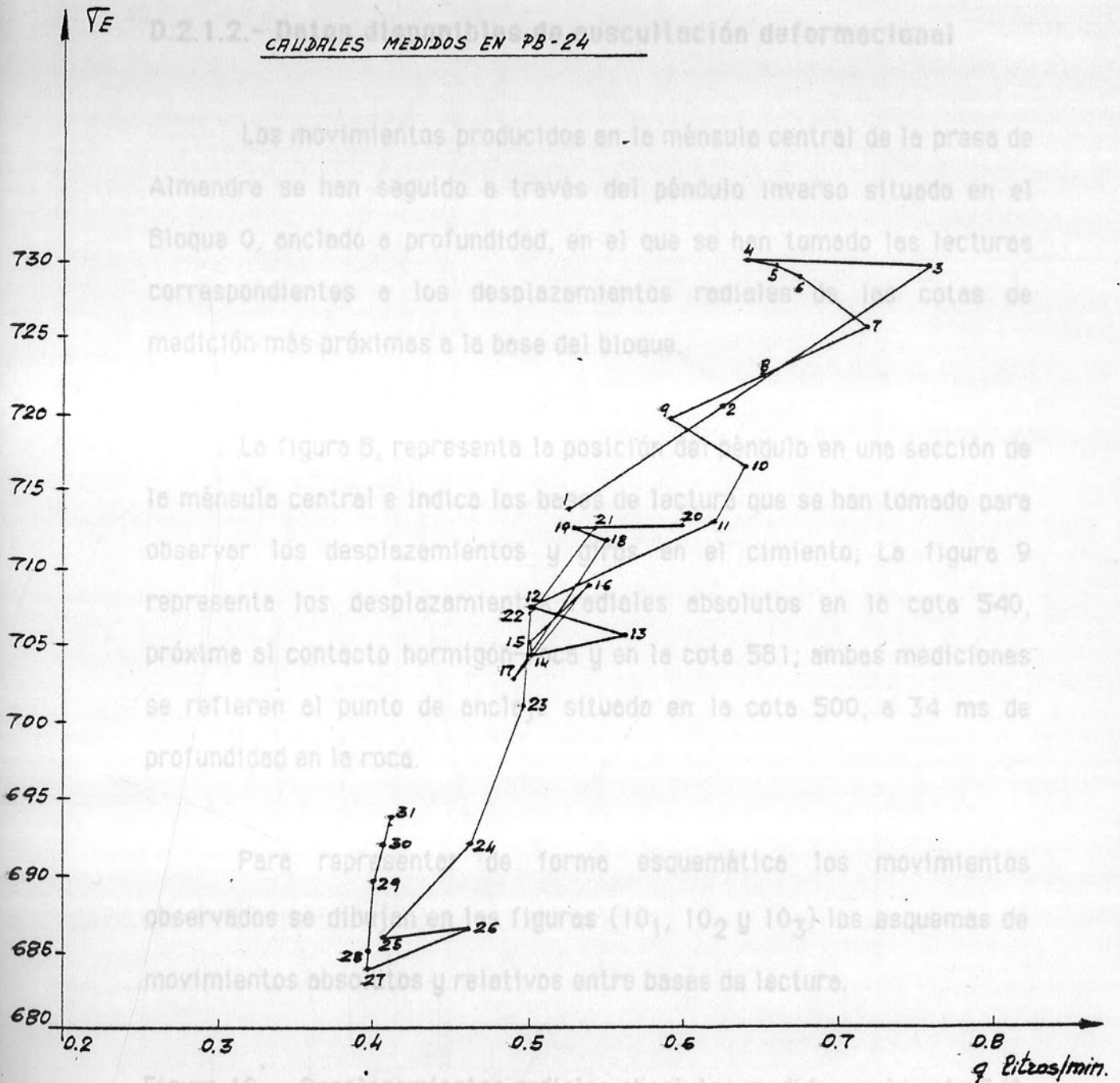


FIGURA 7

D.2.1.2.- Datos disponibles de auscultación deformacional

Los movimientos producidos en la ménsula central de la presa de Almendra se han seguido a través del péndulo inverso situado en el Bloque 0, anclado a profundidad, en el que se han tomado las lecturas correspondientes a los desplazamientos radiales de las cotas de medición más próximas a la base del bloque.

La figura 8, representa la posición del péndulo en una sección de la ménsula central e indica las bases de lectura que se han tomado para observar los desplazamientos y giros en el cimientó; La figura 9 representa los desplazamientos radiales absolutos en la cota 540, próxima al contacto hormigón-roca y en la cota 581; ambas mediciones se refieren al punto de anclaje situado en la cota 500, a 34 ms de profundidad en la roca.

Para representar de forma esquemática los movimientos observados se dibujan en las figuras (10₁, 10₂ y 10₃) los esquemas de movimientos absolutos y relativos entre bases de lectura.

Figura 10₁.- Desplazamientos radiales absolutos medidos en la cota 540.

Figura 10₂.- Desplazamientos radiales absolutos medidos en la cota 581.

Figura 10₃.- Desplazamientos radiales relativos, obtenidos por diferencia entre los desplazamientos absolutos medidos a las cota 581 y 540.

PENDULO 3. BLOQUE-O

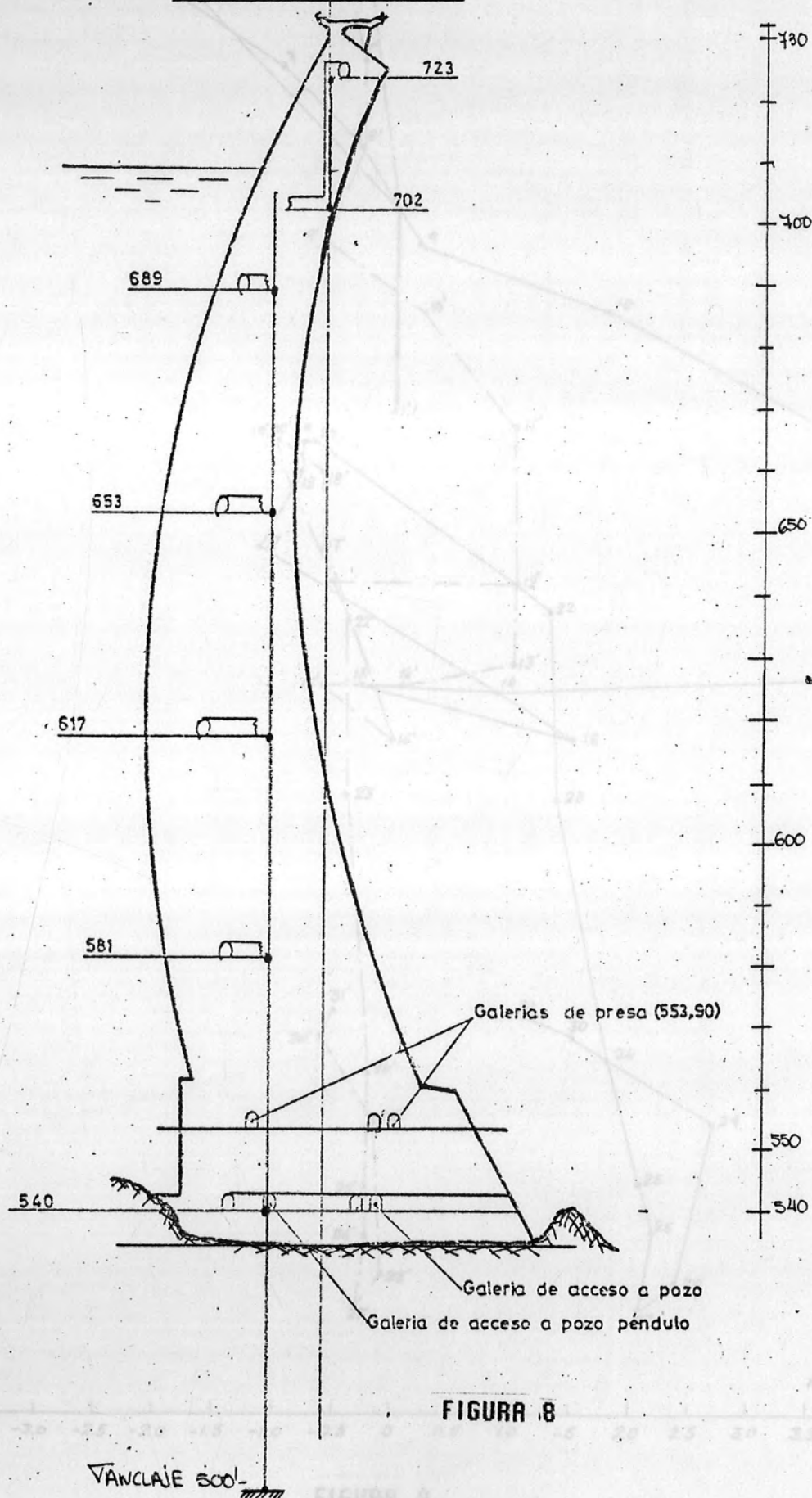


FIGURA 8

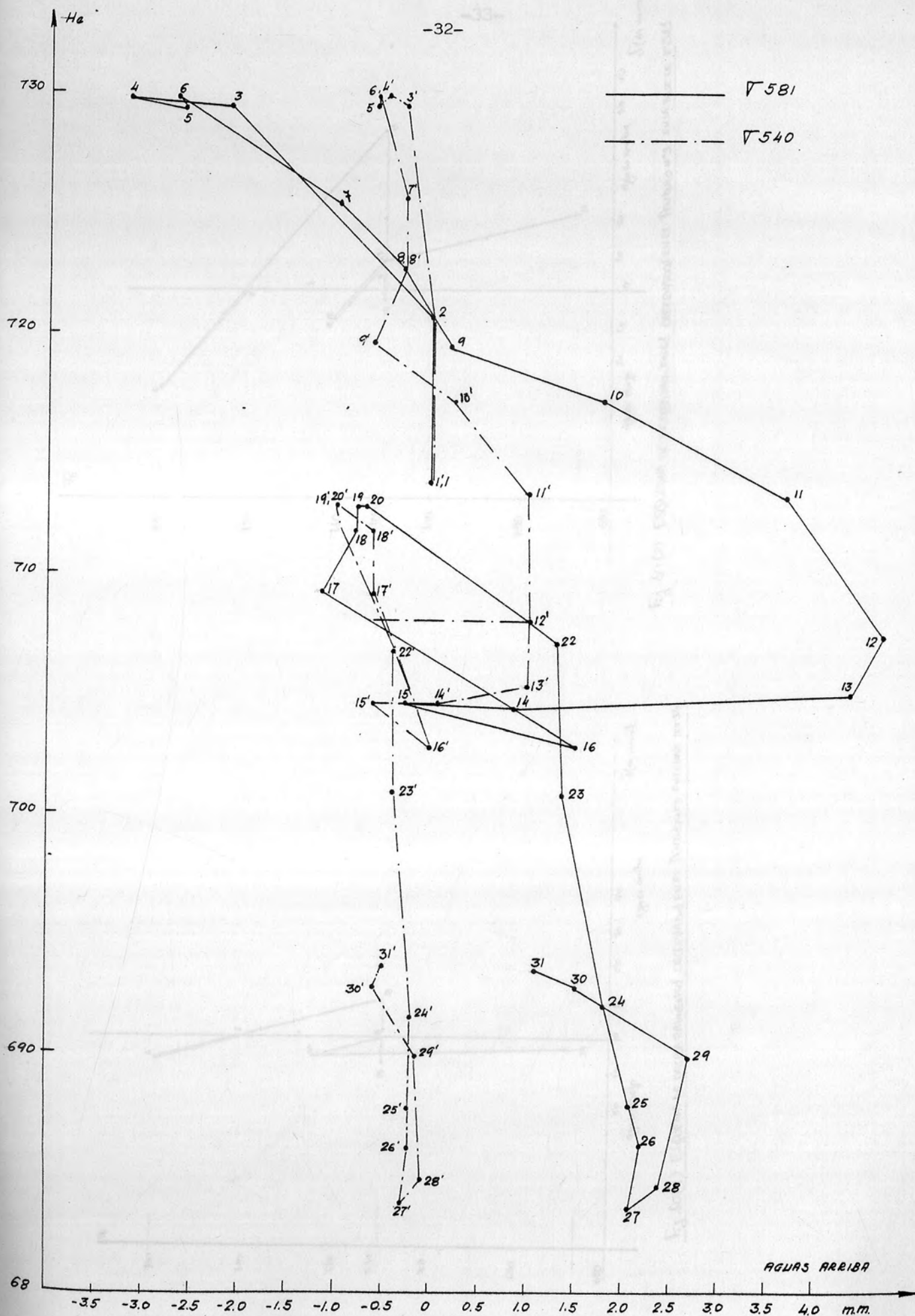


FIGURA 9

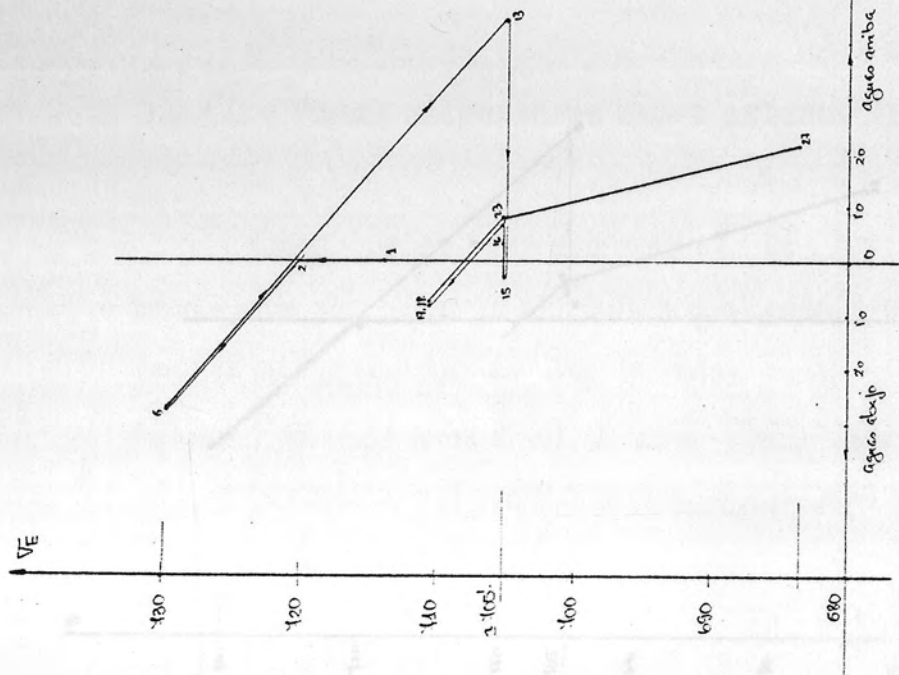


Fig. 10(2) ESQUEMA DE DESPLAZAMIENTOS OBSERVADOS EN EL PENTOLÓN N°3 EN LA BASE DE V581

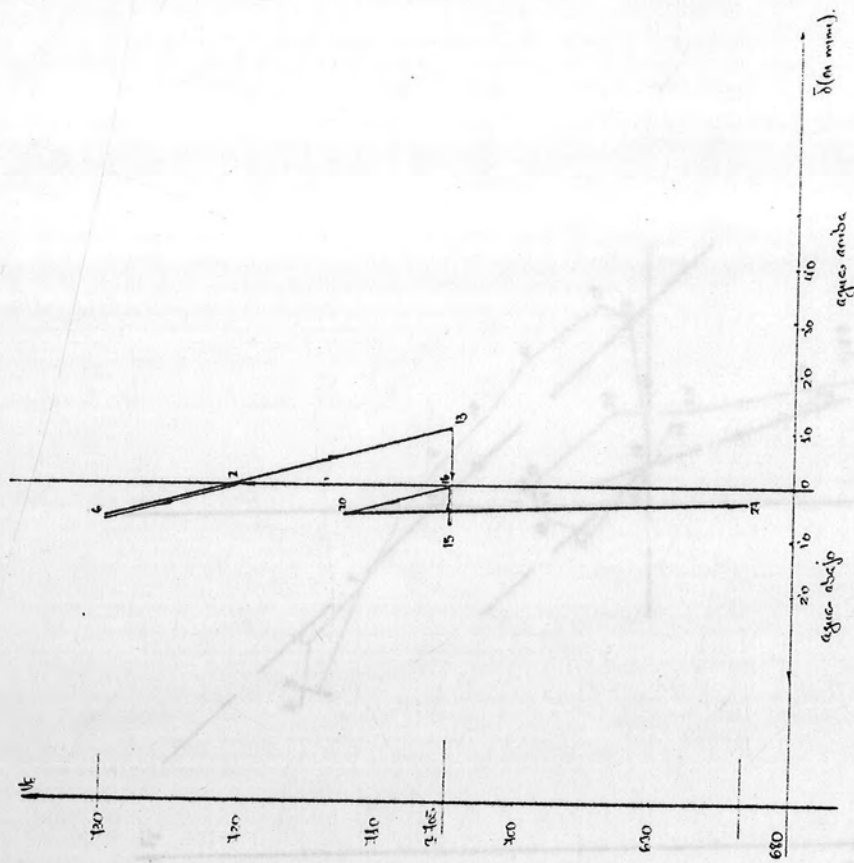


Fig. 10(1) ESQUEMA DE DESPLAZAMIENTOS OBSERVADOS EN EL PENTOLÓN N°3 EN LA BASE DE V510

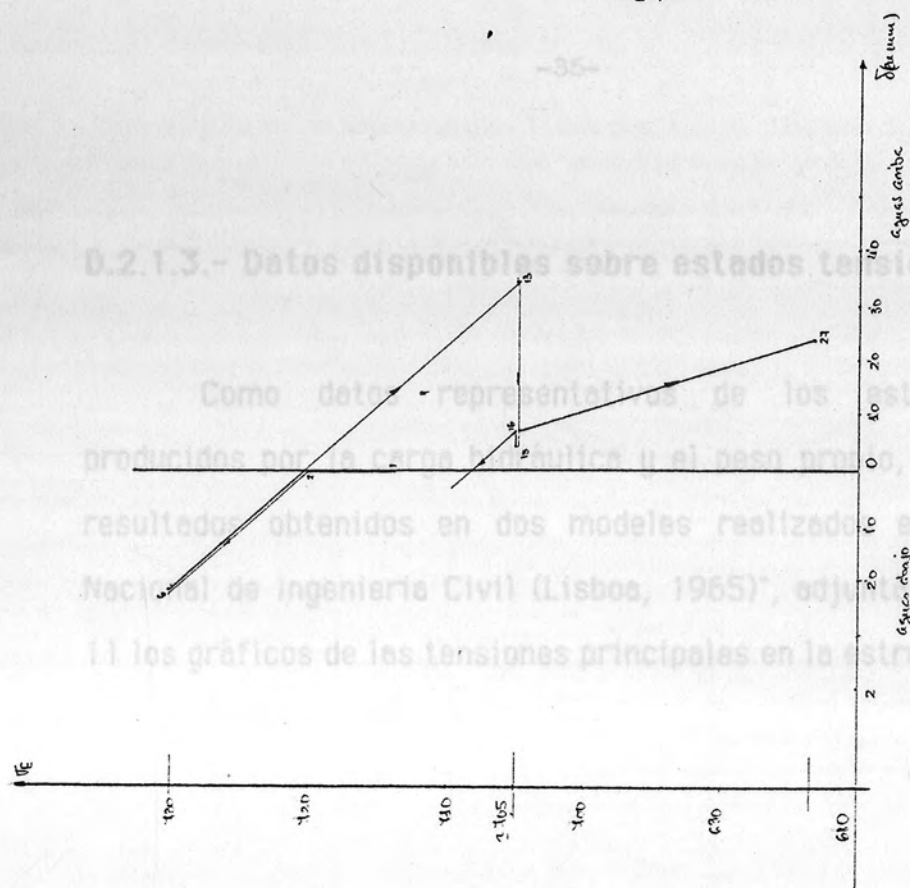


FIG 10(3) ESQUEMA DE DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS EN EL REVULLO N°3 ($\delta v=881-\delta v540$)

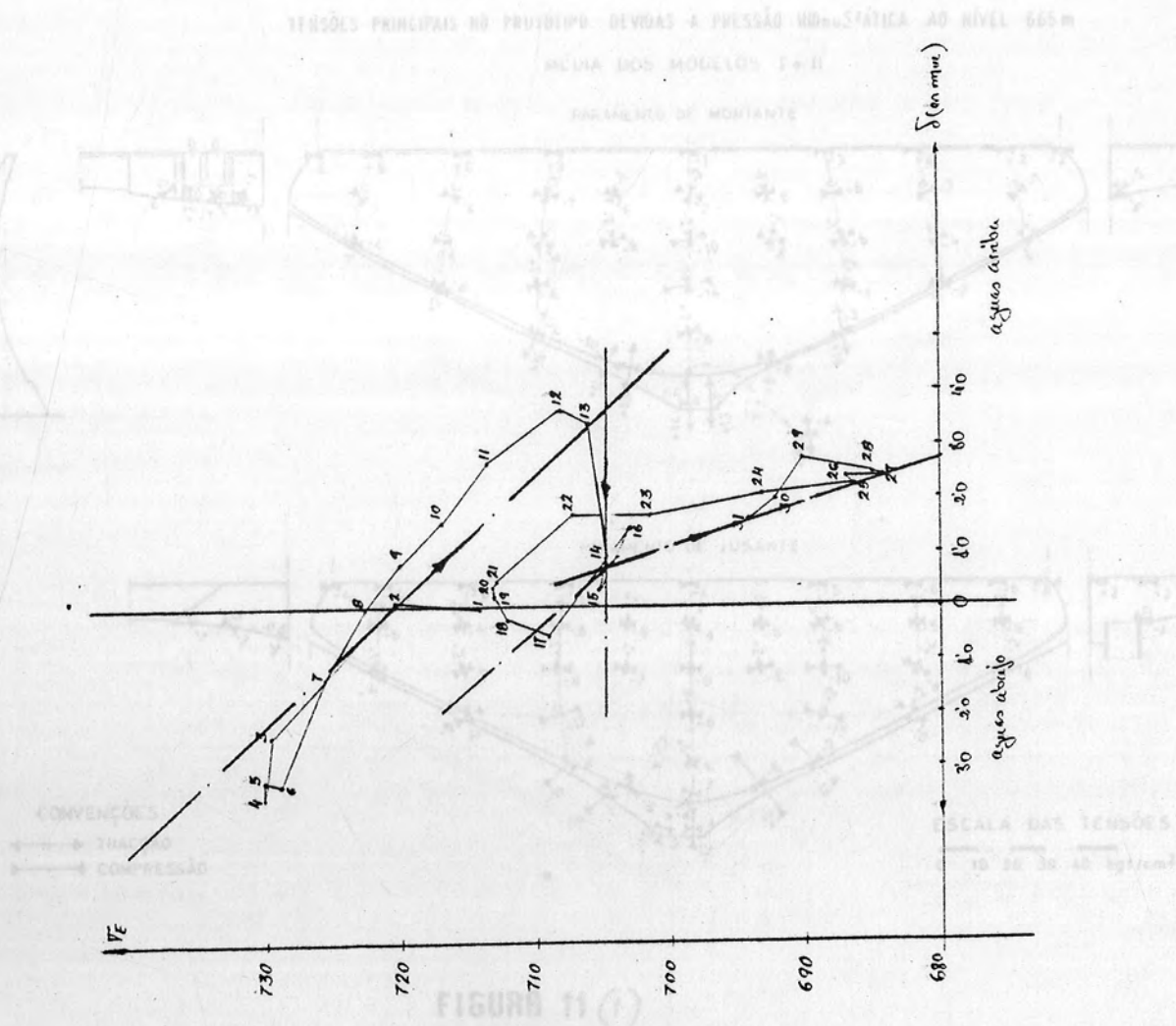


FIGURA 11 (c)

D.2.1.3.- Datos disponibles sobre estados tensionales

Como datos representativos de los estados tensionales producidos por la carga hidráulica y el peso propio, se dispone de los resultados obtenidos en dos modelos realizados en el "Laboratorio Nacional de Ingenieria Civil (Lisboa, 1965)", adjuntándose en la figura 11 los gráficos de las tensiones principales en la estructura.

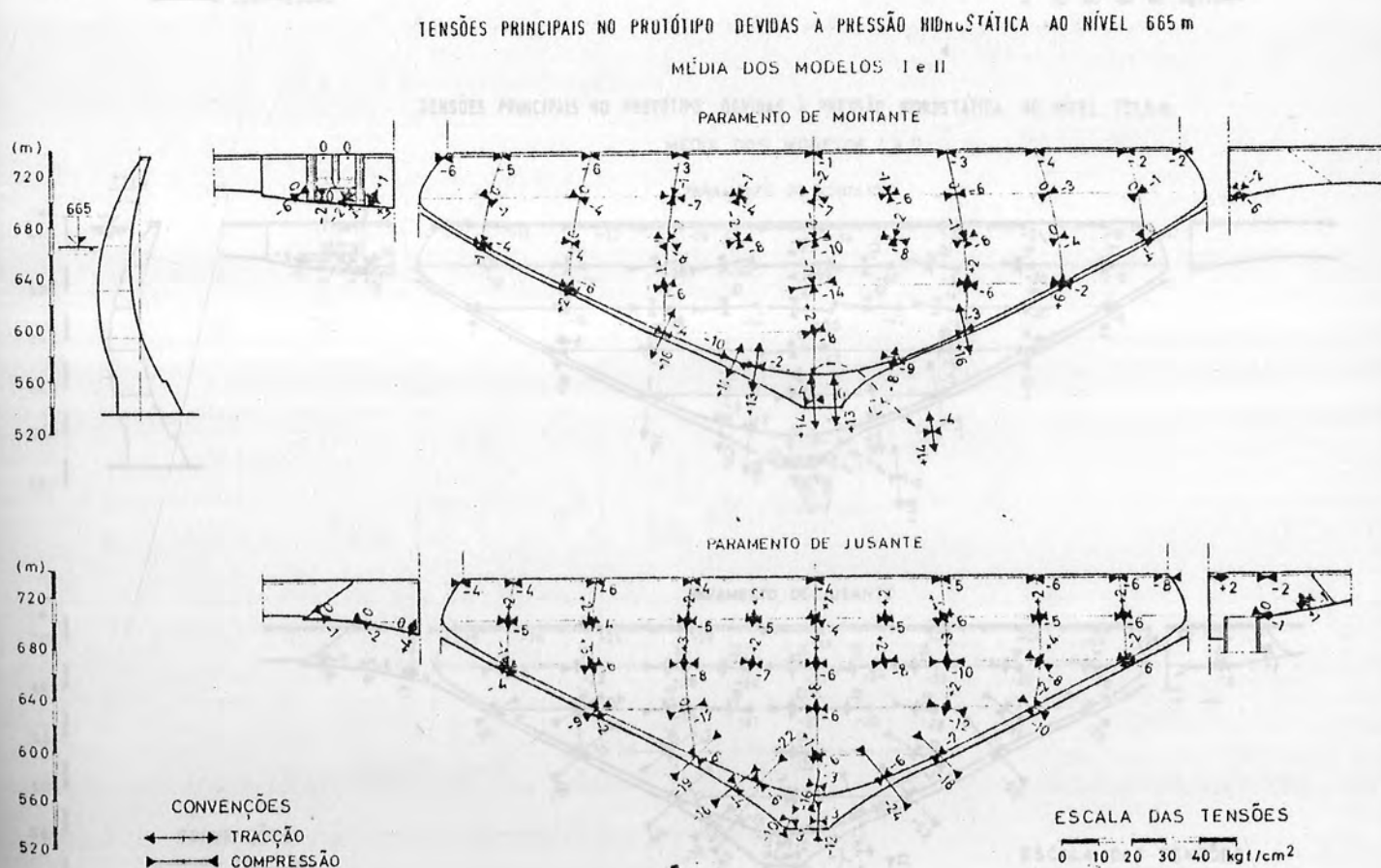
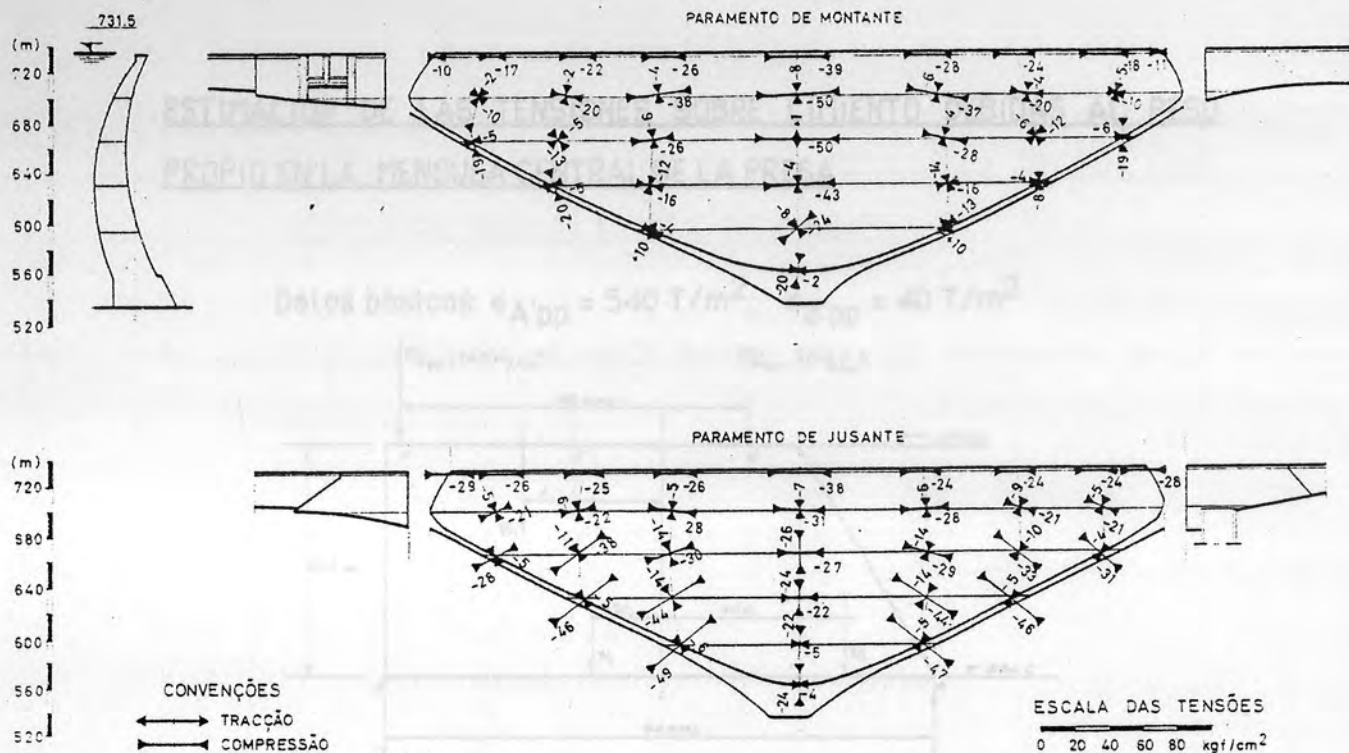


FIGURA 11 (1)

TENSÕES PRINCIPAIS NO PROTÓTIPO DEVIDAS À ACÇÃO SIMULTÂNEA DO PESO PRÓPRIO E DA PRESSÃO HIDROSTÁTICA AO NÍVEL 731,5m
MÉDIA DOS MODELOS I e II



TENSÕES PRINCIPAIS NO PROTÓTIPO DEVIDAS À PRESSÃO HIDROSTÁTICA AO NÍVEL 731,5m
MÉDIA DOS MODELOS I e II

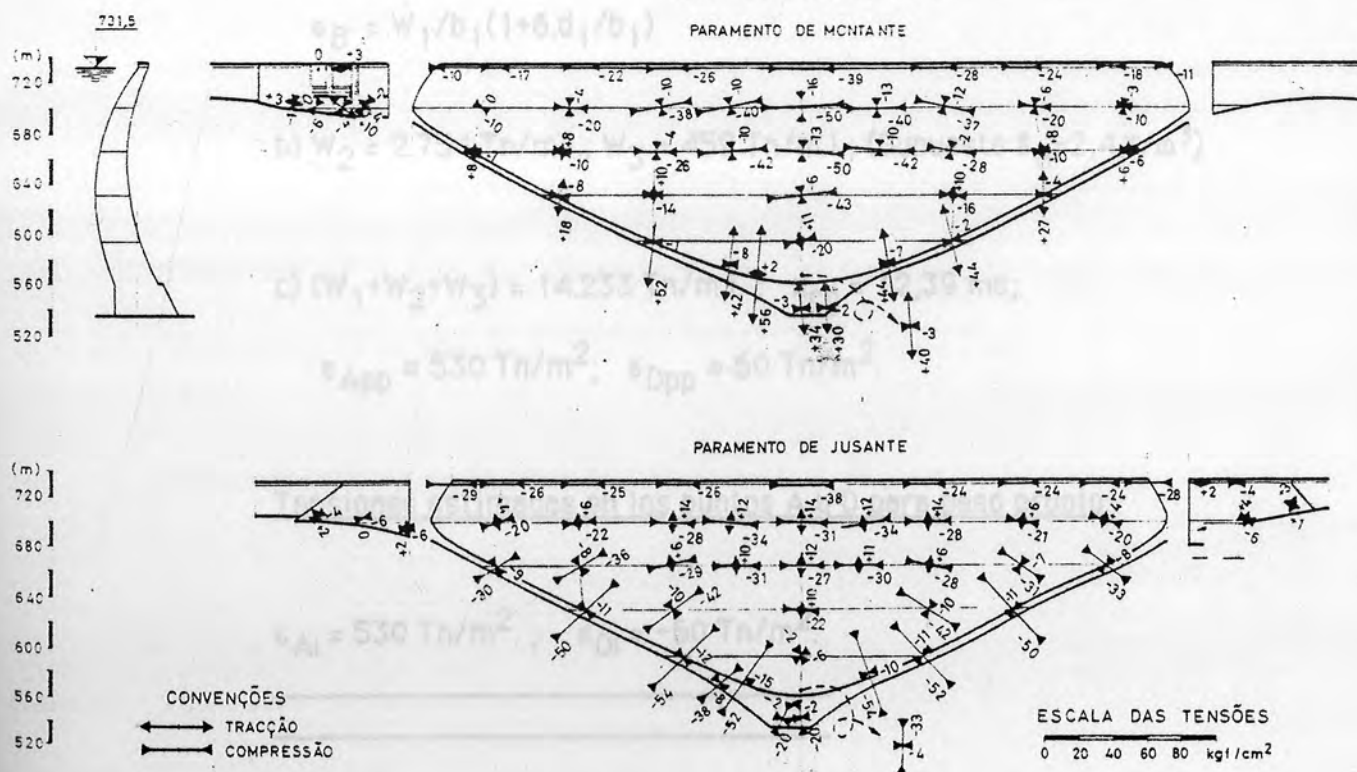
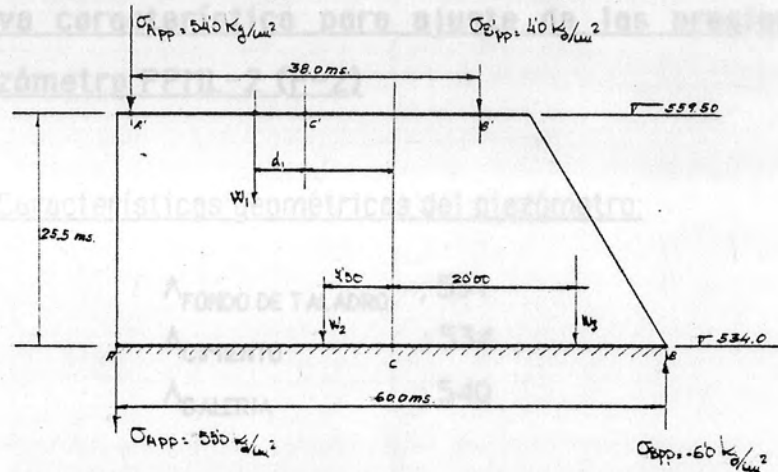


FIGURA 11 (2)

ESTIMACION DE LAS TENSIONES SOBRE CIMIENTO DEBIDAS AL PESO PROPIO EN LA MENSULA CENTRAL DE LA PRESA

Datos básicos: $\epsilon_{A'pp} = 540 \text{ T/m}^2$; $\epsilon_{B'pp} = 40 \text{ T/m}^2$.



a) $\epsilon_{A'} = W_1/b_1(1+6.d_1/b_1)$

$W_1 = 11.020 \text{ Tn/m.l.}; d_1 = 5.46 \text{ ms.}$

$\epsilon_{B'} = W_1/b_1(1+6.d_1/b_1)$

b) $W_2 = 2.754 \text{ Tn/m.l.}; W_3 = 459 \text{ Tn/m.l.}; (\text{Supuesto } \delta_H = 2.4 \text{ T/m}^3).$

c) $(W_1+W_2+W_3) = 14.233 \text{ Tn/m.l.}; x_{cg} = 12.39 \text{ ms};$

$\epsilon_{App} \approx 530 \text{ Tn/m}^2; \epsilon_{Dpp} \approx -60 \text{ Tn/m}^2.$

Tensiones estimadas en los puntos A y D para peso propio:

$\epsilon_{A1} = 530 \text{ Tn/m}^2.; \epsilon_{D1} = -60 \text{ Tn/m}^2.$

D.2.2.- Curvas características de las relaciones $u(x,H)$; $q(H)$
utilizadas para el ajuste del modelo

a) Curva característica para ajuste de las presiones en el
piezómetro PPML-2 (P-2)

1º) Características geométricas del piezómetro:

$\Lambda_{\text{FONDO DE TALADRO}}$; 531
 Λ_{CIMENTO} ; 534
 Λ_{GALERIA} ; 540

2º) Posición relativa del piezómetro en la zona de filtración

-Distancia en planta del piezómetro P-2, al P-1 tomado como límite
 aguas arriba de la zona de filtración modelizada ($x_2 = 14$ ms).

-Distancia en planta del piezómetro P-3, al P-1 tomado como límite
 aguas abajo de la zona de filtración modelizada ($x_3 = 33$ ms).

-Posición relativa en la zona de filtración $a = x_2/x_3 = 14/33 = 0,4242$.

39) Fechas de medición, Cota de embalse y presiones medidas sobre cimientó. Valores en columna de agua sobre la cota 534. (Cuadro III)

	FECHA DE MEDICION	COTA DE EMBALSE	PRESIONES SOBRE Λ_{534}		FECHA DE MEDICION	COTA DE EMBALSE	PRESIONES SOBRE Λ_{534}
1	11-I-79	713.72		16	1-IV-80	702.53	104.25
2	1-II-79	720.15	125.15	17	15-V-80	708.86	108.45
3	1-II-79	729.48	113.25	18	12-VI-80	711.79	111.25
4	5-IV-79	729.80	111.15	19	10-VII-80	712.82	108.15
5	3-V-79	729.63	109.45	20	7-VII-80	712.77	109.45
6	7-VI-79	728.99	117.45	21	4-IX-80	712.63	108.45
7	5-VII-79	725.41	125.15	22	2-X-80	707.14	101.45
8	2-VII-79	722.28	122.75	23	13-XI-80	701.02	95.05
9	6-IX-79	719.60	118.05	24	11-XII-80	691.92	88.25
10	4-X-79	716.38	113.95	25	8-I-81	685.85	84.45
11	1-XI-79	713.11	110.95	26	5-II-81	686.28	83.65
12	3-XII-79	707.46	106.45	27	5-III-81	683.75	83.45
13	10-I-80	705.38	105.95	28	2-IV-81	684.44	82.95
14	7-II-80	704.42	105.05	29	14-V-81	689.80	86.25
15	6-III-80	704.95	105.95	30	11-VI-81	692.72	87.25
				31	9-VII-81	693.69	87.25

-Se considera como variable representativa de la modificación de carga hidráulica, a la diferencia de cota entre el nivel de embalse y la galería inferior; es decir, se utiliza como plano de referencia para la medición de las presiones y los niveles del agua, la cota 540.0.

42) Curva tipo para el ajuste de presiones en el piezómetro PPML-2

los niveles de embalse los valores:

$$u^* = (\Delta u / \Delta H)_0 H + [u_1 - (\Delta u / \Delta H)_0 H_1] (H / H_1)^r \quad r > 0 \quad (2)$$

(*) **Presión y nivel de embalse medidos sobre la cota de la galería (540.0).**

Tomando como referencia los valores reales de las presiones medidas en las alturas máximas y mínimas de observación y la tendencia al crecimiento para estas mismas alturas, se puede ajustar el valor de las presiones, fijando para ello $(\Delta u / \Delta H)_0$ y r .

Estos valores corresponden con los datos de auscultación hidráulica para los niveles de oscilación de embalse que se han producido durante todo el período de observación (Ver cuadro II).

Condiciones para el ajuste

-Se toma como u_0 de referencia para el piezómetro PPML-2 el valor que corresponde a la cota de embalse para la cual se tendría para una distribución lineal de presiones entre los límites de la filtración.

-Se considera como variable representativa de la modificación de carga hidráulica, a la diferencia de cota entre el nivel de embalse y la galería inferior; es decir, se utiliza como plano de referencia para la medición de las presiones y los niveles del agua, la cota 540,0.

B.- Punto límite de filtración aguas abajo - definido por el piezómetro PPML-26 (P-3); $u_{B-cte} = 0$ ms.

u_x de referencia = (u para $H = 165$ ms); esta altura se denominará H_{ref} .

-Se consideran como condiciones de contorno en la filtración para todos los niveles de embalse los valores:

$u_A = H$ (presión en PRM-26 (P-1), medida sobre la cota de la galería).

$u_B = 0$ ms. (presión en PBM-26 (P-3) medida sobre la cota de la galería).

Estos valores corresponden con los datos de auscultación hidráulica para los niveles de oscilación de embalse que se han producido durante todo el período de observación (Ver cuadro II).

-Se toma como u_x de referencia para el piezómetro PPML-2, el valor que corresponde a la cota de embalse 708 que coincide con el que tendría para una distribución lineal de presiones entre los límites de la filtración.

A.- Punto límite de filtración aguas arriba → definido por el piezómetro PRM-26 (P-1); $u_A = H$.

B.- Punto límite de filtración aguas abajo → definido por el piezómetro PBML-26 (P-3); $u_B = \text{cte} = 0$ ms.

u_x de referencia = (u para $H=168$ ms); esta altura se denominará H_{crit} .

$$u_x(\lambda_E=706) = H_{crit} (1-a) + u_B$$

$$u_x(\lambda_E=706) = 102,7 \text{ ms}; H_{crit} = 168 \text{ ms}; a=14/33=0,4242; u_B=6 \text{ ms}.$$

-Las condiciones de ajuste de la curva tipo de presiones se realiza en base a las presiones observadas en el piezómetro PPML-2 (P-2) para los siguientes valores de H.

ESTADO III (Máximo nivel de embalse observado)

$$\lambda_E = 730; H = 190 \text{ ms}; u_{\text{sobre } \lambda 540} = u_{\text{sobre } \lambda 534} - 6 \text{ ms} = 127,5 \text{ ms}.$$

ESTADO CRITICO (Nivel de embalse tomado como referencia)

$$\lambda_E = 706; H = 168 \text{ ms}; u_{\text{sobre } \lambda 540} = u_{\text{sobre } \lambda 534} - 6 \text{ ms} = 96,7 \text{ ms}.$$

ESTADO II (Mínimo nivel de embalse observado)

$$\lambda_E = 680; H = 140 \text{ ms}; u_{\text{sobre } \lambda 540} = u_{\text{sobre } \lambda 534} - 6 \text{ ms} = 75 \text{ ms}.$$

ESTADO I (Nivel de embalse correspondiente a la cota de la galería inferior).

$$\lambda_E = 540; H = 0 \text{ ms}; u_{\text{sobre } \lambda 540} = u_{\text{sobre } \lambda 534} - 6 \text{ ms} = 0$$

Con estas condiciones de ajuste, la curva característica de relación $u(x,H)$ para el punto $a=0,4242$ de la zona de filtración, se define por los parámetros:

$$(\Delta H/\Delta H)_0 = 0,5252; H_1 = H_{\text{crit}} = 168; r = 9,6082; u_1 = 96,7 \text{ ms.}$$

y tomando $u_A = H$; $u_B = 0$ y sustituyendo en (2)

$$u = 0,5252 H + 8,4672 (H/H_{\text{crit}})^{9,6082}$$

ó bien expresando la relación $(u-u_B)/(u_A-u_B)$

$$(u-u_B)/(u_A-u_B) = 0,5252 + 0,0506 (H/168)^{9,6082};$$

La figura 12 representa la curva de ajuste utilizada, en relación con la de los valores auscultados.

FIGURA 12

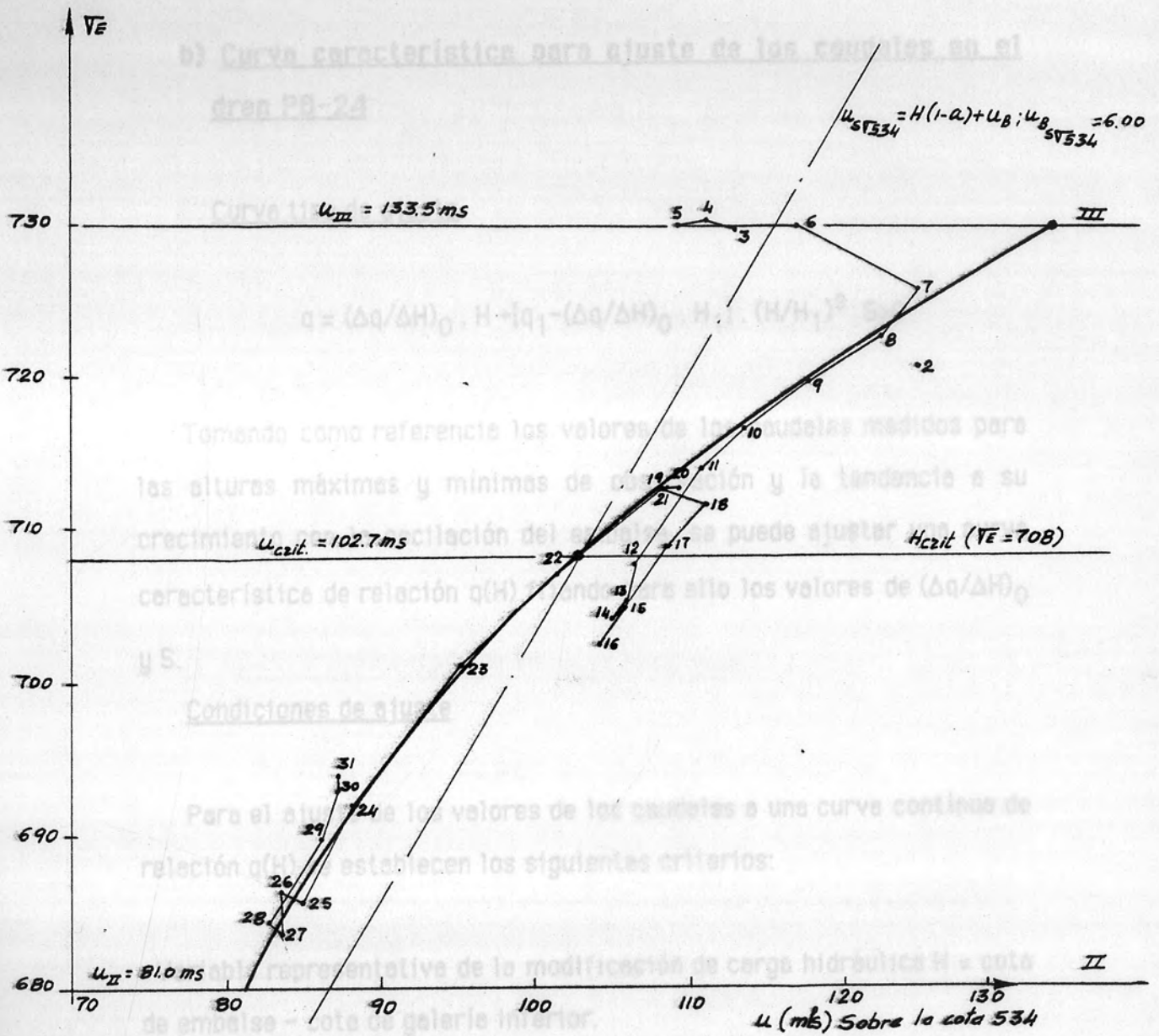


FIGURA 12

b) Curva característica para ajuste de los caudales en el dren PB-24

Curva tipo de ajuste

$$q = (\Delta q / \Delta H)_0 \cdot H + [q_1 - (\Delta q / \Delta H)_0 \cdot H_1] \cdot (H / H_1)^S \quad S > 0$$

Tomando como referencia los valores de los caudales medidos para las alturas máximas y mínimas de observación y la tendencia a su crecimiento con la oscilación del embalse, se puede ajustar una curva característica de relación $q(H)$ fijando para ello los valores de $(\Delta q / \Delta H)_0$ y S .

Condiciones de ajuste

Para el ajuste de los valores de los caudales a una curva continua de relación $q(H)$ se establecen los siguientes criterios:

-Variable representativa de la modificación de carga hidráulica H = cota de embalse - cota de galería inferior.

-Se considera como condiciones de contorno en la filtración para todos los niveles de embalse las mismas que se han definido para las condiciones de ajuste de las presiones manométricas en el piezómetro PPML-2 (P-2) y se considera que el caudal recogido en el dren PB-24 corresponde a la filtración total a través de las líneas de filtración paralelas al contacto.

-La condiciones de ajuste de la curva tipo de los caudales se realiza en base a las observaciones realizadas para los siguientes valores de H.

ESTADO III (máximo nivel de embalse observado)

$\Lambda_E = 730$; $H = 190$ ms; $q = q_{III} = 0,745$ litros/min.

ESTADO CRITICO (nivel de embalse tomado como referencia)

$\Lambda_E = 708$; $H = 168$ ms; $q = q_{crit} = 0,520$ litros/min.

ESTADO II (mínimo nivel de embalse observado)

$\Lambda_E = 680$; $H = 140$ ms; $q = q_{II} = 0,395$ litros/min.

ESTADO I (nivel de embalse correspondiente a la cota de la galería inferior)

$\Lambda_E = 540$; $H = 0$ ms; $q = q_I = 0$

Con estas condiciones de ajuste la curva característica de relación $q(H)$, se define por los parámetros:

$(\Delta q / \Delta H)_0 = 0,0028$; $H_1 = H_{crit} = 168$; $S = 11,308$;

$q_1 = q_{crit} = 0,520$ litros/min.

y su expresión en función de la altura y caudal de referencia (Estado Crítico), será:

$$(qH_{crit})/(q_{crit}H) = 0,8956 + 0,1044 (H/H_{crit})^{10,308}.$$

La figura 13 representa la curva de ajuste utilizada en relación con los valores auscultados.

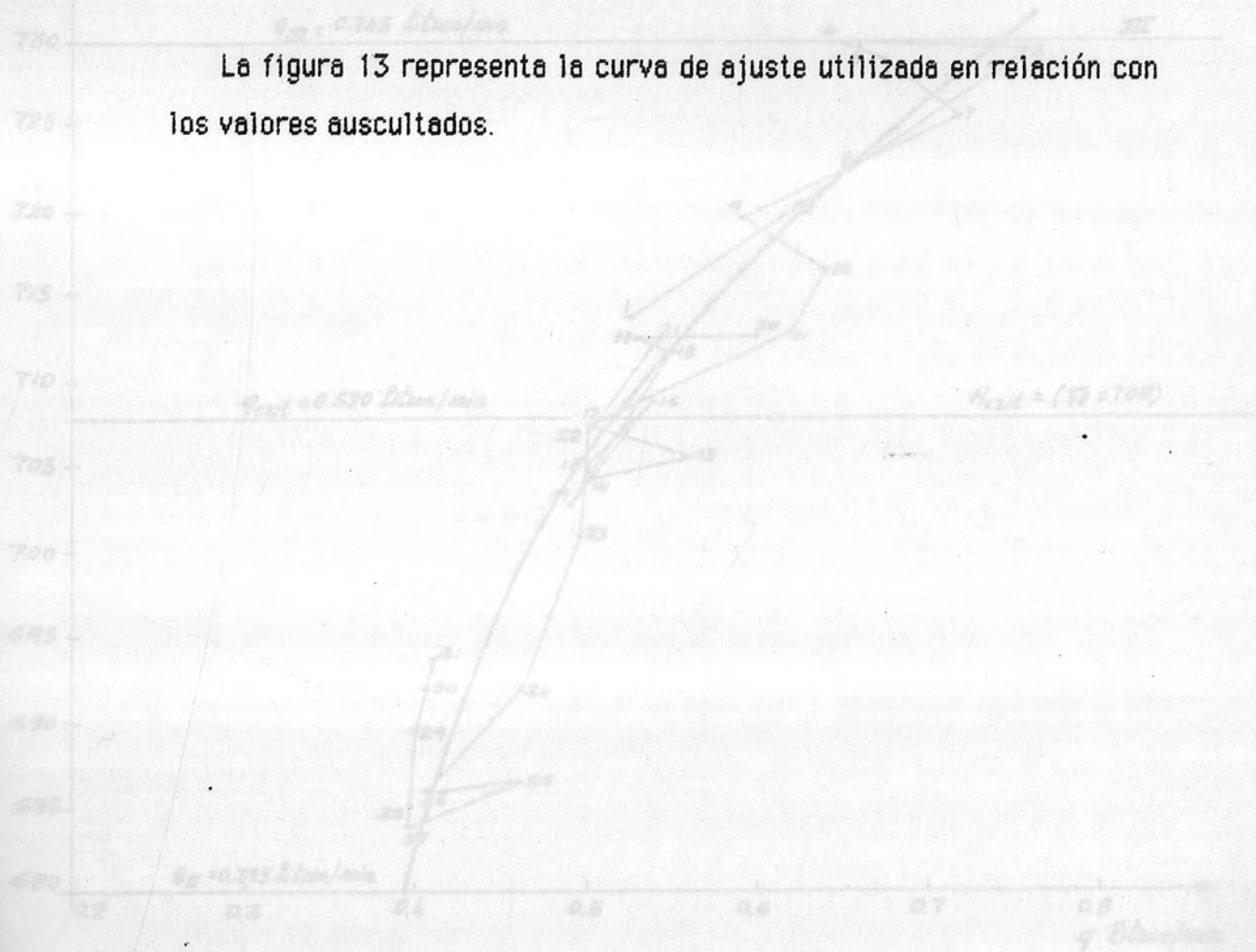


FIGURA 13

0.2.3- DEDUCCION DE LAS TENSIONES EFECTIVAS TOMADAS COMO DADA PARA EL ANTE DEL MODELO

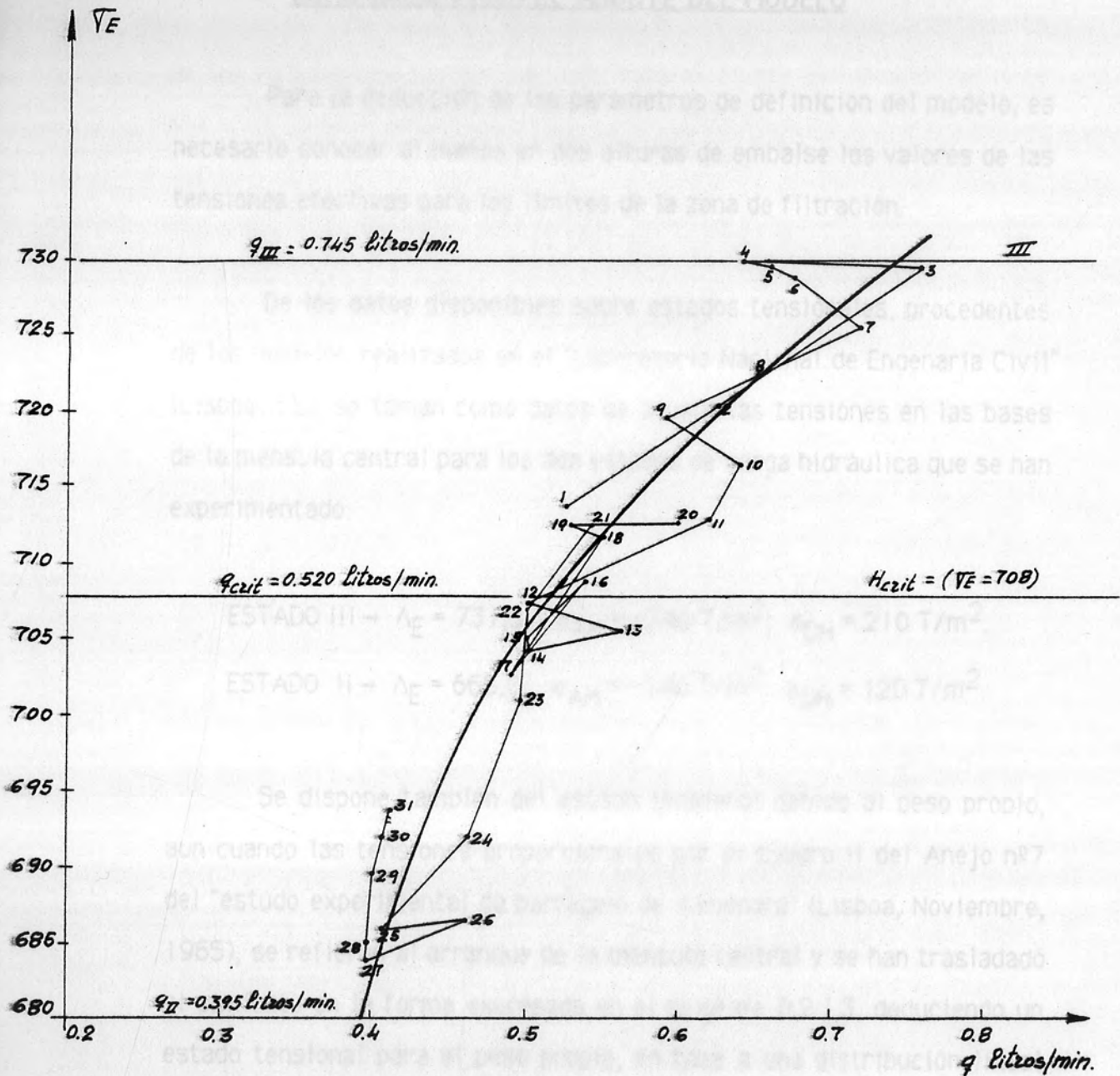


FIGURA 13

D.2.3.- DEDUCCION DE LAS TENSIONES EFECTIVAS TOMADAS COMO BASE PARA EL AJUSTE DEL MODELO

Para la deducción de los parámetros de definición del modelo, es necesario conocer al menos en dos alturas de embalse los valores de las tensiones efectivas para los límites de la zona de filtración.

De los datos disponibles sobre estados tensionales, procedentes de los modelos realizados en el "Laboratorio Nacional de Engenharia Civil" (Lisboa, 65), se toman como datos de ajuste las tensiones en las bases de la ménsula central para los dos estados de carga hidráulica que se han experimentado:

$$\text{ESTADO III} \rightarrow \Lambda_E = 731,5; \quad \epsilon_{AH} = -340 \text{ T/m}^2; \quad \epsilon_{DH} = 210 \text{ T/m}^2.$$

$$\text{ESTADO II} \rightarrow \Lambda_E = 665,0; \quad \epsilon_{AH} = -140 \text{ T/m}^2; \quad \epsilon_{DH} = 120 \text{ T/m}^2.$$

Se dispone también del estado tensional debido al peso propio, aún cuando las tensiones proporcionales por el cuadro II del Anejo nº7 del "estudo experimental da barragem de Almendra" (Lisboa, Noviembre, 1965), se refieren al arranque de la ménsula central y se han trasladado al cimiento en la forma expresada en el epígrafe D.2.1.3, deduciendo un estado tensional para el peso propio, en base a una distribución lineal entre el pie de aguas arriba y el de aguas abajo del contacto.

$$\text{ESTADO I} \rightarrow \Lambda_E = 534; \quad \epsilon_{App} = 530 \text{ T/m}^2; \quad \epsilon_{Dpp} = -60 \text{ T/m}^2.$$



A partir de estos tres estados tensionales básicos, la deducción de las tensiones efectivas tomadas para el ajuste del modelo, se hace con los siguientes criterios:

AJUSTE DEL MODELO

- Se consideran las tensiones totales en el modelo reducido suponiendo una distribución lineal entre el pie de aguas arriba y el pie de aguas abajo de la presa.
- Se consideran las presiones del agua en la zona de filtración, suponiendo una distribución lineal entre el pie de aguas arriba, tomado en el piezómetro P-1 ($u_A=H$), y el punto de drenaje efectivo, que coincide con la posición del piezómetro P(3) con ($u_B=cte=0$).
- Se establece una distribución lineal de tensiones efectivas entre el pie de aguas arriba y el pie de aguas abajo de la presa, cuya resultante sea equivalente en magnitud y en momento respecto al centro geométrico del contacto, a la suma de los estados de carga lineales debidos a las tensiones totales del modelo reducido, más los estados de subpresión lineales entre A y B, con las condiciones de contorno $u_A=H$ y $u_B=cte=0$.

Peso propio	$\gamma_A = 330 \text{ T/m}^2$	$\gamma_D = 50 \text{ T/m}^2$
Peso propio γ_0	$\gamma_A = 524 \text{ T/m}^2$	$\gamma_D = 55 \text{ T/m}^2$

Momento del peso propio respecto al centro del contacto

$$M_{pp} = (\gamma_A - \gamma_D) \frac{b^2}{2} = 177.000 \text{ m.T/m.l.}$$

CALCULO DE LAS TENSIONES EFECTIVAS TOMADAS COMO BASE PARA EL AJUSTE DEL MODELO

De acuerdo con los criterios establecidos, los estados tensionales de ajuste del modelo serán:

<u>DATOS BASICOS</u>	$\epsilon_A (T/m^2)$	$\epsilon_B (T/m^2)$
PESO PROPIO	+530	-60
CARGA HIDRAULICA H=131,5	-340	+210
CARGA HIDRAULICA H=125	-140	+120
	-Tracción	+Compresión

1) ESTADO I (H=0) (Peso propio + distribución uniforme de presiones; $u_0 = \lambda_{GALERIA} - \lambda_{CONTACTO} = 6$ metros).

Peso propio $\epsilon_{Ai} = 530 T/m^2$; $\epsilon_{Di} = -60 T/m^2$.

Peso propio + u_0 $\epsilon'_{Ai} = 524 T/m^2$; $\epsilon'_{Di} = -66 T/m^2$.

Momento del peso propio respecto al centro del contacto

$$M_{pp} = (\epsilon'_{Ai} - \epsilon'_{Di}) b^2 / 12 = 177.000 \text{ m.T./m.l.}$$

2) ESTADO II (H=125) (Carga Hidráulica + peso propio para $\Lambda_E=665$)

Tensiones debidas a la carga hidráulica, según el modelo reducido: $\epsilon_{AH} = -140 \text{ T/m}^2$; $\epsilon_{DH} = +120 \text{ T/m}^2$.

Distribución equivalente: $\left| \begin{array}{l} \text{tracción uniforme} \rightarrow \epsilon_H = -10 \text{ T/m}^2 \\ \text{flexión} \rightarrow \epsilon_{AH} = -\epsilon_{DH} = -130 \text{ T/m}^2 \end{array} \right.$

Momento debido a la carga hidráulica respecto al centro del contacto

$$M_H = [\epsilon_{AH}(\text{flexión})/6] \cdot b^2 = 78.000 \text{ m.T./m.l.}$$

Momento debido a la subpresión supuesta lineal entre el pie de aguas arriba y el punto de drenaje efectivo (B)

$$M_{\text{sub}} = 1/2 \cdot H \cdot c [(b/2) - (c/3)] = 39.187,50 \text{ m.T./m.l.}$$

Momento resultante

$$M_R = M_{pp} - M_H - M_{\text{sub}} = 59.812,50 \text{ m.T./m.l.}$$

Tensiones tomadas como equivalentes incluyendo el peso propio

Compresión uniforme $\rightarrow [(\epsilon'_{AI} + \epsilon'_{DI})/2] + \epsilon_H - 1/2 \cdot H \cdot (c/b) = 111,3 \text{ T/m}^2$

Compresión Uniforme $\rightarrow [(\epsilon'_{AI} + \epsilon'_{DI})/2] + \epsilon_H - 1/2 \cdot H \cdot (c/b) = 184,6 \text{ T/m}^2$

Flexión $\rightarrow \epsilon_{AH} = +6 \cdot M_R / b^2 = +99,7 \text{ T/m}^2$; $\epsilon_{DH} = -99,7 \text{ T/m}^2$.

RESUMEN DEL ESTADO TENSIONAL TOMADO COMO EQUIVALENTE, PARA H=125

$$\epsilon'_{AI} = 284,3 \text{ T/m}^2$$

$$\epsilon'_{DI} = 84,9 \text{ T/m}^2$$

3º ESTADO III (H=191,5) (Carga hidráulica + peso propio para $\Lambda_E=731,5$)

Tensiones debidas a la carga hidráulica según el modelo reducido:

$$\epsilon_{AH} = -340 \text{ T/m}^2; \quad \epsilon_{DH} = +120 \text{ T/m}^2.$$

Distribución equivalente: Tracción uniforme $\rightarrow \epsilon_H = -65 \text{ T/m}^2$.

Flexión $\rightarrow \epsilon_{AH} = -\epsilon_{DH} = -275 \text{ T/m}^2$.

Momento debido a la carga hidráulica respecto al centro del contacto

$$M_H = [\epsilon_{AH}(\text{flexión})/6] \cdot b^2 = 165.000 \text{ m.T./m.l.}$$

Momento debido a la subpresión supuesta lineal entre el pie de aguas arriba y el punto de drenaje

$$M_{\text{sub}} = 1/2 \cdot H \cdot c \cdot [(b/2) - (c/3)] = 60.035 \text{ m.T./m.l.}$$

Momento resultante

$$M_R = M_{pp} - M_H - M_{\text{sub}} = -48.035 \text{ m.T./m.l.}$$

TENSIONES TOMADAS COMO EQUIVALENTES INCLUYENDO EL PESO PROPIO

Compresión uniforme $\rightarrow [(\epsilon_{A1} + \epsilon'_{D1})/2] + \epsilon_H - 1/2 \cdot H \cdot (c/b) = 111,3 \text{ T/m}^2$.

Flexión $\rightarrow \epsilon_{AH} = 6M_R/b^2 = -80,1 \text{ T/m}^2; \quad \epsilon_{DH} = +80,1 \text{ T/m}^2$.

RESUMEN DEL ESTADO TENSIONAL TOMADO COMO EQUIVALENTE, PARA H=191,5

$$\epsilon'_{AIII} = 31,20 \text{ T/m}^2; \quad \epsilon'_{DIII} = 191,4 \text{ T/m}^2.$$

I - Peso propio

II - Carga de embalse + peso propio ($\Lambda_E=665$)

Crítico - Carga de embalse + peso propio ($\Lambda_E=708$)

III - Carga de embalse + peso propio ($\Lambda_E=731,50$)

ESQUEMA DE LA EVOLUCION DE LAS TENSIONES EFECTIVAS DEDUCIDAS

4º) ESTADO CRITICO (H=168). ESTADO DE CARGA CORRESPONDIENTE A UNA DISTRIBUCION UNIFORME DE TENSIONES EFECTIVAS

$$M_R = M_{pp} - M_H - M_{sub} = 0; H = H_{crit.} = 168$$

$$M_{pp} = 177.000 \text{ m.T./m.l.} \quad \text{Flexión} \rightarrow \epsilon_{AH} = \epsilon_{DH} = -207,2 \text{ T/m}^2.$$

$$M_H = [\epsilon_{AH} (\text{flexión})/6] \cdot b^2 \quad \text{Tracción uniforme} \rightarrow 46,4 \text{ T/m}^2$$

$$M_{sub} = 1/2 H \cdot c \cdot ((b/2) - (c/3)) = 52.668 \text{ m.T./m.l.}$$

RESUMEN DEL ESTADO TENSIONAL TOMADO COMO EQUIVALENTE PARA LA ALTURA CRITICA

$$\epsilon'_{Acrit} = 136,4 \text{ T/m}^2; \quad \epsilon'_{Dcrit} = 136,4 \text{ T/m}^2.$$

VALORES DE LAS TENSIONES EFECTIVAS DEDUCIDAS

A.- punto límite aguas arriba (coincide con P-1).

B.- Punto límite aguas abajo (coincide con P-3).

D.- Pié de aguas abajo.

$$\epsilon'_B = \epsilon'_A - (\epsilon'_A - \epsilon'_D) c/b; \quad c=33 \text{ ms}; \quad b=60 \text{ ms}.$$

		$\epsilon'_A (\text{T/m}^2)$	$\epsilon'_B (\text{T/m}^2)$	$\epsilon'_D (\text{T/m}^2)$
ESTADO I	$\Lambda_E=540$	524	199,5	-66,0
ESTADO II	$\Lambda_E=665$	284,3	174,6	84,9
ESTADO CRITICO	$\rightarrow \Lambda_E=708$	136,4	136,4	136,4
ESTADO III	$\rightarrow \Lambda_E=731,5$	31,2	119,3	191,4

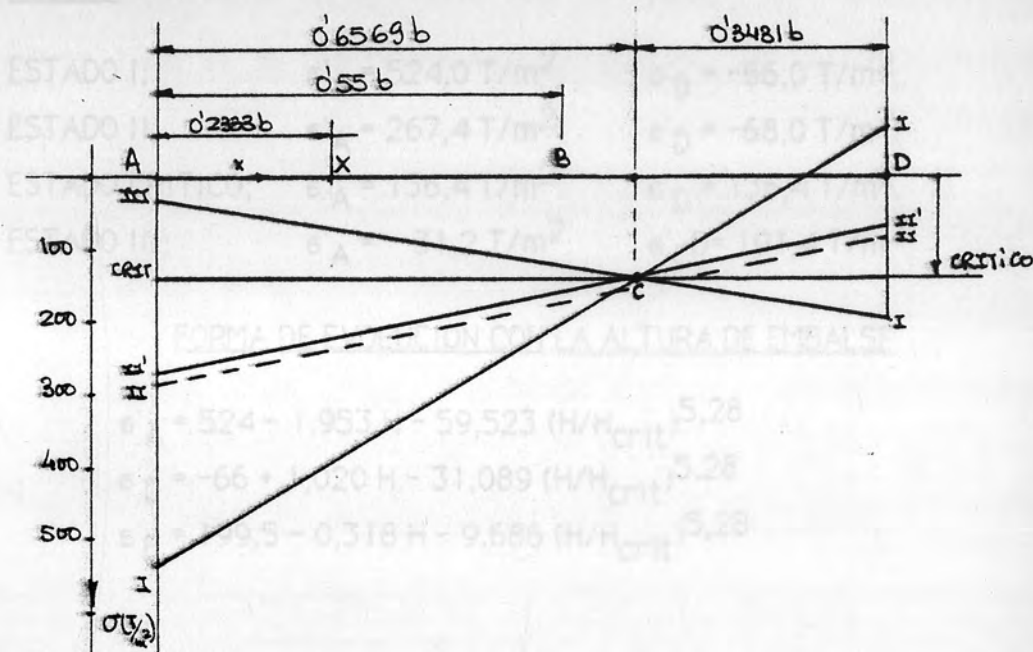
I.- Peso propio.

II.- Carga de embalse + peso propio ($\Lambda_E=665$).

Crítico.- Carga de embalse + peso propio ($\Lambda_E=708$).

III.- Carga de embalse + peso propio ($\Lambda_E=731,50$).

ESQUEMA DE LA EVOLUCION DE LAS TENSIONES EFECTIVAS DEDUCIDAS



Para el ajuste del modelo se utilizarán las tensiones efectivas deducidas, modificando el estado II para compatibilizar la linealidad de tensiones con la continuidad de giro de la sección en el punto C.

Esta hipótesis supone adoptar en el ajuste del modelo un estado de tensiones II' para $H=125$, equivalente al deducido, menos una tracción uniforme de $16,9 \text{ T/m}^2$:

$$\epsilon'_{AII'} = 267,4 \text{ T/m}^2; \quad \epsilon'_{BII'} = 157,4 \text{ T/m}^2; \quad \epsilon'_{DII'} = 68 \text{ T/m}^2.$$

El grado de exactitud que proporciona, el modelo reducido y la forma de deducción de las tensiones de ajuste, permite esta hipótesis sin alterar el orden de magnitud de la precisión que se tiene.

VALORES DE LAS TENSIONES EFECTIVAS TOMADAS PARA EL AJUSTE DEL MODELO

ESTADO I;	$\sigma'_A = 524,0 \text{ T/m}^2$	$\sigma'_D = -66,0 \text{ T/m}^2$
ESTADO II;	$\sigma'_A = 267,4 \text{ T/m}^2$	$\sigma'_D = -68,0 \text{ T/m}^2$
ESTADO CRITICO;	$\sigma'_A = 136,4 \text{ T/m}^2$	$\sigma'_D = 136,4 \text{ T/m}^2$
ESTADO III;	$\sigma'_A = 31,2 \text{ T/m}^2$	$\sigma'_{CD} = 191,4 \text{ T/m}^2$

FORMA DE EVOLUCION CON LA ALTURA DE EMBALSE

$$\sigma'_A = 524 - 1,953 H - 59,523 (H/H_{\text{crit}})^{5,28}$$

$$\sigma'_D = -66 + 1,020 H - 31,089 (H/H_{\text{crit}})^{5,28}$$

$$\sigma'_B = 199,5 - 0,318 H - 9,686 (H/H_{\text{crit}})^{5,28}$$

D.2.4.-Valores obtenidos para los parámetros n y ϵ' , con hipótesis fijas para las presiones del agua en los límites de las zonas de filtración ($u_A=H$ y $u_B=0$)

1º) Expresión de las presiones del agua definidas por el modelo

$$\frac{U-U_B}{U_A-U_B} = \frac{(X/B)^{n+1}-1}{(A/B)^{n+1}-1} = \frac{[(A/B)-((A/B)-1)a]^{n+1}-1}{(A/B)^{n+1}-1}$$

2º) Expresión de los caudales definidos por el modelo

$$K_{e\ A-B} = \frac{(n+1)[(A/B)-1]}{(A/B)^{n+1}-1} \cdot K_B$$

$$q_{AB} = \frac{(U_A-U_B)(n+1)[(A/B)-1]}{c(A/B)^{n+1}-1} \cdot K_0(C/B)^n$$

$$A/B \rightarrow 1 \quad q_{AB} = q_{crit}; q_{crit} = [(U_A-U_B)_{crit}/c] \cdot K_0(C/B)^n_{crit}$$

$$\frac{q_{AB}}{q_{crit}} = \frac{(U_A-U_B)_{crit}}{(U_A-U_B)} \cdot \frac{(n+1)[(A/B)-1]}{(A/B)^{n+1}-1} \cdot \left(\frac{B_{crit}}{B}\right)^n$$

3º) Aplicación del modelo a los datos de auscultación de la
ménsula central de la presa de la Almendra

Curva tipo para el ajuste de las presiones en el piezómetro PPML-2

$$(U-U_B)/(U_A-U_B) = 0,5252 + 0,0506 (H/H_{crit})^{8,6082}$$

CASO 1. -AJUSTE CON LOS ESTADOS TENSIONALES CORRESPONDIENTES A
LAS ALTURAS MAXIMAS Y MINIMAS OBSERVADAS

a) Definición de los valores de n y ϵ'_{II} del modelo, para ajuste de la
curva de presiones para los estados II ($\Delta E=665$) y III ($\Delta E=731,50$)

$$\Delta E = 731,5; H=191,5; (U-U_B)/(U_A-U_B) = 0,6813 \rightarrow III$$

$$\Delta E = 665,0; H=125; (U-U_B)/(U_A-U_B) = 0,5292 \rightarrow II$$

$$\frac{(U-U_B)}{(U_A-U_B)} = \frac{[(A/B)-[(A/B)-1]a]^{n+1}-1}{[(A/B)]^{n+1}-1}$$

$$III \rightarrow (A/B)_{III} = (31,2+\epsilon'_{II})/(119,3+\epsilon'_{II})$$

$$II \rightarrow (A/B)_{II} = (267,4+\epsilon'_{II})/(157,4+\epsilon'_{II})$$

$$I \rightarrow (A/B)_I = (524+\epsilon'_{II})/(199,5+\epsilon'_{II})$$

Valores de n y ϵ'_{II} que ajustan el modelo en los puntos II y III

(n+1)	$\epsilon'_{II}(III)(T/m^2)$	$\epsilon'_{II}(II)$
1,700	-1,3	-11,0
1,714	-1,3	- 7,0
1,750	+3,3	+ 3,5
1,800	+7,9	+17,5

VALORES DE AJUSTE $n = 0,750$; ($\epsilon'_{II} = 3,5 T/m^2$)

b) VALORES DEDUCIDOS PARA $(A/B)_I$ y $[(u-u_B)/(u_A-u_B)]_I$ con $n=0,750$ y $\epsilon'_{II} = 3,5$

$$(A/B)_I = 2,5985; [(U-U_B)/(U_A-U_B)]_I = 0,4939$$

c) Expresión de los caudales definidos por el modelo

$$\frac{q}{q_{crit}} = \frac{(U_A - U_B)_{crit}}{(U_A - U_B)} = \frac{(n+1) \cdot (A/B - 1)}{(A/B)^{n+1} - 1} \cdot \frac{B_{crit}}{B}$$

Valores de B en Tm/m^2 ; $B_{III} = 122,8 T/m^2$; $B_{crit} = 139,9 T/m^2$;
 $B_{II} = 160,9 T/m^2$; $B_I = 195,5 T/m^2$.

$$(III) (A/B)_{III} = \frac{(31,2+3,5)}{(119,3+3,5)} = 0,283; (U_A - U_B)_{III} = H_{III} = 191,5$$

Crítico $(A/B)_{crit} = 1,000$; $(u_A - u_B)_{crit} = H_{crit} = 168$;

$$(II) (A/B)_{II} = \frac{(267,4+3,5)}{(157,4+3,5)} = 1,684; \quad (U_A - U_B)_{II} = H_{II} = 125,0$$

$$(I) (A/B)_I = \frac{(524,0+3,5)}{(195,5+3,5)} = 2,598; \quad (U_A - U_B)_I = H_I = 0;$$

$$q_{III}/q_{crit} = 1,772; \quad q_{II}/q_{crit} = 0,538$$

$$[q_I/(U_A - U_B)_I] \cdot [(U_A - U_B)_{crit}/q_{crit}] = 0,4894$$

CASO 2.- AJUSTE CON LOS CASOS TENSIONALES CORRESPONDIENTES A LA ALTURA MAXIMA OBSERVADA Y AL PESO PROPIO

a) Definición de los valores de n y ϵ_{II} del modelo, para ajuste de la curva de presiones para los estados I ($\Lambda_E = 540$) y III ($\Lambda_E = 731,50$)

$$\Lambda_E = 731,5; \quad H = 191,5; \quad (U - U_B)/(U_A - U_B) = 0,6813 \rightarrow III$$

$$\Lambda_E = 540,0; \quad H = 0; \quad (U - U_B)/(U_A - U_B) = 0,5252 \rightarrow I$$

$$\frac{(U - U_B)}{(U_A - U_B)} = \frac{[(A/B) - (A/B)_I]^{n+1} - 1}{[(A/B)]^{n+1} - 1}$$

$$III \rightarrow (A/B)_{III} = (31,2 + \epsilon'_{II}) / (119,3 + \epsilon'_{II})$$

$$I \rightarrow (A/B)_I = (524 + \epsilon'_{II}) / (199,5 + \epsilon'_{II})$$

Valores de n y ϵ'_{II} que ajustan el modelo en los puntos I y III

VALORES DE AJUSTE $n = 0,426$; $(\epsilon'_{II} = -25 \text{ T/m}^2)$

b) VALORES DEDUCIDOS PARA $(A/B)_{II}$ y $[(u-u_B)/(u_A-u_B)]_{II}$ con $n=0,426$ y $\epsilon'_{II} = -25 \text{ T/m}^2$

$$(A/B)_{II} = 1,831; [(U-U_B)/(U_A-U_B)]_{II} = 0,5452$$

c) Expresión de los caudales definidos por el modelo

$$q_{crit} \frac{(U_A - U_B)_{crit}}{(U_A - U_B)} = \frac{(n+1) \cdot (A/B - 1) \cdot B_{crit}}{(A/B)^{n+1} - 1} \left(\frac{B_{crit}}{B} \right)^n$$

Valores de B en Tm/m^2 ; $B_{III} = 94,3 \text{ T/m}^2$; $B_{crit} = 111,4 \text{ T/m}^2$;
 $B_{II} = 132,4 \text{ T/m}^2$; $B_I = 174,5 \text{ T/m}^2$.

$$(III) (A/B)_{III} = \frac{(31,2 - 25)}{(119,3 - 25)} = 0,066; (U_A - U_B)_{III} = H_{III} = 191,5$$

Crítico $(A/B)_{crit} = 1,000$; $(u_A - u_B)_{crit} = H_{crit} = 168$;

$$(II) (A/B)_{II} = \frac{(267,4-25)}{(157,-25)} = 1,831; \quad (U_A-U_B)_{II} = H_{II} = 125,0$$

$$(I) (A/B)_I = \frac{(524,0-25)}{(195,5-25)} = 2,860; \quad (U_A-U_B)_I = H_I = 0;$$

VALORES DE AJUSTE $n = 0,287$

$$q_{III}/q_{crit} = 1,664; \quad q_{II}/q_{crit} = 0,598$$

b) VALORES DEDUCIDOS PARA

$$[q_I/(U_A-U_B)_I] \cdot [(U_A-U_B)_{crit}/q_{crit}] = 0,631$$

$n=0,287$ y $\epsilon_{II} = -125 \text{ l/m}^2$

CASO 3.- AJUSTE CON LOS ESTADOS TENSIONALES CORRESPONDIENTES A LA ALTURA MINIMA OBSERVADA Y AL PESO PROPIO

condiciones $A > 0$ y $B > 0$.

a) Definición de los valores de n y ϵ_{II} del modelo, para ajuste de la curva de presiones para los estados I ($\Lambda_E=540$) y II ($\Lambda_E=665,0$)

$$\Lambda_E = 665,0; \quad H=125; \quad (U-U_B)/(U_A-U_B) = 0,5292 \rightarrow II$$

$$\Lambda_E = 540,0; \quad H=0; \quad (U-U_B)/(U_A-U_B) = 0,5252 \rightarrow I$$

$$\frac{(U-U_B)}{(U_A-U_B)} = \frac{[(A/B)-[(A/B)-1]a]^{n+1}-1}{[(A/B)]^{n+1}-1}$$

$$II \rightarrow (A/B)_{II} = (267,4 + \epsilon'_{II}) / (157,4 + \epsilon'_{II})$$

$$I \rightarrow (A/B)_I = (524 + \epsilon'_{II}) / (199,5 + \epsilon'_{II})$$

Valores de n y ϵ'_{II} que ajustan el modelo en los puntos I y II

VALORES DE AJUSTE $n = 0,287$; $(\epsilon'_{II} = -126 \text{ T/m}^2)$

b) VALORES DEDUCIDOS PARA $(A/B)_{III}$ y $[(U-U_B)/(U_A-U_B)]_{III}$ con $n=0,287$ y $\epsilon'_{II} = -126 \text{ T/m}^2$.

$(A/B)_{III}$; $[(U-U_B)/(U_A-U_B)]_{III}$. Valores incompatibles con las condiciones $A > 0$ y $B > 0$.

Valores máximos posibles $(A/B)_{III} = 0$; $[(U-U_B)/(U_A-U_B)]_{III} = 0,6683$ que se corresponderían con una altura máxima de validez $H_{\text{máx}} = 189,6$.

c) Expresión de los caudales definidos por el modelo

$$\frac{q}{q_{\text{crit}}} = \frac{(U_A - U_B)_{\text{crit}}}{(U_A - U_B)} = \frac{(n+1) \cdot (A/B - 1) \cdot B_{\text{crit}}}{(A/B)^{n+1} - 1} \left(\frac{B_{\text{crit}}}{B} \right)^n$$

Valores de B en Tn/m^2 ; $B_{III} = -6,7 T/m^2$; $B_{crit} = 10,4 T/m^2$;

$$B_{II} = 31,4 T/m^2; B_I = 73,5 T/m^2.$$

Crítico $(A/B)_{crit} = 1,000$; $(u_A - u_B)_{crit} = H_{crit} = 168$;

$$(II) (A/B)_{II} = \frac{(267,4 - 126)}{(157, -126)} = 4,503; \quad (u_A - u_B)_{II} = H_{II} = 125,0$$

$$(I) (A/B)_I = \frac{(524,0 - 126)}{(195,5 - 126)} = 5,415; \quad (u_A - u_B)_I = H_I = 0;$$

$$q_{III}/q_{crit} = ---; \quad q_{II}/q_{crit} = 0,553$$

$$[q_I / (u_A - u_B)_I] [(u_A - u_B)_{crit} / q_{crit}] = 0,416$$

D.2.5.-Curvas características de caudales obtenidos por la modelización. Comparación con los caudales reales aforados en el drenaje

En el epígrafe D.2.4. se han obtenido en el cimientó los valores de los parámetros n y ϵ'_{II} que ajustan el modelo tomando como base dos estados tensionales y la curva de relación $u(x,H)$ en un punto intermedio de la zona de filtración ($a=0,4242$). De los estados tensionales disponibles se han utilizado dos de ellos en cada caso procediendo al ajuste y obteniendo resultados para los parámetros n y ϵ'_{II} con los siguientes valores:

-Caso I.- Ajuste con los estados de alturas máxima y mínima observadas; $n=0,75$; $\epsilon'_{II}=3,5 \text{ T/m}^2$.

-Caso II.- Ajuste con los estados de altura máxima y embalse vacío; $n=0,426$; $\epsilon'_{II}=-25 \text{ T/m}^2$.

-Caso III.- Ajuste con los estados de altura mínima y embalse vacío; $n=0,287$; $\epsilon'_{II}=-126 \text{ T/m}^2$.

A partir de estos valores de los parámetros se pueden deducir las curvas de caudales definidas por el modelo para las distintas alturas de embalse, considerando que la forma de evolución de las tensiones efectivas corresponde a una distribución lineal en toda la zona del contacto y un giro en el cimientó con un punto fijo C. Se obtienen así por medio del modelo curvas de relación de caudales cuyos valores se expresan en el cuadro IV y se representan en las figuras 14, y comparándolas con las curvas de caudales reales, obtenidas por el ajuste de sus valores más significativos.

CUADRO IV

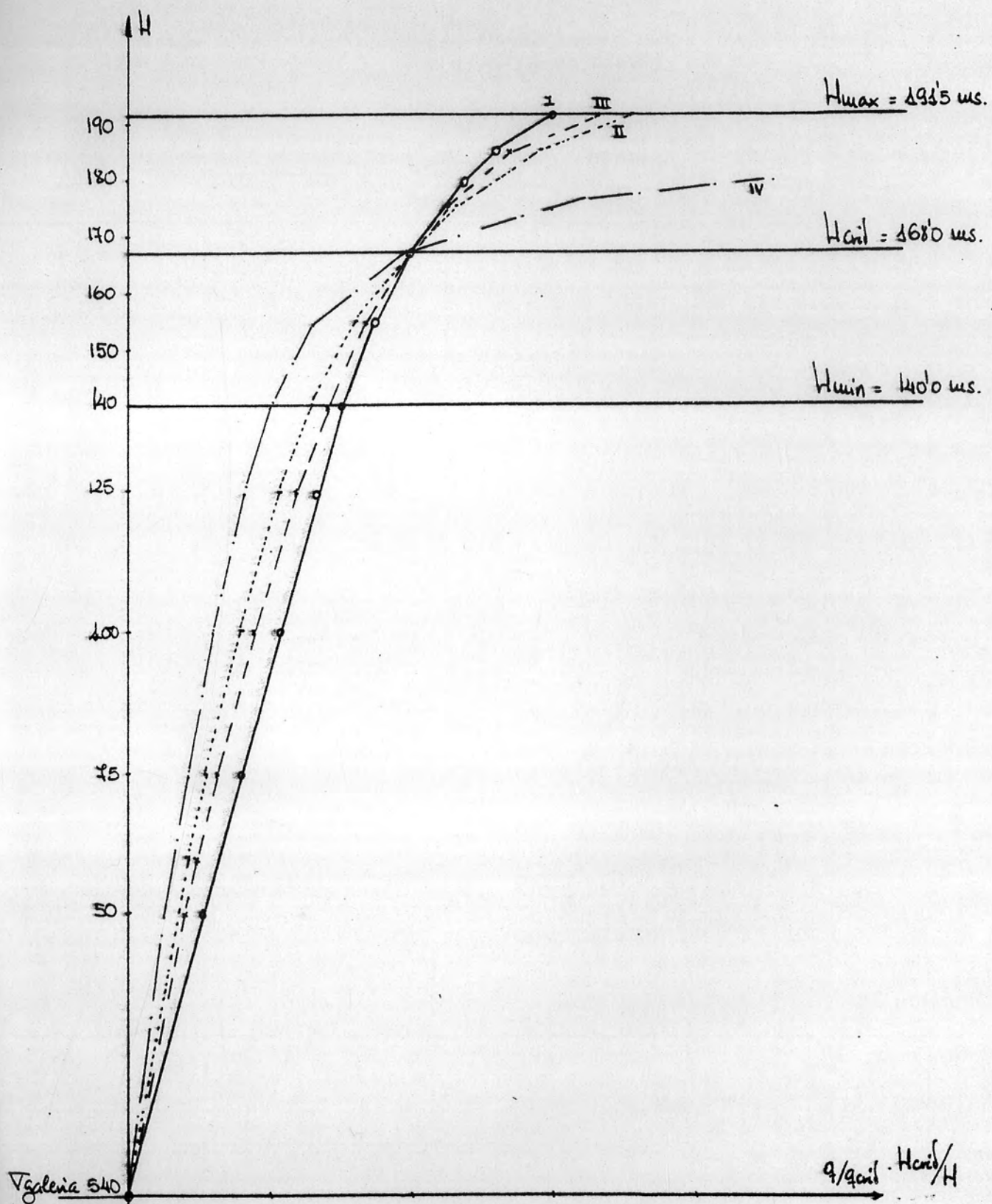
n=0,750 $\epsilon'_{ }=3,5$			n=0,426 $\epsilon'_{ }=-25,0$			n=0,287 $\epsilon'_{ }=-126$		
$U-U_B$	q	H_{crit}	$U-U_B$	q	H_{crit}	$U-U_B$	q	H_{crit}
U_A-U_B	q_{crit}	H	U_A-U_B	q_{crit}	H	U_A-U_B	q_{crit}	H
191,5	0,681	1,555	0,681	1,460				
185,0	0,633	1,314	0,623	1,235				
175,0	0,593	1,098	0,589	1,070				
168,0	0,576	1,000	0,576	1,000		0,576	1,000	
155,0	0,555	0,877	0,561	0,913		0,539	0,701	
140,0	0,539	0,786	0,552	0,849		0,532	0,603	
125,0	0,529	0,723	0,545	0,804		0,529	0,553	
100,0	0,518	0,650	0,538	0,751		0,528	0,504	
75,0	0,510	0,597	0,534	0,712		0,537	0,473	
60,0	0,503	0,555	0,530	0,681		0,526	0,450	
0,0	0,494	0,490	0,525	0,631		0,525	0,416	

I. Curva de ...

II. Curva ...

III. Curva ...

IV. Curva ...



- I. Curva de caudales reales.
 II. Curva modelizada $n = 0.750$; $\sigma_{II} = 3.5 T/m^2$
 III. Curva modelizada $n = 0.426$; $\sigma_{II} = -25.0 T/m^2$
 IV. Curva modelizada $n = 0.287$; $\sigma_{II} = -126.0 T/m^2$

FIGURA 14