

ASIENTOS EN UNA PRESA DE ESCOLLERA DURANTE SU CONSTRUCCION

Por MANUEL y JOSÉ DÍAZ DE RÁBAGO,
Ingenieros de Caminos.

Después de una breve e interesante reseña histórica de las presas de escollera y de un análisis de sus ventajas, pasan los autores a exponer un método de cálculo de los asientos del pedraplén, cuyos resultados comparan con los medidos en obra en presas construídas y los consideran suficientemente aproximados.

Las primitivas presas de escollera aparecen en California con los buscadores de oro, a mediados del siglo XIX, y son consecuencia inmediata de las necesidades mineras de aquel país. Su emplazamiento en parajes montañosos con ilimitadas cantidades de materia prima para su construcción y malas comunicaciones, aconsejaría en muchas ocasiones, aun hoy día, que la técnica de la construcción ha adelantado considerablemente, el proyecto de este tipo de presa. En 1859 era terminada la French Lake Dam, que, con altura superior a 20 m., puede considerarse como la primera presa de escollera construída, ya que los azudes constituidos por este material y un entramado más o menos resistente de madera, tan típicos en nuestros ríos, no deben considerarse como tales.

En las primeras decenas del presente siglo, las presas de escollera se multiplican, pasan a otros países y poco a poco alcanzan singular importancia. Los nuevos adelantos en la explotación de canteras, así como en el movimiento y transporte de grandes volúmenes de piedra, las hacen cada vez más económicas frente a otros tipos de presas.

Este gran desarrollo de las presas de escollera puede comprobarse fácilmente. En efecto: basta ordenar las presas con altura mayor de 30 m., desde un punto de vista cronológico, para obtener las curvas que se acompañan en el gráfico adjunto (fig. 1.^a). La clasificación se ha efectuado atendiendo a la fecha de su terminación.

En la citada figura puede apreciarse que la curva correspondiente a las presas de escollera crece en mayor proporción que la que representa a todos los tipos de presa. Este aumento, en tanto por ciento, no es de extrañar, ya que cuando los problemas de una cimentación difícil o de transporte aconsejan prescindir de la solución fábrica, el proyecto de un dique de materiales sueltos, escollera, tierra o presa mixta de tierra y escollera es recomendable y a veces imprescindible. La elección de uno u otro tipo dependerá de las circunstancias que concurren en cada caso, tanto desde el punto de vista de la obtención económica de los materiales, como del de la topografía de la cerrada, volumen de obra, plazo de ejecución, medios auxiliares, clima, etc. En España puede decirse no se han

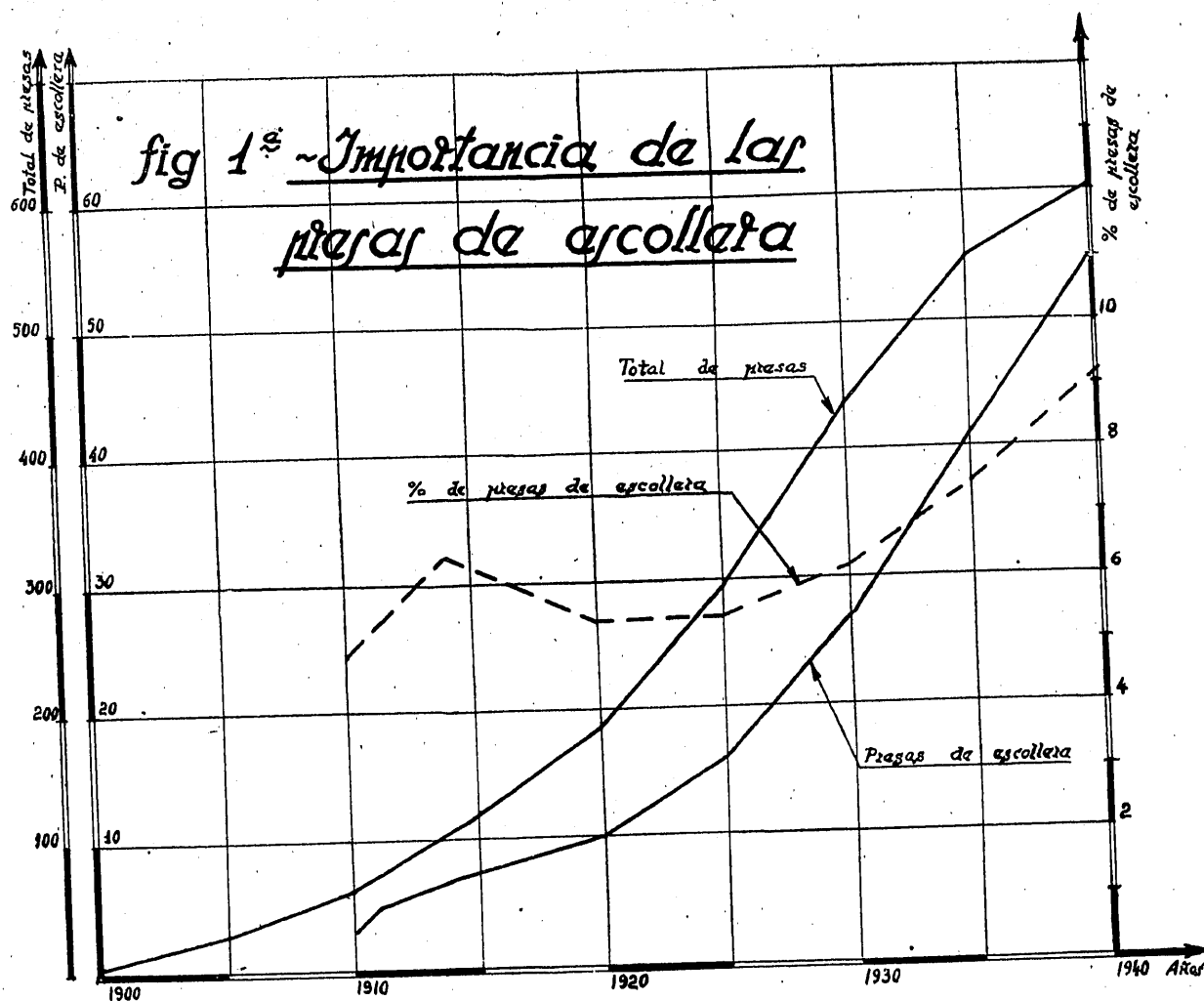
construído hasta ahora presas de escollera; sin embargo, el agotamiento de los buenos emplazamientos, las malas comunicaciones, la escasez de cemento y la abundancia de piedra, son factores que obligarán a dar cada vez mayor importancia a dichas presas.

Uno de los problemas más interesantes que deben resolverse al proyectar una presa de materiales sueltos, es el cálculo previo de los asientos. Los últimos adelantos conseguidos en el campo de la Mecánica del Suelo permiten abordarlo cada día con mayores garantías de aproximación.

Como esas presas suelen cimentarse sobre terrenos modernos, de tránsito, areniscas, conglomerados, margas, pizarras, yesos, etc., es necesario estudiar los asientos que se produzcan en la cimentación como consecuencia de las nuevas cargas que modifican su estado tensional. Así, en la presa de Bou-Haniffa la deformación medida en el cimiento fué de 11 cm., y el asiento previsto, 4 cm.; diferencia que se debe a no tener en consideración, en el cálculo, la compresión de los terrenos oligocenos que, sobre margas eocenas, constituyen la base de la presa (el asiento real de las margas fué de 3,8 cm.). Durante la construcción de la presa de Ghrib, se observó y registró un asiento de unos 15 cm., y en la de Malpaso se midió una deformación máxima de 110 cm.

Con independencia de los anteriores valores, el propio dique asienta y se consolida; deberán, por tanto, proyectarse las "contraflechas" necesarias para mantener un resguardo uniforme en toda la coronación. En el caso de una presa de escollera con pantalla de hormigón armado, se estudiará ésta detenidamente, de forma que pueda seguir los asientos que se produzcan en el pedraplén. Se conseguirá así reducir las grietas a un valor mínimo, y una vez reparadas, las pérdidas por filtraciones serán perfectamente aceptables. En la presa de Ghrib, el caudal filtrado es de 2 l./seg., a embalse mediado; en Foun-el-Gueiss, 6 l./seg., con el embalse a $\frac{3}{4}$ de su capacidad total, y en Bou-Haniffa, inferior a 3 l./seg., a embalse lleno.

Señalada la importancia de la previsión de asientos en una presa de escollera, se expone a continuación el estudio de las deformaciones de un pedraplén durante su construcción.



Notación.

En el presente análisis, se ha empleado la siguiente notación:

Z_* = altura total de la presa.

Z = altura alcanzada en el instante t de la construcción.

z = altura correspondiente a un punto, P .

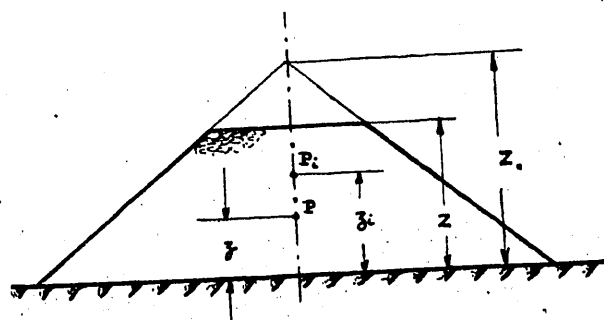


Figura 2.^a

z_i = altura correspondiente al punto P_i .

p_z = presión del punto P .

p_0 = presión inicial en el pedraplén.

E = coeficiente de elasticidad de la escollera.

γ = densidad aparente de la escollera.

ϵ_0 = coeficiente de porosidad inicial.

ϵ_m = coeficiente de porosidad media.

ϵ = coeficiente de porosidad.

A = constante adimensional ligada con el coeficiente de elasticidad. Con P_0 y ϵ_0 define la curva porosidad-presión del pedraplén dentro de un ciclo de histeresis.

ξ_i = asiento del punto P_i ($Z < Z_*$).

ξ_{i*} = asiento máximo del punto P_i ($Z = Z_*$).

ξ = asiento acumulado para la cota Z .

ξ_* = asiento acumulado para la cota Z_* .

ξ'_i = asiento relativo del punto P_i .

ξ'_{i*} = asiento relativo máximo de P_i .

ξ' = asiento acumulado relativo para la cota Z .

ξ'_* = asiento acumulado relativo para $Z = Z_*$.

Hipótesis previas.

Antes de exponer el razonamiento matemático que justifica las fórmulas obtenidas, conviene sintetizar las hipótesis de que se parte; éstas son:

1.^a Se considera que la compresión del pedraplén se rige por la logarítmica de Terzaghi; no existe, por tanto, expansión lateral.

2.^a Se admite en la escollera una cohesión nula

3.^a Se prescinde de su grado de humedad.

4.^a Se supone que los asientos siguen instantáneamente a la aplicación de la carga, no considerando la división de la deformación (*short settlement, main settlement y post settlement*).

5.^a Se admite un pedraplén de composición uniforme.

6.^a Se admite, con Terzaghi, que las presiones verticales en planos horizontales son prácticamente proporcionales a la altura alcanzada por el pedraplén sobre estos planos; y

7.^a Se considera un coeficiente de elasticidad de la escollera proporcional a la presión. Se prescinde de la variación del coeficiente de porosidad.

Asientos debidos al peso propio. Asientos acumulados.

En el proyecto de la presa de Salt Spring, para la determinación de los asientos debidos al peso propio, que se producen principalmente durante la construcción, se admitió una relación cuadrática entre éstos y la cota medida sobre el cimientto, esto es, según el esquema de la figura 3.^a, la hipótesis:

$$\frac{\xi_B}{\xi_A} = \left(\frac{Z_B}{Z_A} \right)^2 \quad (1)$$

ley empírica que es sólo una primera aproximación

de la más general, que se justificará a continuación.

La anterior expresión permite, una vez conocidas ξ_A , Z_B y Z_A , calcular ξ_B . Ahora bien: ξ_B y ξ_A no son medibles en obra, ya que la construcción de la presa no es instantánea. Conviene, por tanto, considerar con mayor detalle el problema.

Sea un punto, P_i , en el interior del macizo de escollera, y supongamos el instante $t = t_i$ en que se ha alcanzado en la obra la cota z_i . Para un instante $t' > t$, se habrá alcanzado con la escollera la cota Z ($Z > z_i$) y el punto P_i habrá asentado una cantidad, ξ_i . Al terminar la obra $Z = Z_*$, el asiento del punto P_i será ξ_{i*} .

Todos estos valores son medibles en el campo;

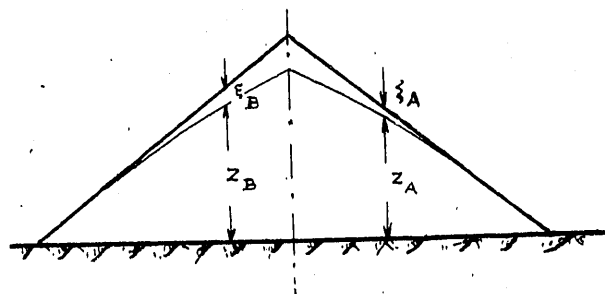


Figura 3.^a

así, durante la construcción de la presa de Bou-Haniffa se realizaron observaciones en distintas secciones, disponiéndose referencias en el macizo de escollera sobre una misma vertical y obteniéndose las curvas de asiento de los diferentes puntos P_i . En la figura 5.^a se dan varias de estas curvas correspondientes a uno de ellos.

En la citada figura se señala la llamada curva de asientos acumulados, que puede obtenerse de las ante-

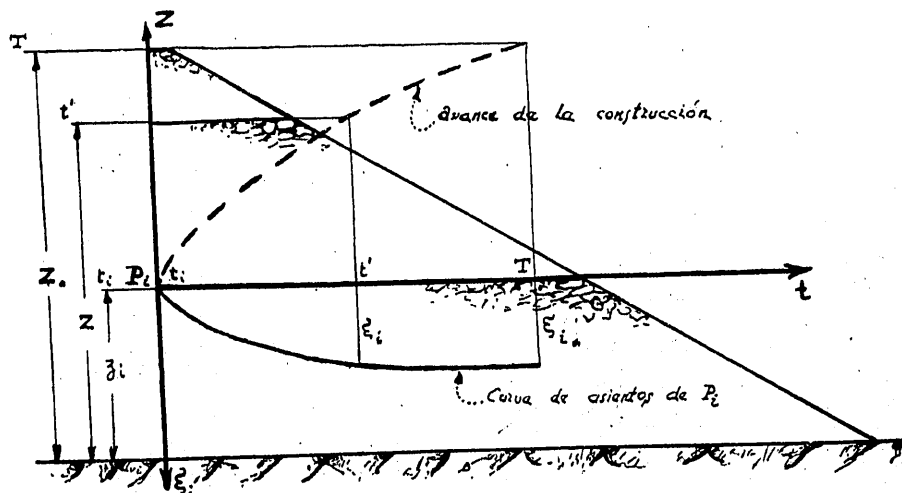


Figura 4.^a

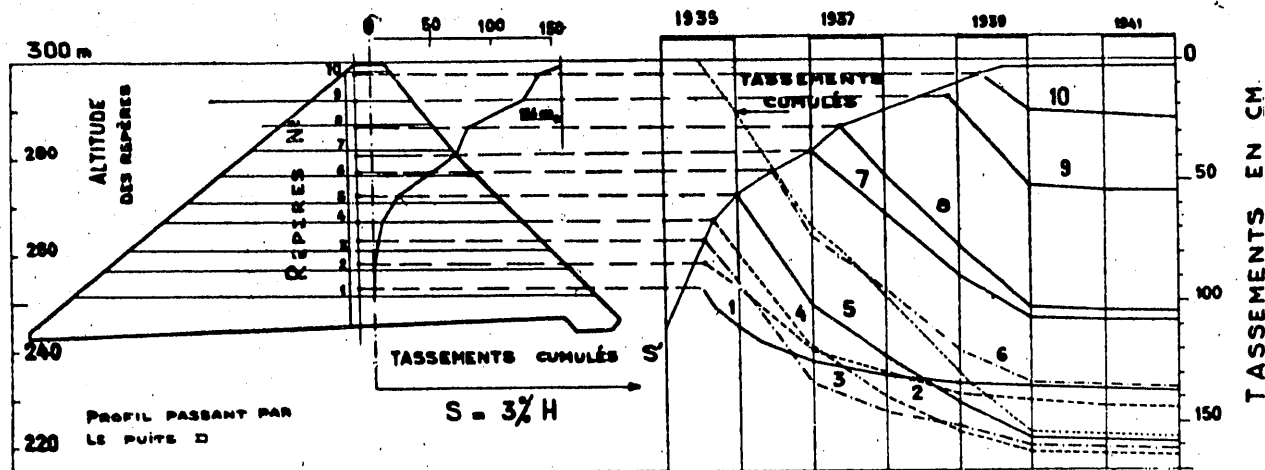


Fig. 5.^a — Asiento de la propia escollera. Observación de las referencias colocadas en el pozo D (J. C. O., según documento P. y C-B. T. de la S. R., febrero 1944).

riores mediante una sencilla construcción gráfica, o bien analíticamente. Los valores ξ_A y ξ_B , de la expresión [1], son, en realidad, asientos acumulados, esto es, valores ficticios no medibles directamente y que, sin embargo, definen el asiento de la presa. A continuación se calculan todos estos asientos.

Cálculo de los asientos del punto P_i .

En el punto P , para un estado de la obra fijado por la cota Z , se tiene una presión:

$$p_z = \gamma (Z - z) + p_0, \quad [2]$$

y un coeficiente de porosidad ε , definido por la ecuación:

$$\varepsilon = -\frac{1}{A} \ln \frac{p_z}{p_0} + \varepsilon_0. \quad [3]$$

En ambas expresiones, p_0 , ε_0 y A , son constantes características del pedraplén (sólo en el ciclo de histe-

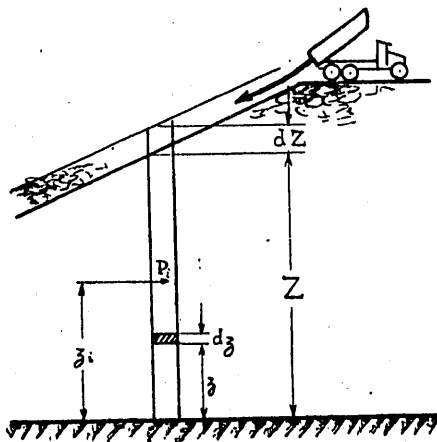


Figura 6.^a.

resis considerado), que pueden determinarse mediante tres ensayos.

El coeficiente de elasticidad de la escollera no cumple la ley de Hooke; de ahí que no pueda admitirse la expresión [1]; este coeficiente vale:

$$E = -\frac{d p_z}{d \varepsilon} (1 + \varepsilon) = A (1 + \varepsilon) p_z; \quad [4]$$

siendo $\frac{d \varepsilon}{d p_z}$ el llamado coeficiente de apelmazamiento.

Supuesto un índice medio de huecos, ε_m , que admitimos constante, se tiene:

$$E \simeq A (1 + \varepsilon_m) p_z = \frac{p_z}{\omega}; \quad [5]$$

siendo $\frac{1}{\omega} = A (1 + \varepsilon_m) = \text{constante}.$

Partiendo de estas bases, al variar Z en dZ , se tendrá $d p_z = \gamma dZ$, y cada elemento dz sufrirá un asiento, s , tal, que:

$$\frac{d p_z}{E} = -d\varepsilon = -\frac{s}{dz}; \quad [6]$$

designando $d\varepsilon$ la deformación unitaria. En consecuencia:

$$s = -d p_z \frac{dz}{E} = -\gamma dZ \frac{\omega dz}{\gamma (Z - z) + p_0}. \quad [7]$$

El punto P_i asentará la suma de todos los s comprendidos entre $z = 0$ y $z = z_i$, o sea:

$$d\xi_i = \int_{z=0}^{z=z_i} s = \omega dZ \ln \frac{\gamma (Z - z_i) + p_0}{\gamma Z + p_0}. \quad [8]$$

Este punto empieza a asentar para $Z = z_i$; por tanto, para una cota $Z > z_i$, se tendrá:

$$\xi_i = \omega \int_{z_i}^Z \ln \frac{\gamma(Z - z_i) + p_0}{\gamma Z + p_0} dZ =$$

$$= \frac{\omega}{\gamma} \left[(\gamma Z + p_0) \ln \frac{\gamma(Z - z_i) + p_0}{\gamma Z + p_0} - (\gamma z_i + p_0) \ln \frac{p_0}{\gamma z_i + p_0} + \gamma z_i \ln \frac{p_0}{\gamma(Z - z_i) + p_0} \right], \quad [9]$$

o bien la ecuación adimensional:

$$\xi'_i = \omega \left[\left(1 + \frac{1}{\mu}\right) \ln \frac{\mu(1 - \alpha) + 1}{1 + \mu} - \left(\frac{1}{\alpha\mu + 1} \ln \frac{1}{\alpha\mu + 1} + \alpha \cdot \mu \ln \frac{1}{\mu(1 - \alpha) + 1}\right) \right]; \quad [10]$$

siendo:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi'_i = \frac{\xi_i}{Z} \\ \mu = \frac{\gamma Z}{p_0} \\ \alpha = \frac{z_i}{Z} \end{array} \right. \quad [11]$$

Cálculo de los asientos acumulados.

Para la obtención de la ley de asientos acumulados que puede hallarse gráficamente una vez obtenidos los asientos de unos cuantos puntos P_i , basta el siguiente artificio analítico:

La expresión [8], en el caso que $Z = z_i$, queda en la siguiente forma:

$$d\xi = \omega dz_i \ln \frac{p_0}{\gamma z_i + p_0} \quad [12]$$

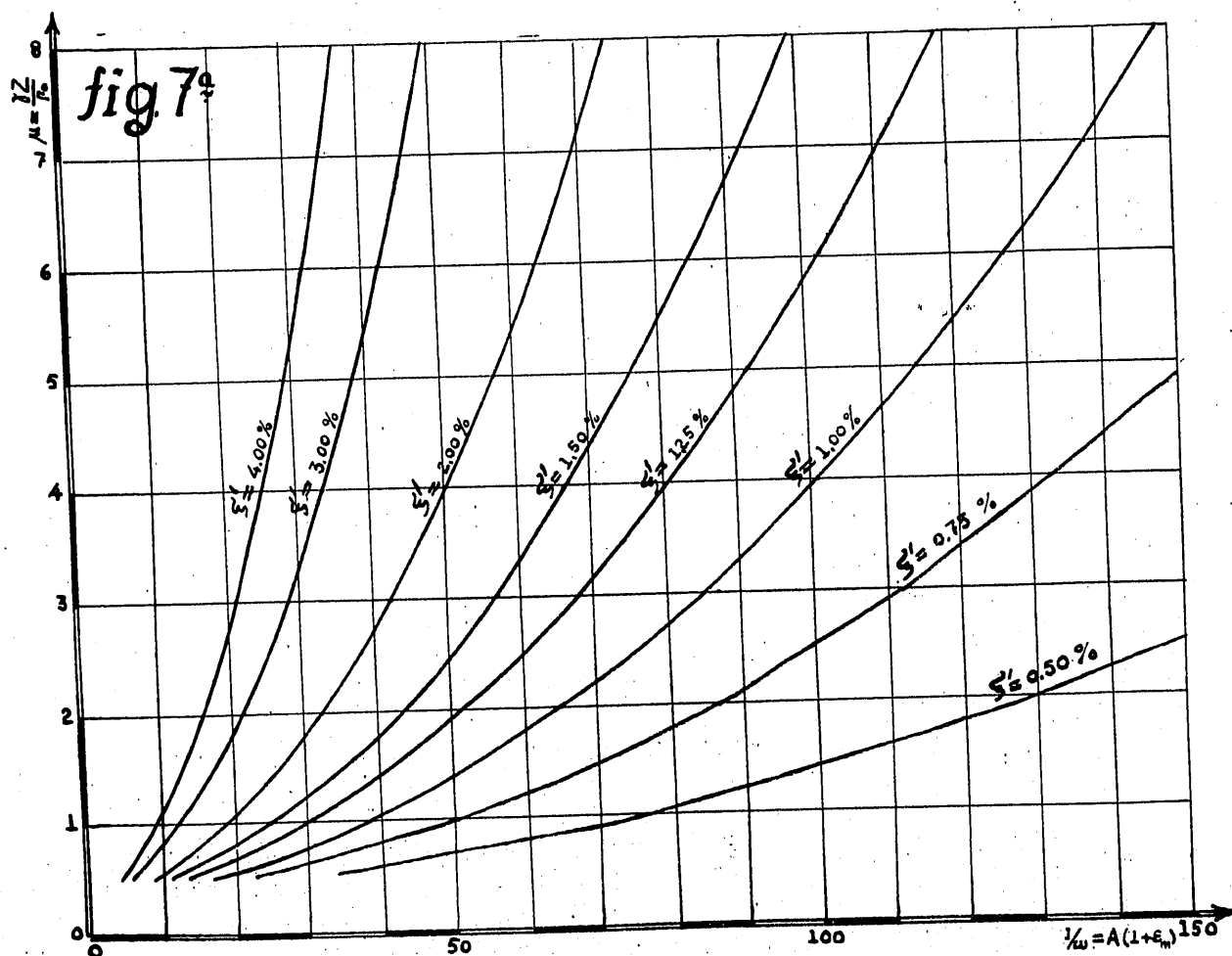
El asiento acumulado para la cota Z valdrá, por tanto:

$$\xi = \omega \int_{z_i=0}^{z_i=Z} \ln \frac{p_0}{\gamma z_i + p_0} dz_i =$$

$$= \frac{\omega}{\gamma} \left[-(p_0 + \gamma Z) \ln \frac{p_0 + \gamma Z}{p_0} + \gamma Z \right], \quad [13]$$

o bien en fórmula adimensional:

$$\xi' = \omega [1 - (1 + \frac{1}{\mu}) \ln (1 + \mu)]; \quad [14]$$



Abaco para determinar los asientos durante la construcción.

siendo:

$$\mu = \frac{\gamma Z}{p_0} \quad y \quad \xi' = \frac{\xi}{Z}$$

Esta ley nos ha permitido dibujar el ábaco adjunto, que sirve para determinar el máximo asiento previsible en el macizo de escollera.

Comprobación y utilización del método de cálculo expuesto.

Las leyes [10] y [14], que permiten valorar los asientos producidos durante la construcción de una presa de escollera, quedan, indudablemente, justificadas si se admiten las hipótesis previas en que se basa su obtención analítica. Con objeto de determinar el grado en que es admisible la aceptación de estas hipótesis, es preciso comparar los resultados obtenidos

mediante el cálculo matemático, y los que se deducen directamente de la experimentación y observación en presas ya construídas. La obtención de los datos necesarios para esta comprobación, es difícil; sin embargo, durante la construcción de la presa de Bou-Hanifia se midieron y registraron las deformaciones de la escollera en diferentes pozos verticales, y estas observaciones nos permiten abordarla. Ahora bien: el perfil de Bou-Hanifia es restringido, la escollera ha sido colocada con grúa o arreglada a mano, según permitía el tamaño de los bloques; el volumen de huecos es mínimo y, en consecuencia, se trata, por tanto, de un caso en cierto modo límite, y con este criterio deben considerarse los asientos que resultan de los cálculos.

A efectos de esta comprobación, se tomaron los valores registrados en el pozo D, en el que se producen los máximos asientos, por estar situado en una de las secciones centrales de la presa. Estos valores son los siguientes:

CUADRO I. — Asientos registrados en Bou-Hanifia.

PUNTO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Asiento parcial .	42,5	60	86	98	102	88	70	75	40	18
Asiento acumulado.	,	5,5	14,5	20	34,5	55,5	82	92	134,5	147,5
Cota.	7,5	12,7	17,5	21,25	26,9	31,74	35,55	41,65	46,25	53,33

La aplicación a esta presa de las fórmulas [10] y [14], permite obtener, mediante los cálculos resumidos en los cuadros que se adjuntan, las deformaciones del pedraplén.

CUADRO II. — Asientos parciales.

$$\xi'_i = \frac{\xi_i}{Z_*} = \omega' \left[(1 + 1/\mu_*) \lg \frac{\mu_*(1-\alpha) + 1}{1 + \mu_*} - (1/\mu_* + \alpha) \lg \frac{1}{\alpha \mu_* + 1} + \alpha \mu_* \lg \frac{1}{\mu_*(1-\alpha) + 1} \right];$$

$$\omega' = \frac{\omega}{0,43429} = \frac{1}{6,66}; \quad \mu_* = \frac{\gamma Z_*}{p_0} = 1,25.$$

PUNTO	α	ξ'_i/ω' (‰)	ξ'_i (‰)	ξ_i (cm.)
1	0,136	5,11	0,77	42,5
2	0,233	7,80	1,17	64
3	0,318	9,60	1,44	80
4	0,388	10,32	1,55	85
5	0,448	11,32	1,70	92
6	0,578	11,05	1,66	93
7	0,646	10,38	1,56	86
8	0,758	8,46	1,27	70
9	0,840	6,32	0,95	52
10	0,970	1,40	0,21	12

CUADRO III. — Asientos acumulados.

$$\xi' = \omega' [\lg e - (1 + 1/\mu) \lg (1 + \mu)];$$

$$\omega' = \frac{\omega}{0,4343} = \frac{1}{6,66};$$

$$\mu_* = 1,25.$$

PUNTO	Z (m.)	$\mu = \frac{Z}{Z_*} \mu_*$	ξ' (‰)	$\xi = \xi' Z$ (cm.)	ξ_i (cm.)
1	7,50	0,170	0,51	4	—
2	12,70	0,289	0,88	11	7
3	17,50	0,397	1,13	20	16
4	21,25	0,483	1,37	29	25
5	26,90	0,612	1,67	45	41
6	31,74	0,720	1,93	61	57
7	35,55	0,808	1,81	76	72
8	41,65	0,942	2,40	100	96
9	46,25	1,050	2,64	122	118
10	53,33	1,210	2,92	153	149

NOTA. — En la última columna se dan los asientos con relación al punto 1, para que sean comparables con los obtenidos en Bou-Hanifia en iguales condiciones.

Con todos estos valores se han dibujado las curvas representadas en el gráfico adjunto, al que se lleva asimismo a efectos comparativos el resultado que se obtiene en caso de aceptar para el cálculo la hipótesis cuadrática de Salt Spring. El estudio de estas curvas es del máximo interés y demuestra que, dentro de la marcha general que la técnica sigue en la resolución de sus problemas, las fórmulas [10] y [14] permiten una mayor aproximación en el cálculo de los asientos en una presa de escollera y los relacionan con las cons-

yor volumen de finos, mientras que alturas excesivas con rocas blandas suelen ser perjudiciales. En consecuencia, variando ésta y las restantes condiciones de puesta en obra, se pueden obtener diferentes escolleras con una misma roca; para cada una de éstas deben realizarse *in situ* ensayos que permitan determinar las constantes de Terzaghi, conocidas las cuales el ábaco de la figura 8.^a permite calcular los máximos asientos y fijar así altura de vertido, volumen de agua de lavado y demás condiciones de

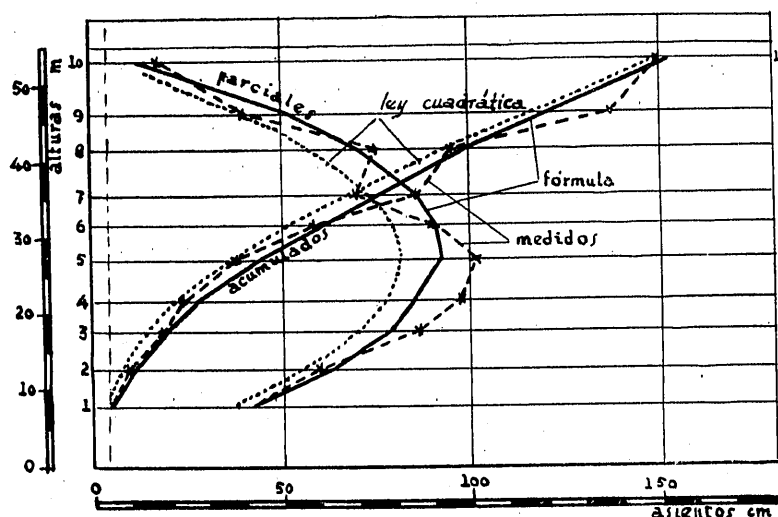


Figura 8.^a

tantes características de aquella, de forma que el técnico puede obtener una primera previsión de las deformaciones y, posteriormente, durante la obra, realizar una labor complementaria de comprobación y reajuste.

A este efecto, conviene considerar que las deformaciones de una presa de escollera dependen de:

- a) Factores geométricos de la sección, y
- b) Factores característicos de la propia escollera.

Ahora bien: para un caso dado y fijadas las dimensiones de la sección tipo, resulta fundamental la elección de un método de puesta en obra conveniente. En efecto: la altura de vertido, por ejemplo, influye considerablemente en las condiciones del pedraplén; basta considerar que una altura bien elegida, en principio del orden de 10 a 20 m., producirá una mayor compacidad y trabazón en las piedras, una rotura previa de puntos y aristas frágiles y un ma-

puesta en obra y explotación de cantera que conviene emplear durante las obras.

Análogamente, la fórmula [10] permite comprobar durante la construcción la exactitud lograda en cada caso o cualquier modificación más o menos eventual de las condiciones de la escollera. Con objeto de poder llevar a cabo esta comprobación, conviene preparar referencias en la presa que permitan medir las curvas de asiento de los distintos puntos de una misma vertical.

En consecuencia, justificado el fundamento teórico del método de cálculo que se acaba de exponer y comprobada su aplicación práctica, creemos puede aceptarse su uso para el estudio de los asientos de una presa de escollera, asientos que permite valorar y prever con suficiente aproximación, midiendo la influencia en el fenómeno de las distintas constantes que le caracterizan.