

INFLUENCIA DE LAS INYECCIONES EN EL ESTADO ELASTICO DE LA PRESA

Por MANUEL VIDAL PARDAL,
Ingeniero de Caminos.

Es el presente artículo una interesante exposición del tema del epigrafe, que pone de manifiesto lo beneficioso de esa influencia en los diversos aspectos considerados.

La técnica de las inyecciones para impermeabilizar el terreno de asiento de una presa, para efectuar un eficaz cosido de la fábrica y el terreno, e incluso para impermeabilizar el cuerpo de la misma cuando se presentan filtraciones, o antes si se temen, está hoy día muy perfeccionada y cuenta con la suficiente experiencia para considerar superada su época de ensayo e investigación.

El objetivo principal perseguido por las inyecciones de lechada de cemento es el de mejorar las condiciones de impermeabilidad de la presa. Ahora bien: vamos a ver cómo, simultáneamente, conseguimos una evidente mejoría en sus condiciones elásticas para resistir los esfuerzos a que está sometida mediante la adopción de algunas precauciones.

Comencemos por hacer notar que al rellenar con cemento los huecos que puede presentar la masa del hormigón, mejoramos sus condiciones al aumentar su compacidad, densidad y resistencia.

Esta consideración bastaría por sí sola para ver los efectos favorables de las inyecciones, no sólo en cuanto a impermeabilidad se refiere, sino en cuanto a sus condiciones elásticas; pero vamos a analizar algo más detalladamente la influencia de las mismas, pasando revista a los diversos esfuerzos a que la presa está sometida, para ver en qué sentido quedan modificados.

Son estos esfuerzos los siguientes:

- A) Retracción del fraguado.
- B) Efectos producidos por los cambios de temperatura.
- C) Peso propio.
- D) Empuje del agua y efectos de subpresión.

A) *Retracción del fraguado.* — El tiempo transcurrido desde la terminación del hormigonado hasta que se efectúan las inyecciones, hace que hayan tenido ya lugar la casi totalidad de retracciones y deformaciones del hormigón por esta causa.

Debido a esto, la posible influencia de las inyecciones, aun en el supuesto de que cosan las juntas, resulta despreciable.

En efecto: recordemos a este respecto los resultados obtenidos en el laboratorio de Stuttgart, en prismas de hormigón de 1 m. de longitud y 400 cm.² de sección, con hormigón de 355 Kg. de cemento por 1 021 m.³ de árido, y que representamos en la figura 1.^a

En nuestro caso hay que tener en cuenta los efectos contrarios que producirá el entumecimiento del hormigón, debido al agua de la inyección — enérgico curado que penetra en toda la masa —, y para ello representamos gráficamente (fig. 2.^a) los ensayos realizados en el citado laboratorio con prismas de hormigón de las mismas características de los ensayos de retracción.

El entumecimiento desaparece con el tiempo, al ir desapareciendo, por ir secándose, el agua de la inyección; pero sus efectos son más eficaces que los que

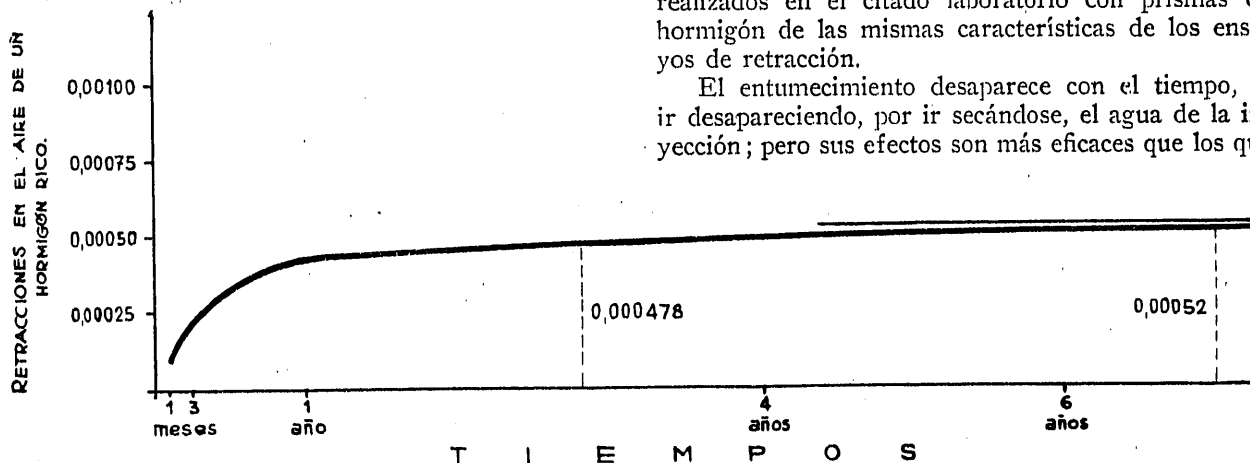


Figura 1.^a

produce el curado corriente, por su mejor penetración y mayor duración en la masa.

De los gráficos antes reproducidos podemos deducir el orden de magnitud de la retracción remanente debida al fraguado combinado con el entumecimiento de la inyección.

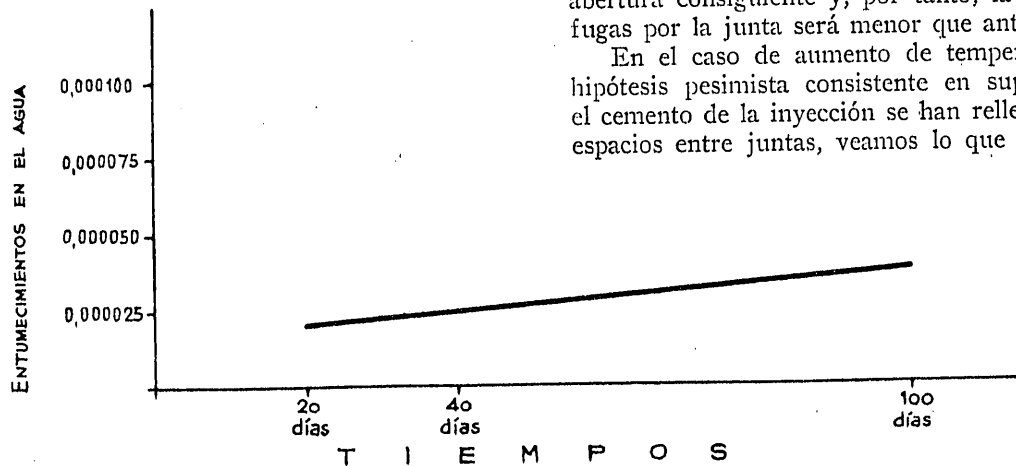


Figura 2.ª

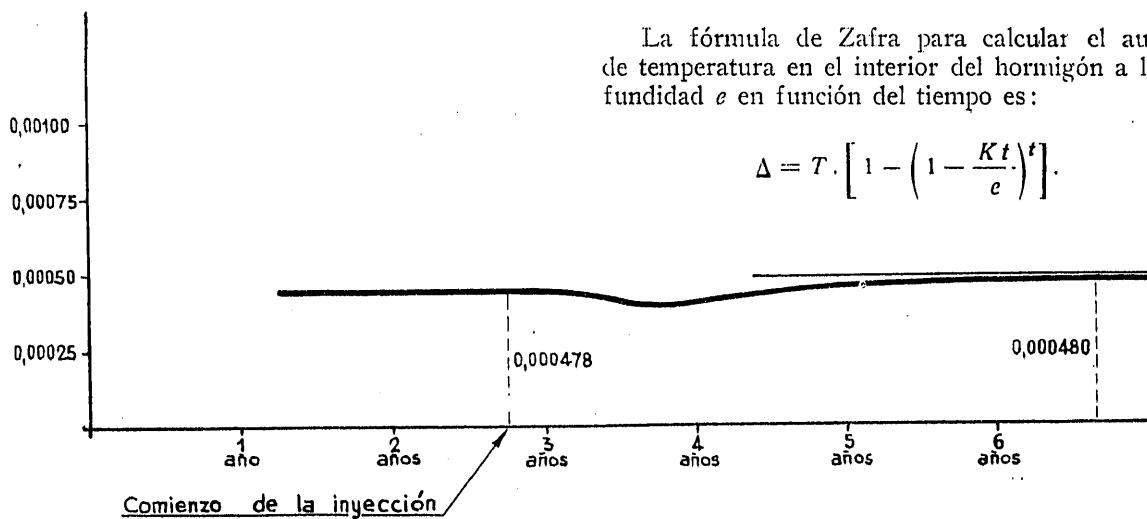


Figura 3.ª

El aspecto de la curva será el siguiente (fig. 3.ª):

El orden de magnitud de la retracción remanente será $0,000480 - 0,000478 = 0,000002$.

Multiplicando por el coeficiente de elasticidad del hormigón, resultan cargas del orden de los 0,35 kilogramos/cm.² perfectamente admisibles aun en aquellas zonas en que no estén totalmente anuladas por los esfuerzos de compresión debidos a los otros efectos.

B) *Efectos producidos por los cambios de temperatura.* — Al variar la temperatura de la fábrica de la presa, las juntas se abren o cierran, según esa variación sea decreciente o creciente.

En el caso de disminución de temperatura, después de las inyecciones y si el cemento de las mismas ha penetrado en el espacio entre juntas no relleno por el material plástico que en ellas se suele colocar, o bien por haber desplazado al mismo, sustituyéndole, el efecto de la inyección es muy favorable, pues la abertura consiguiente y, por tanto, la posibilidad de fugas por la junta será menor que antes de inyectar.

En el caso de aumento de temperatura y en la hipótesis pesimista consistente en suponer que con el cemento de la inyección se han relleno todos los espacios entre juntas, veamos lo que sucedería:

La fórmula de Zafra para calcular el aumento de temperatura en el interior del hormigón a la profundidad e en función del tiempo es:

$$\Delta = T \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{Kt}{e} \right)^t \right]$$

Siendo:

Δ = incremento, en grados.

T = temperatura exterior, en grados.

e = espesor, en centímetros.

t = tiempo, en horas.

K = constante = 0,5 para $t = 1$ hora.

No todas las juntas serán rellenas por la inyección en el tiempo más frío, puesto que se trabajará en todas las estaciones del año. Es decir, que las variaciones de temperatura hay que computarlas a estos efectos a partir de un cierto valor medio que,

según las profundidades de los puntos que consideremos en el interior del hormigón, estarán comprendidas entre unas temperaturas que no diferirán mucho de los 10 a los 20°. En los puntos del interior, las oscilaciones serán más atenuadas que en las proximidades de los paramentos a los cuales les afectará en mayor grado la variación diurna.

Vamos a estudiar esta última en la forma que exponemos a continuación:

Si suponemos en un día aumento de temperatura de 30°, mantenido durante seis horas, vamos a calcular el incremento de temperatura en los diversos puntos internos de la presa, anotando los resultados obtenidos mediante la fórmula anterior en el cuadro adjunto:

Profundidad del punto desde la superficie, en cm.	Δ en grados	σ_c $1.75 \cdot \Delta$ Kg./cm. ²
10	26	45,5
20	19	33,3
30	14	24,5
40	11	19,2
50	9	15,6
100	5	8,8
200	3	5,3
300	2	3,5
400	1	1,8

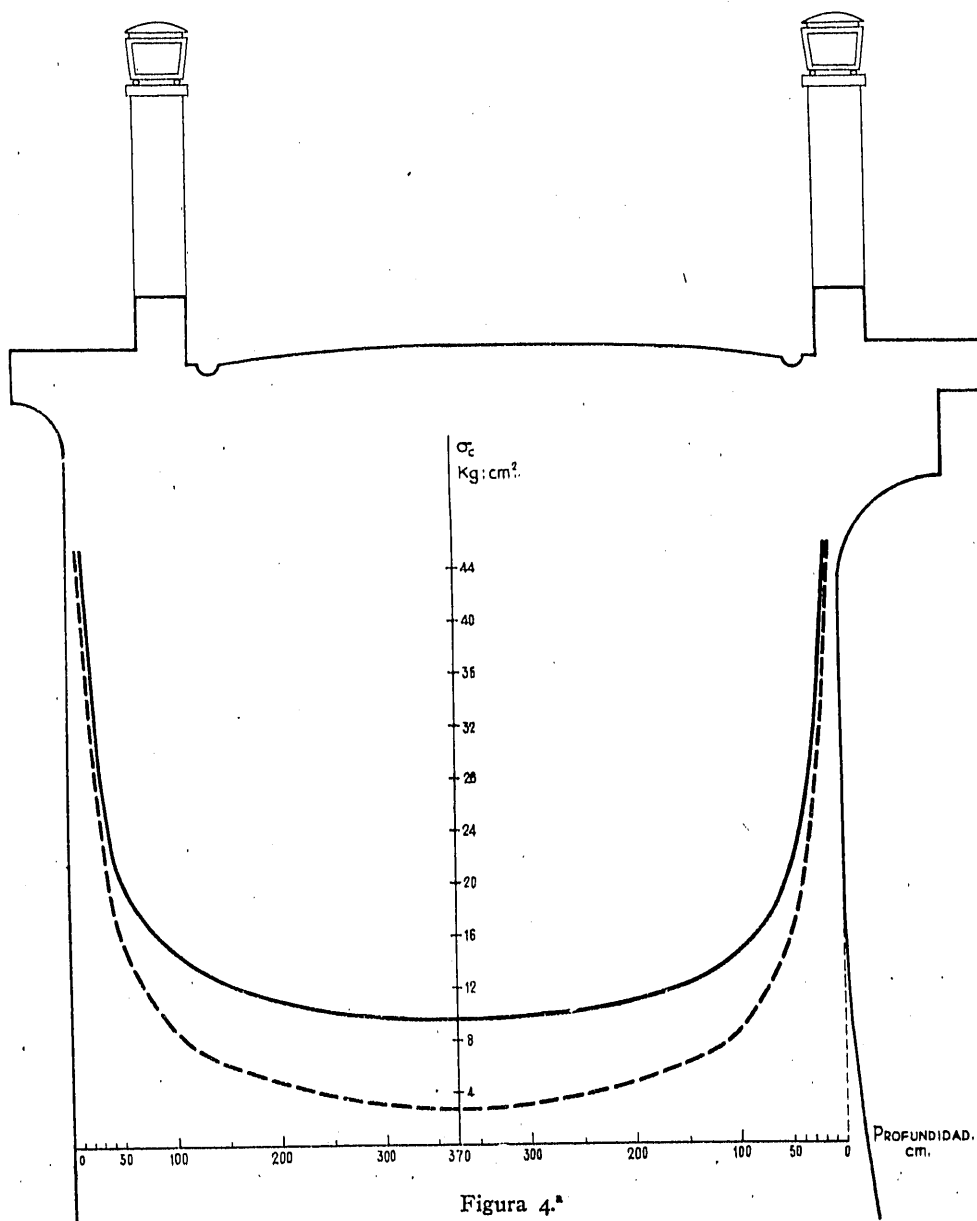


Figura 4.^a

Como el coeficiente de dilatación térmica del hormigón es $\approx 0,00001$, el esfuerzo de compresión que originaría la dilatación al suponer fijos los estribos de la presa sería:

$$0,00001 \cdot E \cdot \Delta = 0,00001 \times 175\,000 \times \Delta = 1,75 \cdot \Delta \text{ Kg./cm.}^2$$

En la última casilla del cuadro adjunto citado figuran estos esfuerzos de compresión y con ellos dibujamos el gráfico de la figura 4.^a (curva de trazos).

La curva real será próxima a la dibujada con línea continua, es decir, que las compresiones nacidas por esta causa serán más uniformes en toda la masa, y los efectos de flexión que las diferentes dilataciones originan serán menores.

En ese gráfico vemos que a pocos centímetros de la superficie de los paramentos las compresiones por esta causa tienen valores por bajo del máximo admisible. Sin embargo, no es la compresión, sino el esfuerzo de deslizamiento efectivo el que limita la carga máxima admisible en este caso. Calculemosle (figura 5.^a):

$$\begin{aligned} \tau &= da = db - ab = dc \cdot \cos \varphi - ob \cdot \operatorname{tg} \varphi = \\ &= dc \cdot \cos \varphi - (oc - bc) \cdot \operatorname{tg} \varphi = dc \cdot \cos \varphi - (oc - \\ &- dc \cdot \operatorname{sen} \varphi) \cdot \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma}{2} \cdot \cos \varphi - \left(\frac{\sigma}{2} - \frac{\sigma}{2} \cdot \right. \\ &\left. \cdot \operatorname{sen} \varphi \right) \cdot \operatorname{tg} \varphi = \frac{\sigma}{2} (\cos \varphi - \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{sen} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi). \end{aligned}$$

$$\tau = \frac{\sigma}{2} (\cos \varphi - \operatorname{tg} \varphi + \operatorname{sen} \varphi \cdot \operatorname{tg} \varphi)$$

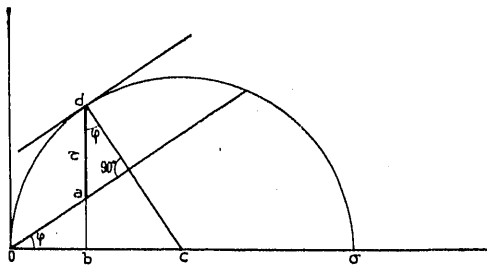


Fig. 5.^a — Círculo de Mohr.

Antes del efecto producido por las inyecciones, el gráfico de Mohr en el paramento de aguas abajo, así como en el de aguas arriba a embalse vacío, es el siguiente (fig. 6.^a):

Para $\operatorname{tg} \varphi = 0,75$, $\operatorname{sen} \varphi = 0,6$ y $\cos \varphi = 0,8$, valores que, sustituidos en la fórmula antes deducida, dan:

$$\tau = \frac{\sigma_a}{2} \cdot (0,8 - 0,75 + 0,6 \times 0,75) = 0,25 \cdot \sigma_a.$$

Al considerar el citado efecto, la σ_c antes nula pasa a tomar un cierto valor σ'_c . Vamos a pasar revista de los efectos que originará en las diversas zonas de la presa.

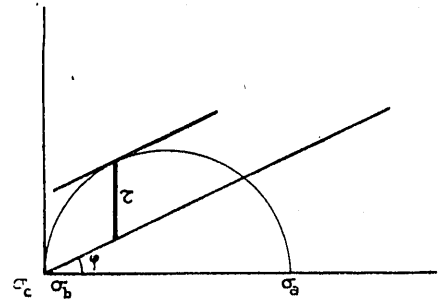


Fig. 6.^a — Paramento de aguas arriba, a embalse vacío, antes de las inyecciones. Paramento de aguas abajo, a embalse vacío o lleno, antes de las inyecciones.

Fuera de la zona de pantalla (franja de unos 7 metros de anchura junto al paramento de aguas arriba), los efectos de la inyección en este sentido son nulos, por no llegar las inyecciones a taponar las juntas.

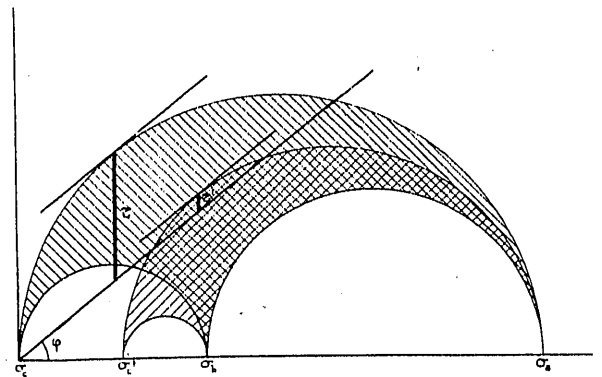


Fig. 7.^a — Parte interna y baja de la zona de pantalla, después de las inyecciones.

En la parte interna de la zona de pantalla habrá sitios donde la σ_c no alcance el valor de la menor compresión preexistente, y el gráfico de Mohr (figura 7.^a) nos hace ver el efecto favorable en cuanto

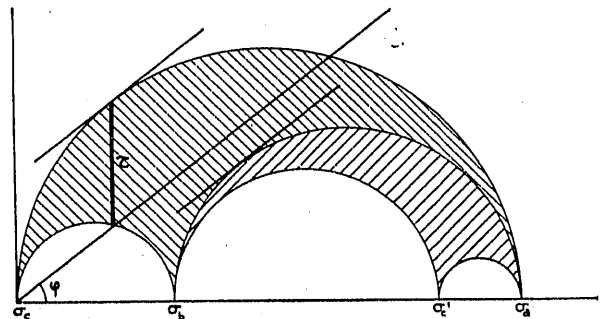


Fig. 8.^a — Parte interna y alta de la zona de pantalla, después de las inyecciones.

a disminución de deslizamiento efectivo, pues la τ pasa a ser τ' . En otros lugares, la σ'_c sobrepasará el valor de σ_b , pero sin llegar a valer σ_a ; es el caso representado en la figura 8.^a, donde los efectos de deslizamiento efectivo han quedado también mejorados y, como en el caso anterior, las compresiones máximas son las mismas, con la particularidad de que los círculos de Mörh quedan más alejados (figuras 7.^a y 8.^a) de la curva de resistencia intrínseca (Resistencia, de Fernández Casado, págs. 206 a 219).

En la parte de paramento de aguas arriba bañada por el agua, la variación de temperatura estará amortiguada y tendremos el caso de la figura 9.^a.

Ahora bien: en la parte alta de los paramentos, con la variación de temperatura pesimista supuesta, la σ'_c sobrepasa a la σ_a máxima preexistente, y la τ' a la τ , y el gráfico de Mörh será el siguiente (fig. 10).

Para evitar que el deslizamiento efectivo máximo que tendría que soportar el hormigón después de las inyecciones sea mayor del admitido en el cálculo de la presa, la σ'_c no debe sobrepasar la σ_a máxima antes existente, que era $\sigma_a = 21 \text{ Kg./cm.}^2$ al pie

del paramento de aguas abajo a embalse lleno.

¿Cómo conseguir esto? Haciendo que las juntas queden en sus partes cercanas al paramento rellenas de material plástico que absorba las dilataciones. ¿En qué profundidad debe suceder? En la que nos fija el gráfico de la figura 4.^a por la compresión de 21 kilogramos/cm.², o sea en unos 50 cm.

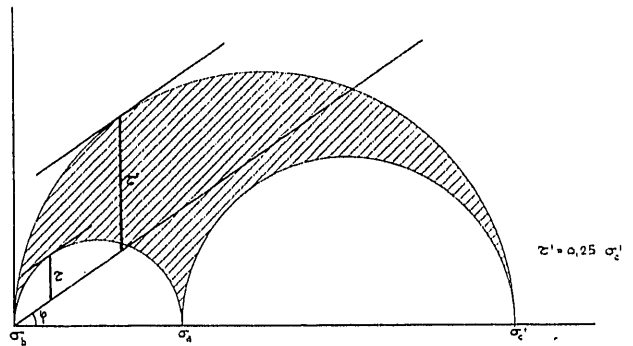


Fig. 10. — Paramento de aguas arriba, parte alta, a embalse vacío, después de las inyecciones. Paramento de aguas abajo, parte alta, a embalse vacío o lleno, después de las inyecciones.

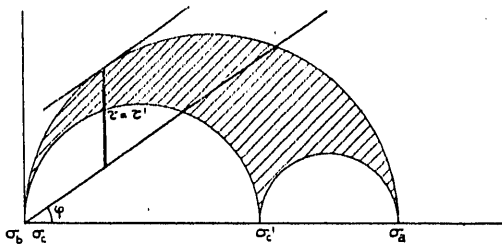


Fig. 9.^a — Paramento de aguas arriba bañado por el agua del embalse.

Inyectaremos arcilla por los sondeos próximos a las juntas en su zona próxima a los paramentos.

C) *Peso propio.* — El efecto de las inyecciones en lo que se refiere al peso propio, equivale al aumento de peso de la zona de la pantalla. Su efecto es similar al introducido por recrecimiento de la parte de coronación, pues equivale a suponer una componente vertical en el centro del rectángulo de

Comparación de las cargas antes y después de las inyecciones. (Influencia del peso inyectado.)

Sección considerada — Cotas en m.	EMBALSE LLENO				EMBALSE VACIO			
	Paramento de agua abajo		Paramento de agua arriba		Paramento de agua abajo		Paramento de agua arriba	
	Antes de inyectar Kg./cm. ²	Después de inyectar Kg./cm. ²	Antes de inyectar (1) Kg./cm. ²	Después de inyectar (2) Kg./cm. ²	Antes de inyectar Kg./cm. ²	Después de inyectar (3) Kg./cm. ²	Antes de inyectar Kg./cm. ²	Después de inyectar Kg./cm. ²
322,50	4,25	4,09	1,23	1,52	0,44	0,41	6,30	6,47
312,50	5,01	4,99	1,11	1,17	—0,38	—0,40	8,44	8,50
302,50	6,66	6,62	0,70	0,75	—0,40	—0,40	10,34	10,38
292,50	8,33	8,25	0,47	0,52	—0,30	—0,30	12,36	12,38
282,50	10,17	10,09	0,19	0,27	—0,14	—0,21	14,42	14,51
272,50	11,87	11,78	0,09	0,17	—0,07	—0,08	16,63	16,64
261,50	13,69	13,70	0,06	0,07	—0,01	0,03	19,11	19,07

(1) Con la subpresión supuesta en el proyecto de 0,70.

(2) Con la subpresión supuesta en el proyecto de 0,70. Después de formada la cortina impermeable mediante las inyecciones, la subpresión será menor y las cargas más estabilizadoras aún que las consignadas en esta casilla, que ya lo son más que las que existían antes de inyectar.

(3) La máxima tracción —0,40 sigue igual que la máxima deducida en el proyecto de la presa. Únicamente aumentan ligeramente las tracciones en algunas secciones.

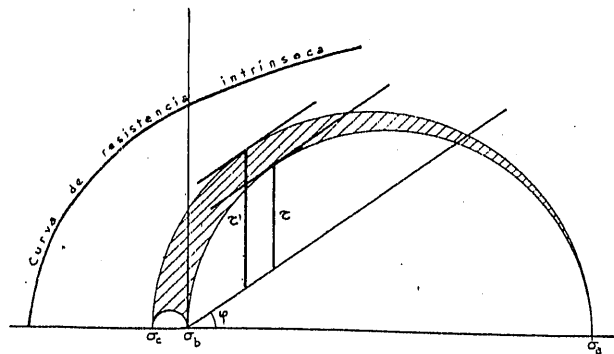
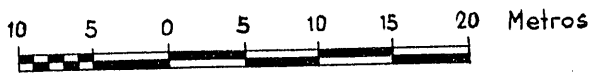


Figura 11.

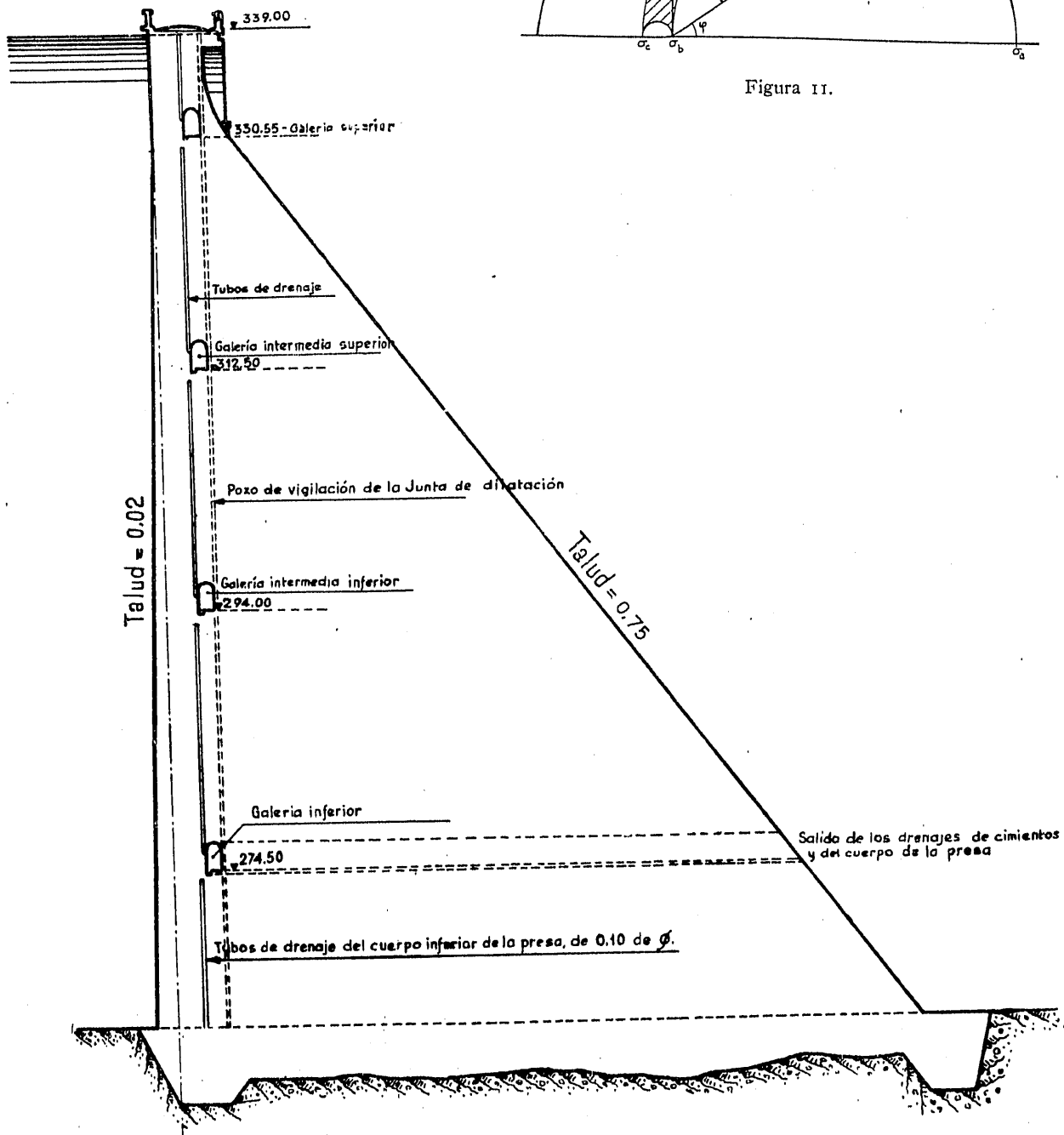


Figura 12.

pantalla teórica; el valor de la componente es el del peso del material inyectado.

Hecho el cálculo para una presa de 90 m. de altura y con el perfil dibujado en la figura 12 y el detalle de la figura 13, vemos en el cuadro resumen que acompañamos que las pequeñas tracciones que aparecían en el paramento de aguas abajo a embalse vacío permanecen sensiblemente iguales después de las inyecciones, y si bien quedan ligeramente aumentadas en algunas secciones, la máxima permanece la misma.

Además, observamos en el gráfico de Möhr de la figura 11 que, dados los valores relativos de compresión y tracción máximas, los deslizamientos efectivos quedan siempre por bajo de la curva de resistencia intrínseca.

Por otra parte, con el nuevo peso introducido mejoramos las condiciones de la presa a embalse lleno, que son las más interesantes.

D) Empuje del agua y efectos de subpresión. — Como consecuencia de las inyecciones, al formar una pantalla impermeable junto al paramento de aguas arriba, arraigada en el terreno impermeable, quedará suprimido, o al menos fuertemente disminuído, el efecto de subpresión, aun en el caso de que no se volviesen a perforar los drenes.

La eficacia lograda con pantallas de inyecciones de este tipo, arraigadas en terreno impermeable, en varias presas inyectadas por la Jefatura de Sondeos, permiten asegurar la disminución de la subpresión, haciendo innecesaria o de muy poca eficacia la persistencia de pantalla de drenes si la presa la tenía. No obstante, y como control del resultado conseguido por las inyecciones, siempre resulta interesante la reperforación de aquéllos, o su nueva perforación en el caso de no haberlos anteriormente, los cuales se deben ir practicando por tramos, una vez que las inyecciones se vayan efectuando.

Actualmente procedemos a ensayar en una presa con pantalla de drenes la colocación de unos tubos en las galerías donde desembocan aquéllos, tubos que atraviesan unos obturadores de madera que taponan los drenes y cuyo objeto es inyectar por ellos arcilla que los rellenen antes de proceder a la inyección general del hormigón.

Esto le ha sugerido a José Luis Fernández Casado la idea de colocar unas llaves en esos tubos, y de ese modo controlar el funcionamiento del dren. Acerca de esto prepara un artículo el citado compañero, por lo cual no creemos necesario dar aquí más detalles del procedimiento, que creemos de interés para el caso de presa que se construya en lo sucesivo.

Como resumen de lo expuesto, a continuación presentamos las siguientes conclusiones:

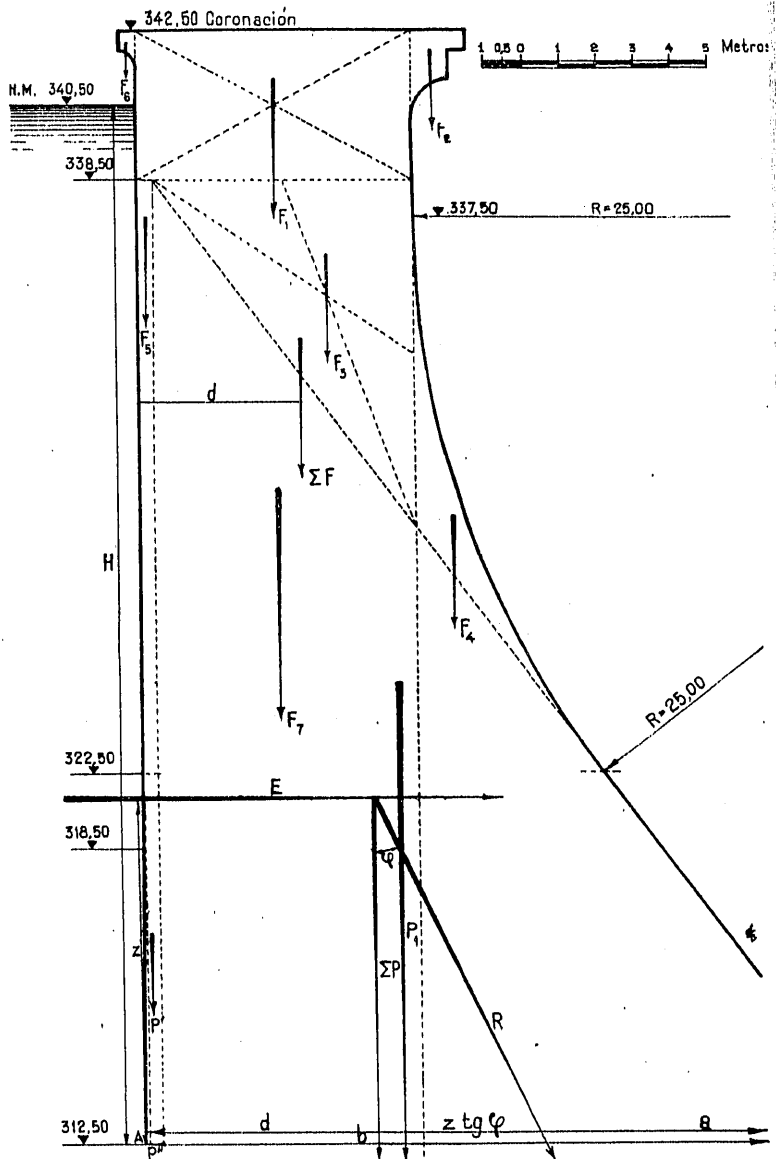


Figura 13.

Conclusiones.

1.^a Los efectos de retracciones de fraguado — muy pequeños, dado el lapso de tiempo transcurrido desde el hormigonado — se verán contrarrestados, en gran parte, con los efectos del eficaz curado que supone el agua de las inyecciones. Resulta así que, aun en la hipótesis pesimista de que las juntas hubieran quedado inutilizadas, los esfuerzos de tracción que se originarían son de un orden admisible.

2.^a Aun suponiendo que las juntas no conserven después de las inyecciones el material plástico con que han debido rellenarse durante su construcción y haya sido sustituido por el cemento de las inyecciones, las cargas máximas, tanto de compresión como de deslizamiento efectivo, quedan dentro de los va-

lores admitidos en los cálculos del proyecto para variaciones normales de temperatura ambiente en la región.

Si para mayor garantía hacemos la hipótesis, pesimista en extremo, de suponer una variación diurna de temperatura de 30° mantenida durante seis horas, bastará adoptar la precaución de inyectar arcilla en las zonas de juntas próximas a los paramentos en una profundidad de unos 50 cm. a partir de la superficie externa. En efecto: al permitir este material plástico la libre dilatación de las zonas más afectadas por la temperatura, quedan las tensiones máximas dentro de las admisibles, como hemos estudiado. En el paramento de aguas abajo, tal precaución bastará adoptarla únicamente hasta la cota donde alcanzan los efectos de la inyección. Las posibilidades de fugas por las juntas en tiempo frío se reducen apreciablemente con las inyecciones.

3.^a Debido a los efectos de cambio de temperatura, se mejoran en el resto de la zona inyectada las condiciones de resistencia del hormigón, según hemos podido comprobar con los gráficos de Möhr dibujados. Este efecto será tanto más eficaz cuanto el tiempo de la inyección sea más frío, si bien se parará la inyección al descender la temperatura de los 0°, por afectar las heladas al fraguado de la lechada de cemento.

4.^a La influencia que supone la introducción de un nuevo peso debido al material inyectado, es similar

al del recrecimiento de la coronación de la presa, dada la zona donde ello tiene lugar, y si bien trae como consecuencia el aumento de las pequeñas tracciones que ya se presentaban en el paramento de aguas abajo, a embalse vacío, resultan aún valores por bajo de los admisibles, la máxima anteriormente deducida no varía y, por el contrario, mejoran las condiciones a embalse lleno, caso que resulta muy ventajoso.

5.^a Mediante las inyecciones proyectadas, formaremos una pantalla impermeable — arraigada al terreno de la cimentación —, con la cual conseguiremos reducir los efectos de subpresión.

6.^a En presa de nueva construcción deberán proyectarse los drenes pensando en la conveniencia, que a veces resulta necesidad, de efectuar inyecciones en el cuerpo de la misma. Es por ello aconsejable disponer aquéllos de forma que puedan fácilmente rellenarse con arcilla, previamente a las inyecciones y que permitan ser también fácilmente vaciados una vez terminadas éstas, para que sirvan de control de su resultado.

Nota final.

En nuevo artículo nos proponemos dar a conocer el resultado de ensayos, que actualmente tenemos en estudio, con objeto de controlar la marcha de las inyecciones mediante aparatos registradores de la presión y de la absorción.