

CALCULO DE LA PROFUNDIDAD ACTIVA DE GRIETA EN PRESAS DE GRAVEDAD. INFLUENCIA DE LA SUBPRESION REALMENTE EXISTENTE EN LA MISMA. (*)

Por JESUS MARIA CRISTOBAL ZUBIZARRETA

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

En el presente artículo se trata de poner de manifiesto el importantísimo papel que juega la subpresión en la seguridad y economía de las presas de gravedad, siendo más interesante desde el punto de vista económico mantener a lo largo de la vida de la presa un valor de la subpresión lo más bajo posible que olvidarse de esto y aumentar la densidad del hormigón, cosa siempre difícil, o el talud de la presa.

Además y relacionado con esto se ha establecido en el artículo el concepto y cálculo de la profundidad de grieta activa en una sección de la presa como medida más indicativa de la seguridad real de la misma que la postura tradicional y quizá excesivamente conservadora de la ausencia de tracciones en cualquier punto de ella.

1. GENERALIDADES

A lo largo de la evolución del cálculo de presas se han dado distintas fases o estadios muy conocidos. Uno de ellos, y que ha dejado una gran repercusión en nuestros días, es la regla de Rankine, que, sin tener en cuenta la subpresión, preconizaba que en las presas de gravedad no debe existir tracción alguna.

Posteriormente, la rotura de la presa de Bonzey, en Francia, ocurrida en 1895, obligó a introducir en el cálculo de las presas el concepto de subpresión, concepto que hoy en día tiene una gran importancia, como veremos más adelante.

Como consecuencia de esto, Levy estableció un criterio para el dimensionamiento de presas de gravedad, que si bien era lógico, fue considerado excesivamente conservador, que decía que en cualquier punto del paramento de aguas arriba la compresión paralela a dicho paramento debía ser igual o mayor a la presión del agua en ese punto.

Estudios posteriores, como los de Lieekfeldt y Kiel o los de Link, atacaron el problema de forma más precisa y menos conservadora, y fueron los primeros en atribuir un papel relevante al concepto de grieta en la presa. El razonamiento era en el fondo similar al de Levy, pero menos estricto que el de éste, ya que admitía

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1973.

que el agua penetraba hasta un cierto punto, a partir del cual ya no podía seguir, el cual definía la profundidad activa de grieta. La máxima profundidad activa de grieta podía ser fijada a voluntad, en función de la mayor o menor prudencia del proyectista, y una vez fijada esta profundidad, el coeficiente θ de subpresión y la densidad γ del hormigón, el valor m del talud quedaba unívocamente determinado.

Aunque ya sabemos que las modernas teorías sobre la subpresión y su naturaleza de fuerza de masa han desvirtuado el fondo filosófico de las teorías antiguas, que consideraban a la subpresión como una fuerza de superficie a través del efecto de cuña que operaba sobre una grieta o fisura previamente formada, sin embargo, y para establecer fórmulas y conclusiones suficientemente válidas y aproximadas, desde el punto de vista cuantitativo, seguimos considerando que la subpresión actúa sobre una sección o superficie de la presa en la forma que exponemos más adelante.

En el momento actual la influencia de la regla de Rankine (que no consideraba la subpresión), por un lado, y el criterio de Levy, por otro, ha dado lugar a que en numerosos casos, como ocurre con la vigente Instrucción Española de Grandes Presas, se proscriba totalmente y de forma indiscriminada la aparición de tracciones en cualquier punto de una presa de gravedad. El criterio, que como primera orientación es interesante y hasta lógico, creemos que peca de una excesiva simplicidad y no parece pueda constituir una frontera lógica insalvable en el cálculo preciso y detallado de la presa, al menos sin someterlo a las matizaciones oportunas.

En efecto, creemos que no es posible clasificar todas las presas de gravedad exclusivamente por la ausencia de tracciones sin matizar los distintos factores que concurren en cada caso, referidos en especial a una información más detallada del estado tensional de una sección completa de la misma. Queremos decir con esto que, a nuestro juicio, no es igualmente perniciosa una tracción de 1 Kg/cm^2 en el paramento de aguas arriba cuando el paramento de aguas abajo tiene una compresión de 40 Kg/cm^2 , que cuando la compresión máxima es de 2 Kg/cm^2 .

En el primer caso prácticamente toda la sección está sometida a fuertes compresiones lo que dará una profundidad de grieta activa muy pequeña, mientras que en el segundo una gran parte de la sección está traccionada y el resto sometida a una pequeña compresión, lo que hará que la profundidad activa de grieta sea muy grande o incluso total.

Con esto queremos decir que la ausencia de tracciones, que equivale a una profundidad de grieta nula, es una condición buena como punto de partida, pero puede ser excesivamente conservadora en algunos casos, en que pueden admitirse profundidades de grietas pequeñas pero reales.

Es por esto por lo que sostenemos que si queremos afinar en el cálculo de una presa, podemos admitir una profundidad de grieta activa prudente y variable con las características de cada caso particular. Al admitir una profundidad de grieta estamos implícitamente admitiendo la existencia de tracciones, pero el valor absoluto de estas tracciones dependerá en cada caso, como hemos puesto de relieve anteriormente, del estado tensional total de la superficie considerada.

Hecho este preámbulo de tipo general, en el que defendemos que la variable estratégica para el cálculo y dimensionamiento de la presa debe ser la profundi-

dad de grieta activa en cualquier sección de la misma, pasamos a exponer el cálculo de esta profundidad para presas de gravedad de sección triangular, que vamos a ver depende del coeficiente de subpresión θ , del talud m y de la densidad del hormigón γ .

Para este cálculo se ha supuesto una ley de subpresión triangular de coeficiente reductor θ , el cual depende de la eficacia real del drenaje de la presa en el momento que se considere, y varía entre 0 y 1.

2. CALCULO PARA LA OBTENCION DE LA FORMULA DE LA PROFUNDIDAD ACTIVA DE GRIETA EN UNA PRESA DE SECCION TRIANGULAR

Sea

γ = densidad del hormigón.

m = talud de la presa.

θ = coeficiente de subpresión (ley triangular).

ω = densidad del agua (se ha tomado $\omega = 1$).

En la figura 1 damos un esquema de la ley de subpresión con drenaje de coeficiente reductor θ , suponiendo que no existe grieta.

Consideremos ahora una sección con grieta (figura 2) y sea x la profundidad de grieta activa que queremos calcular. Las fuerzas actuantes son: el peso, la subpresión, el empuje del agua y la reacción del terreno, cuyas leyes pueden verse en la figura 2.

$$\text{— Peso} = \frac{1}{2} m h h \gamma = \frac{1}{2} m h^2 \gamma$$

$$\text{— Subpresión} = \theta \left[x h + \frac{1}{2} (m h - x) h \right] = \theta x h + \frac{\theta}{2} m h^2 - \frac{\theta h x}{2} = \frac{\theta}{2} m h^2 + \frac{\theta}{2} h x$$

$$\text{— Empuje} = \frac{1}{2} h^2$$

— Reacción del terreno

$$R = \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} (m h - x)$$

Estableciendo el equilibrio estático $\begin{cases} \sum V = 0 \\ \sum M = 0 \end{cases}$

1.ª condición: $\sum V = 0$:

$$\frac{1}{2} m h^2 \gamma = \theta \left[\frac{1}{2} m h^2 + \frac{1}{2} h x \right] + \frac{\sigma_1 + \sigma_2}{2} (m h - x) \quad (1)$$

2.ª condición: $\sum M = 0$:

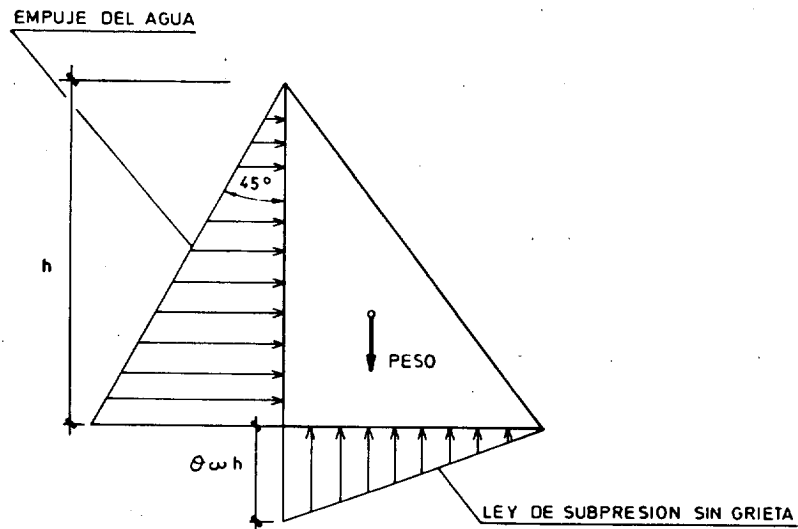


Figura 1.

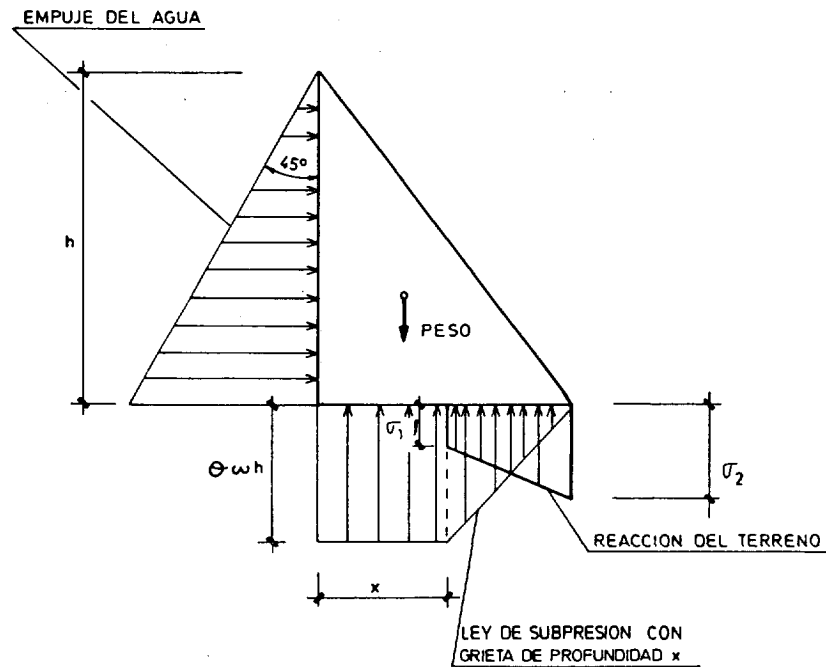


Figura 2.

Tomando momentos con respecto al pie de aguas abajo:

$$M_1 = \frac{1}{2} m h^2 \gamma - \frac{2}{3} m h = \frac{m^2 h^3 \gamma}{3} : \text{Debido al peso.}$$

$$M_2 = -\frac{1}{2} h^2 \gamma - \frac{1}{3} h = -\frac{h^3}{6} : \text{Debido al empuje del agua.}$$

$$M_3 = -xh \left[\left(\frac{x}{2} + mh - x \right) + \frac{h}{2} (mh - x) \frac{2}{3} (mh - x) \right] \theta = - \left[xh \left(mh - \frac{x}{2} \right) + \frac{h}{3} (mh - x)^2 \right] \theta: \text{ Debido a la subpresión.}$$

$$\begin{aligned} M_4 &= - \left[\frac{\sigma_2 + \sigma_1}{2} (mh - x) \frac{1}{3} (mh - x) + \sigma_1 (mh - x) \frac{1}{2} (mh - x) \right] = \\ &= - \left[\frac{\sigma_2 + \sigma_1}{6} (mh - x)^2 + \frac{\sigma_1}{2} (mh - x)^2 \right] = - (mh - x)^2 \left[\frac{\sigma_2 - \sigma_1}{6} + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\sigma_1}{2} \right] = - (mh - x)^2 \frac{\sigma_2 + 2\sigma_1}{6}: \text{ Debido a la reacción del terreno.} \end{aligned}$$

Haciendo $\sum M = 0$:

$$\begin{aligned} \frac{m^2 h^3 \gamma}{3} &= \frac{h^3}{6} + \left[xh \left(mh - \frac{x}{2} \right) + \frac{h}{3} (mh - x)^2 \right] \theta + (mh - x)^2 \frac{\sigma_2 + 2\sigma_1}{6}; \\ 2m^2 h^3 \gamma &= h^3 + 3xh(2hm - x)\theta + 2h(mh - x)^2\theta + (mh - x)^2(\sigma_2 + 2\sigma_1). \end{aligned} \quad (2)$$

De la ecuación (1) despejamos σ_2 :

$$\frac{mh^2(\gamma - \theta) - hx\theta - \sigma_1(mh - x)}{mh - x} = \sigma_2 \quad (3)$$

De la ecuación (2) despejamos σ_2 :

$$\frac{h^3(2m^2\gamma - 1) - (mh - x)^2(2h\theta + 2\sigma_1) - (2mh - x)3hx\theta}{(mh - x)^2} = \sigma_2 \quad (4)$$

Iguando las ecuaciones (3) y (4):

$$\begin{aligned} [mh^2(\gamma - \theta) - hx\theta - \sigma_1(mh - x)](mh - x) &= h^3(2m^2\gamma - 1) - \\ &- \theta(2mh - x)3hx - 2(mh - x)^2(h\theta + \sigma_1) \end{aligned}$$

De donde σ_1 es igual a:

$$\sigma_1 = \frac{m^2 h^3 \gamma + m h^2 \gamma x - \theta m^2 h^3 - 2 m h^2 x \theta - h^3}{(mh - x)^2}$$

Por hipótesis, al ser x la profundidad de grieta activa, σ_1 ha de ser igual a cero.

$$\sigma_1 = m^2 h^3 \gamma + m h^2 \gamma x - \theta m^2 h^3 - 2 m h^2 x \theta - h^3 = 0;$$

de donde:

$$x = \frac{h(m^2\gamma - \theta m^2 - 1)}{m(2\theta - \gamma)}$$

Si llamamos "y" a la profundidad relativa de grieta: en tanto por uno de la anchura total de la sección

$$y = \frac{x}{mh} = \frac{-\gamma + \theta + 1/m^2}{-2\theta + \gamma}$$

Con lo que la longitud relativa de sección no agrietada será:

$$1 - \frac{x}{mh} = \frac{-3\theta + 2\gamma - 1/m^2}{-2\theta + \gamma}$$

3. REPRESENTACION GRAFICA Y RESUMEN

Hemos obtenido anteriormente como fórmula de la profundidad relativa "y" de grieta activa:

$$y = \frac{x}{mh} = \frac{-\gamma + \theta + 1/m^2}{-2\theta + \gamma}$$

Esta fórmula relaciona dicha profundidad con las variables de las que depende, que son: la densidad del hormigón γ , el talud m de la presa y el coeficiente de sub-

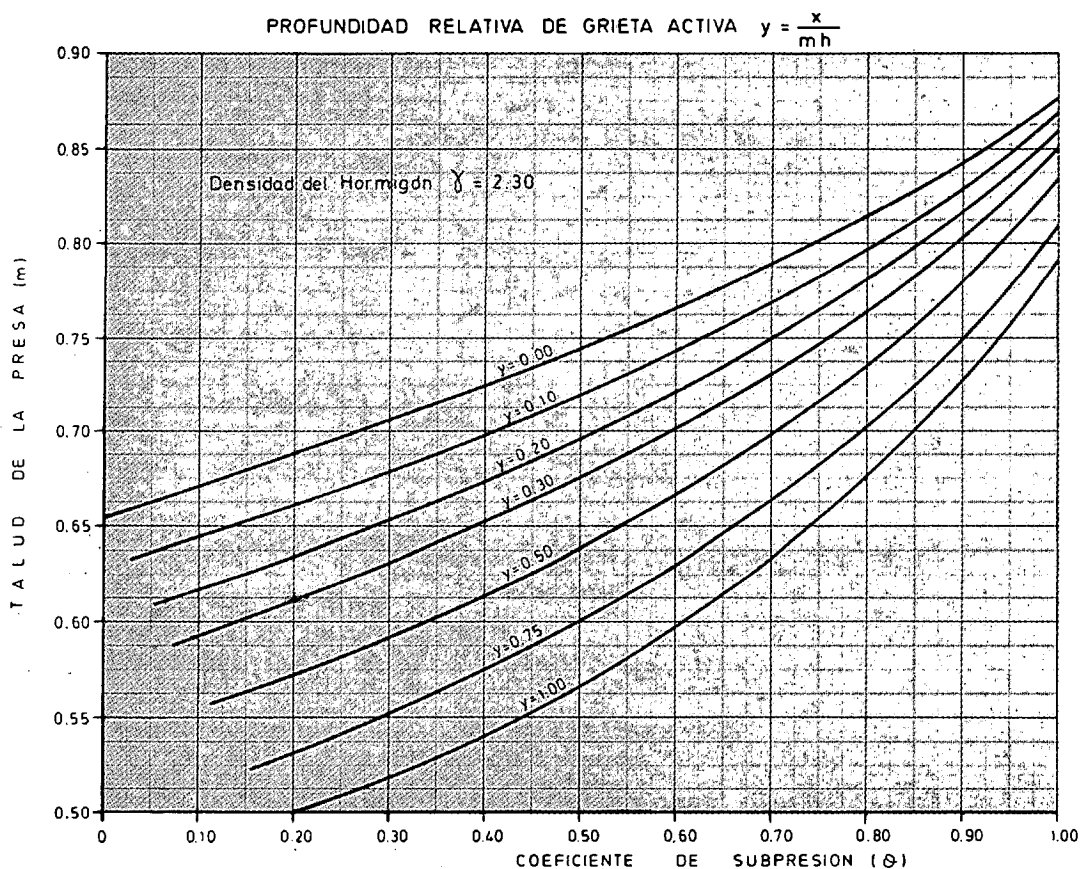


Figura 3.

presión θ , y permite resolver en forma rápida cualquier caso concreto que pueda presentarse.

Sin embargo, para tener una idea rápida y comparativa de la influencia que los distintos factores anteriormente citados juegan en la profundidad de la grieta activa, presentamos a continuación diferentes ábacos ilustrativos.

En ellos puede verse el importante papel que en la seguridad de una presa tiene el coeficiente de subpresión θ , lo que lleva aparejado la gran importancia que hay que dar al hecho de tener en todo momento un drenaje adecuado en buenas condiciones de funcionamiento, con objeto de que el coeficiente θ tenga el valor más bajo posible. En la figura 3 puede verse que para una profundidad de grieta dada el talud disminuye apreciablemente con el valor de θ . Así, por ejemplo, suponiendo una densidad de hormigón $\gamma = 2,30$, para una profundidad relativa de grieta $y = 0$, el talud es de 0,875 para $\theta = 1$ (ausencia total de drenaje), mientras que para un valor de $\theta = 0,50$ el talud pasa a ser de 0,750, reducción que como se ve es muy importante. Esto indica claramente la conveniencia de conseguir que el valor de θ sea el menor posible mediante una red de drenaje adecuada y en perfecto funcionamiento a lo largo del tiempo.

En los ábacos puede verse también la influencia de la densidad del hormigón sobre el valor del talud, para un valor dado (parámetro) del coeficiente de subpresión θ .

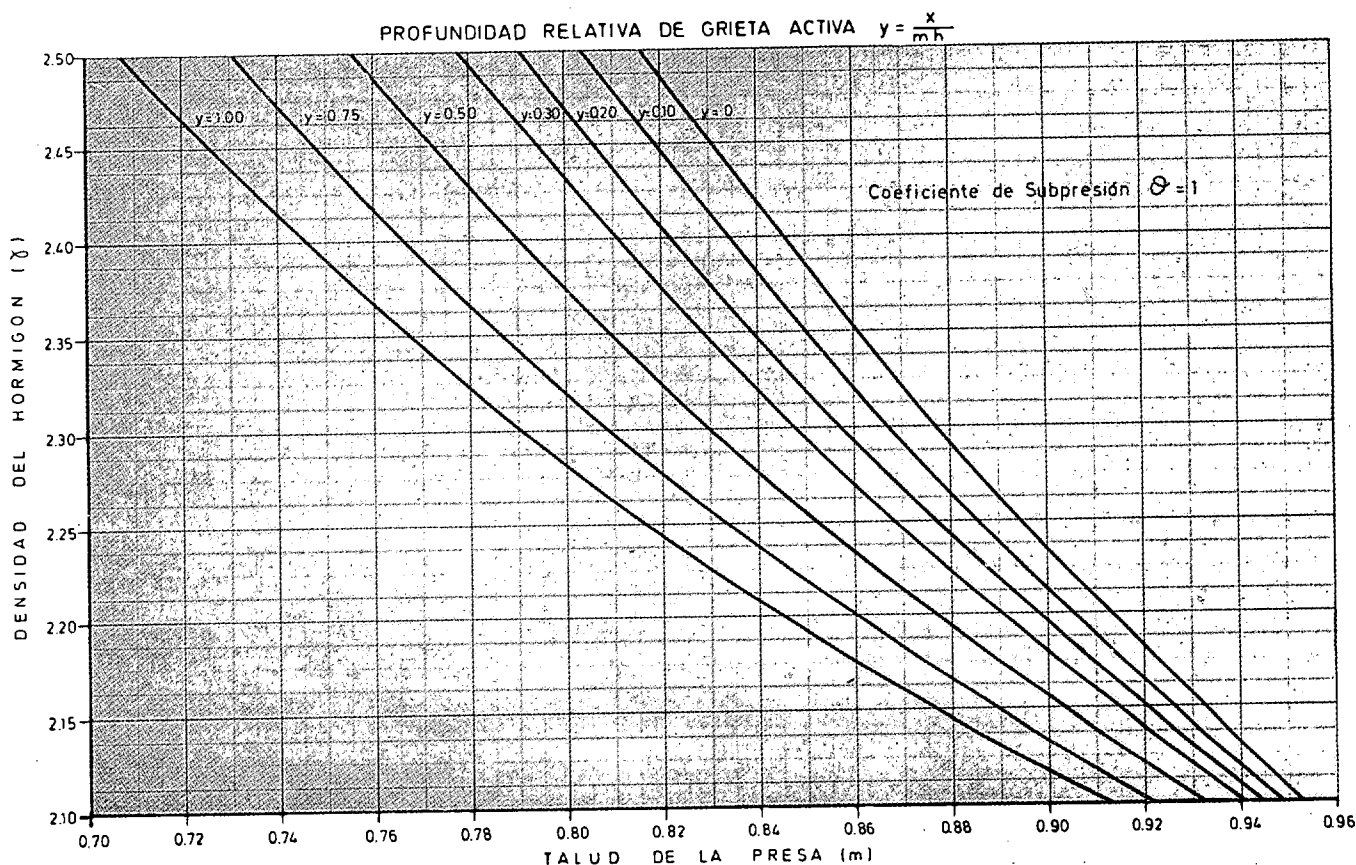


Figura 4.

Así, por ejemplo, en la figura 4 se observa que suponiendo inexistencia de drenaje ($\theta = 1$) y también inexistencia de grieta activa ($y = 0$) para $\gamma = 2,20$ el talud correspondiente es 0,91 y para $\gamma = 2,40$ el talud es 0,845.

En la figura 5, que supone ($\theta = 0,50$), suponiendo profundidad de grieta nula ($y = 0$) a $\gamma = 2,20$ le corresponde un talud de 0,77 y a $\gamma = 2,40$ de 0,72.

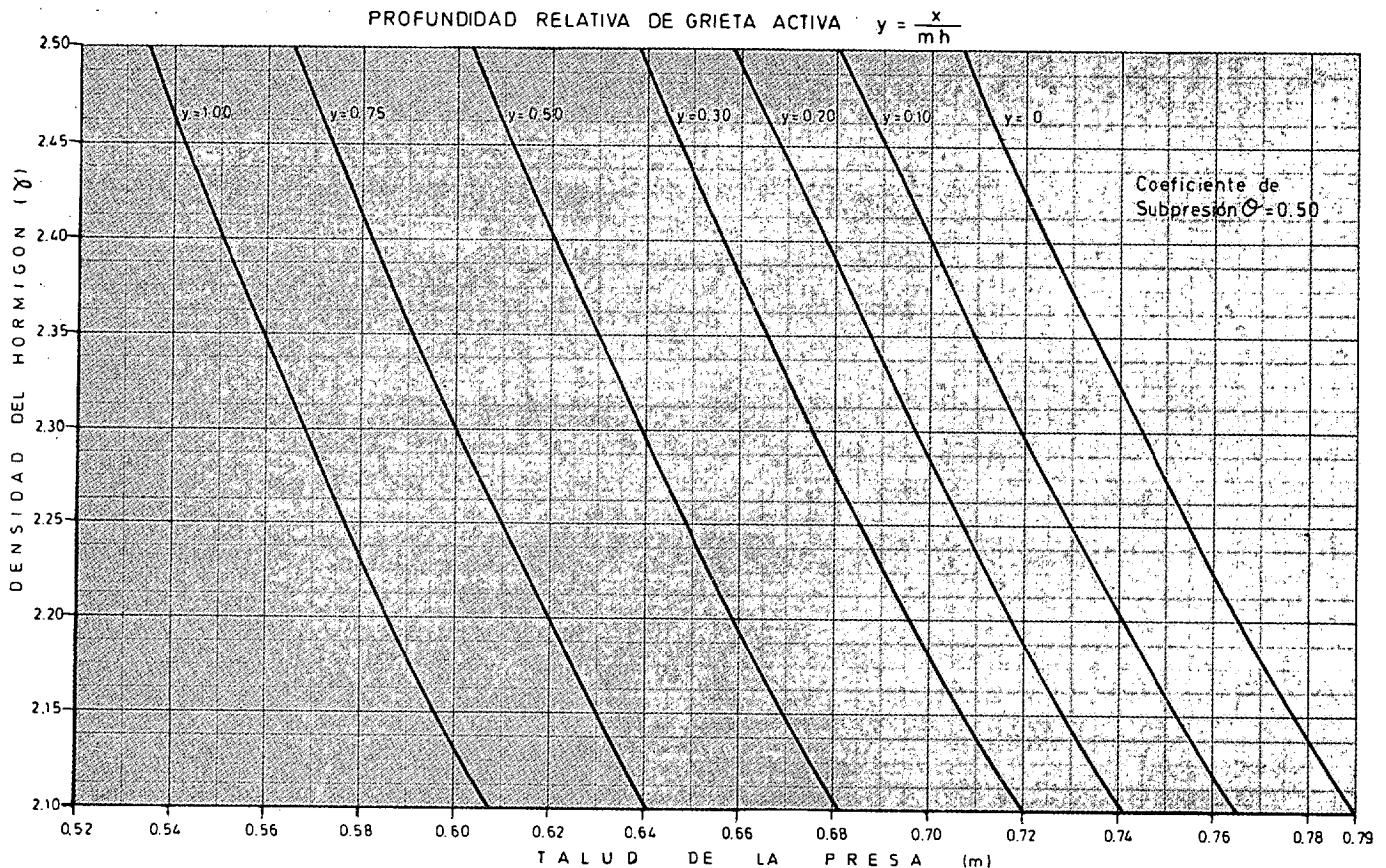


Figura 5.

Por último, si suponemos el talud constante y fijado de antemano (parámetro $m = 0,75$), en la figura 6 podemos ver la influencia mutua entre el valor del coeficiente de subpresión θ y la densidad del hormigón γ .

Así, para una profundidad relativa de grieta nula ($y = 0$), a un valor de $\theta = 0,5$ le corresponde una densidad $\gamma = 2,275$ y a un valor $\theta = 0,70$, le corresponde un valor de $\gamma = 2,475$. Estos números ponen también de relieve el importante papel que juega el drenaje en la seguridad de la presa, ya que si por ejemplo el valor de θ pasa de 0,50 a 0,70, habría que aumentar la densidad del hormigón de 2,275 a 2,475 para mantener las mismas condiciones de seguridad y el aumento de la densidad del hormigón en esta cuantía es sumamente problemático, lo que quiere decir que, en la mayor parte de los casos, es mucho más fácil y por tanto mucho más económico actuar sobre el coeficiente θ de subpresión reduciéndolo,

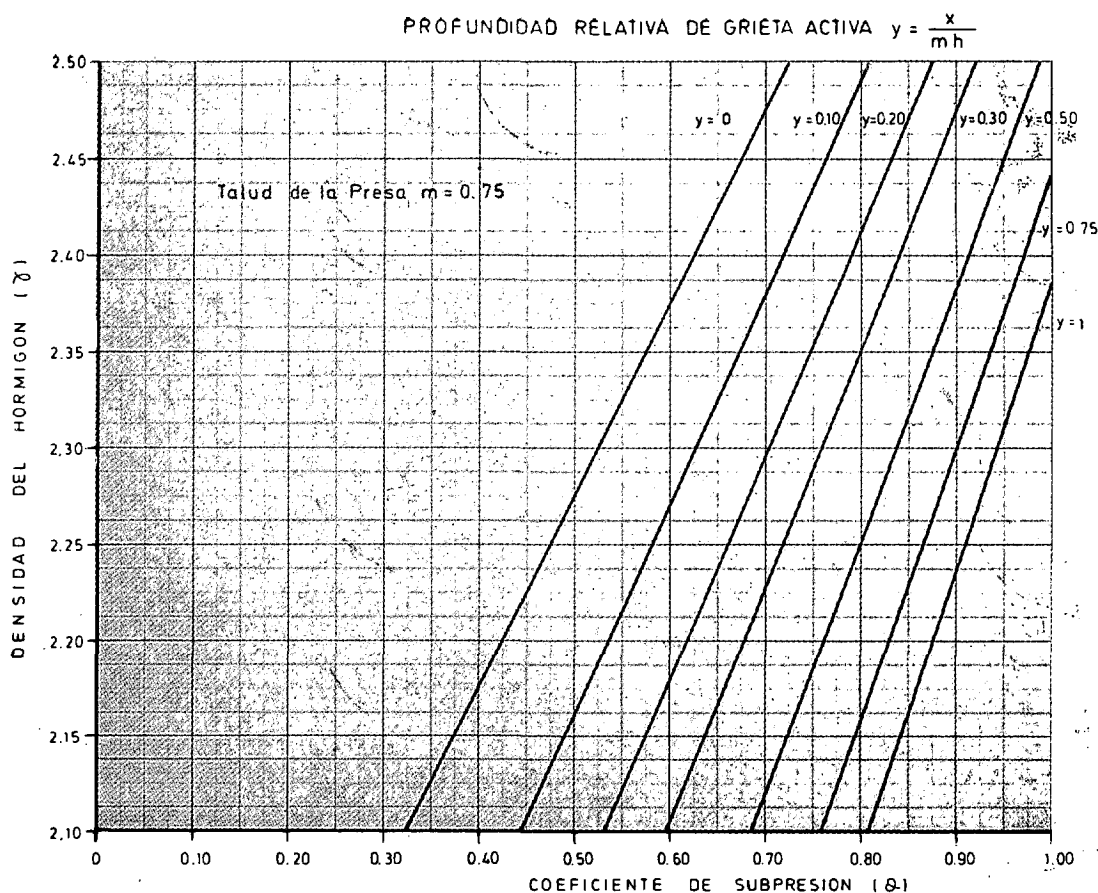


Figura 6.

que sobre la densidad γ del hormigón aumentándola. Lo mismo ocurre, como hemos visto antes, con la relación entre el coeficiente de subpresión y el talud, ya que disminuyendo el coeficiente θ de subpresión de 1 a 0,5 el talud m pasa de 0,875 a 0,750, para las mismas condiciones de seguridad, reducción que es muy importante.

Con todo esto, hemos querido poner de relieve el importantísimo papel que juega el coeficiente de subpresión θ en la economía y seguridad de las presas de gravedad, y la conveniencia de reducir su valor al punto más bajo posible para todo lo cual es imprescindible un control continuo a lo largo de la explotación, de la subpresión realmente existente en cada momento, y actuar sobre la red de drenaje, reparándola o ampliándola cuando las circunstancias lo aconsejen.