

EL AGUA SUBTERRÁNEA: PROSPECCIÓN, CAPTACIÓN Y REPERCUSIONES EN LA OBRA CIVIL

DIRECTORES:

SERGIO IBÁÑEZ GARCÍA
JOSÉ ÁNGEL PORRES BENITO





UNIVERSIDAD DE BURGOS
SERVICIO DE PUBLICACIONES



Grupo  Tragsa

Tragsatec 
TECNOLOGIAS Y SERVICIOS AGRARIOS, S.A.



Instituto Geológico
y Minero de España

CAJA  CIRCULO
DE BURGOS

ISBN 84-95211-45-9



9 788495 211453

COLECCIÓN
CONGRESOS Y CURSOS, 5

ORGANIZA:
UNIVERSIDAD DE BURGOS

COLABORAN:
SONDEOS DEL NORTE, S.A.
TRAGSA
TRAGSATEC
INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA
CAJA DE AHORROS DEL CÍRCULO CATÓLICO

Quedan rigurosamente prohibidas, sin la autorización escrita de los titulares del *Copyright*, bajo las sanciones establecidas en las leyes, la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio o procedimiento, conocido o por conocer, comprendidas la reprografía y el tratamiento informático.

ÍNDICE

© UNIVERSIDAD DE BURGOS

Edita: Servicio de publicaciones
UNIVERSIDAD DE BURGOS
Edf. Biblioteca Central
Servicios Centrales
Plaza del Sobrado, s/n.
09001 BURGOS - ESPAÑA

ISBN: 84-95211-45-9
Depósito Legal: BU.- 343 - 2001
Fotocomposición Rico Adrados, S.L.
Imprime: Amabar, S.L.

| | |
|---|------------|
| Los embalses subterráneos. Conceptos básicos sobre almacenamiento subterráneo y recuperación (ASR) | 201 |
| <i>SANTIAGO GIRARD OCAMPO</i> | |
| Introducción a la problemática e incidencia del agua en la obra civil | 215 |
| <i>SERGIO IBÁÑEZ GARCÍA</i> | |
| Repercusiones del agua en la obra civil | 233 |
| <i>JAIME DÍVAR RODRÍGUEZ</i> | |
| Construcción del gasoducto “Ramal a El Ferrol” | 261 |
| <i>RAUL IBÁÑEZ MARTÍNEZ</i> | |
| El pozo y galerías del Castillo de Burgos | 267 |
| <i>LUIS M^a GARCÍA CASTILLO</i> | |
| Repercusiones de la obra civil en el agua subterránea y el entorno | 283 |
| <i>F. JAVIER LILLO RAMOS</i> | |
| Incidencias del nivel de agua en una obra de rehabilitación. El recalce de la Casa del Cordón | 295 |
| <i>LUIS ORTUÑO ABAD</i> | |
| Zahorías, últimos sabios. “Unidos al agua” | 309 |
| <i>ENRIQUE VÁZQUEZ SÁNCHEZ</i> | |

Dentro del interés que para todos nosotros despierta el terreno como cimiento, como medio de actuación y como fuente de recursos, quisiéramos contribuir con el presente curso a la difusión de uno de los principales factores que en él actúan: EL AGUA SUBTERRÁNEA.

Con este libro pretendemos elaborar un documento que sintetice la esencia del curso, recogiendo en una sola obra el doble enfoque que se ansía: por un lado la problemática de la localización del agua en el subsuelo, y por otro la incidencia de ese agua subterránea sobre las obras.

Parece lógico, que ya que se trata el tema de la localización del agua en el subsuelo, se le relacione con la posible captación del mismo, y no sólo para uso humano, sino como método de drenaje para evitar sus efectos nocivos sobre la obra civil. Basta recordar la localidad de Benamejí en Córdoba donde se solventó, mediante el bombeo de agua subterránea para rebajar el Nivel Freático, el deslizamiento de tierras que ponía en peligro la estabilidad de varias edificaciones del pueblo. Incluso, el aprovechamiento de este agua para regadío de la zona financia continuamente los costes y mantenimiento de la obra. Por lo tanto se ve claro que estos dos temas pueden estar efectiva y realmente relacionados.

Este libro es la compilación de dieciséis conferencias impartidas por profesionales de reconocido prestigio en el ámbito de la ingeniería y el agua subterránea. Se aborda la problemática de la prospección y captación del agua subterránea, y se le da, en primer lugar, un enfoque técnico tratando las más modernas técnicas de prospección geofísica y a continuación se tratan también otros métodos no científicos pero que en la práctica todavía siguen utilizándose, nos referimos a los métodos de radiestesia y la figura del “zahorí” como prospector del agua en el subsuelo.

La problemática que produce el agua sobre la obra civil es abordada también desde una doble faceta, inicialmente exponiendo los conceptos geotécnicos básicos acerca de la presencia del agua en el subsuelo así como proponiendo posibles soluciones y a continuación con la presentación de casos prácticos de obras singulares dentro de Burgos, así se tratan temas tales como la Casa del Cordón, y el Pozo del Castillo de Burgos.

Tratar estos enfoques ingenieriles nos parece, aparte de un tema apasionante y de gran interés, una materia de obligada inclusión en unos cursos de verano de una Universidad cuyo empeño es mejorar eficazmente cada día con una oferta actual y de calidad.

Finalmente, quisiéramos agradecer su colaboración a todos los que han hecho posible la publicación de este libro: autores, empresas de las que proceden dichos autores y que permitieron su presencia, y muy especialmente a las entidades privadas que han financiado la edición del libro.

SERGIO IBÁÑEZ GARCÍA Y JOSÉ ÁNGEL PORRES BENITO
Directores del Curso

CONCLUSIONES

Los embalses subterráneos, cuya tecnología ha experimentado un considerable avance en los últimos años, constituyen una magnífica herramienta para la gestión de los recursos hídricos, que puede ser utilizada en gran variedad de aplicaciones. Esta técnica de recarga artificial de acuíferos es de particular interés en aquellas regiones donde la demanda de agua así como su disponibilidad está sujeta a variaciones estacionales.

Se ha visto que los embalses subterráneos pueden ser un complemento adecuado para embalses superficiales y plantas desaladoras, son bastante eficientes desde un punto de vista ambiental y económico, y a la vez que se utilizan como herramienta de gestión del agua pueden tener efectos adicionales como prevención de la intrusión marina y mejora de la calidad del agua en acuíferos contaminados o salobres.

En España no se ha realizado hasta el momento ningún proyecto de almacenamiento subterráneo y recuperación. Sin embargo, las características del territorio español, con gran cantidad de emplazamientos con una hidrogeología favorable, así como la problemática existente en regiones con grandes variaciones estacionales en la demanda, problemas de intrusión marina y en general dificultades para la gestión de los recursos hídricos, hacen de los embalses subterráneos una herramienta cuya aplicación puede llegar a ser bastante importante en un corto o mediano plazo.

REFERENCIAS

- Pyne, David. Groundwater recharge and wells. A Guide to Aquifer Storage Recovery. Lewis Publishers. 1995
- Dave Smith, Terry Foreman, Kevin Bral, David Pyne. "Aquifer Storage Recovery". World Water and Environmental Engineering, Enero/Febrero 2000
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Tecnología y Recursos de la Tierra. Nuevas Tecnologías para el saneamiento, depuración y reutilización de las aguas residuales en la provincia de Alicante. 1995

INTRODUCCIÓN A LA PROBLEMÁTICA E INCIDENCIA DEL AGUA EN LA OBRA CIVIL

SERGIO IBÁÑEZ GARCÍA

*Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Profesor Titular del Área de Ingeniería del Terreno
Universidad de Burgos*

1. INTRODUCCIÓN

El agua subterránea en su interacción con las construcciones es un tema de gran amplitud, la forma en la que el agua actúa en una obra o construcción puede ser tan variada que sería completamente imposible abarcarlo en esta sola conferencia. Simplemente se va a intentar dar una visión general de cómo es esta influencia, casi siempre (por no decir taxativamente siempre) negativa, para entender no sólo los efectos que se producen, sino también intentar acercarnos a la comprensión del porqué y el cómo de estos fenómenos.

Aparte de las interacciones del agua como tal, actuando por sí sola, en esta ponencia se va a incidir principalmente en un aspecto de vital importancia, y es que, debido a que los suelos forman un sistema trifase: fase sólida (partículas), fase líquida (agua), y fase gaseosa (aire), queda claro que el agua no es que sea un añadido al suelo, sino que forma parte integrante del mismo. Por ello el comportamiento de un terreno, y por lo tanto de la construcción que se apoya en él, (incluso a veces la obra o construcción es el propio terreno en sí: taludes, túneles...) depende en gran medida de este agua que forma parte del suelo.

Sin más dilación se van a empezar a desgranar estos fenómenos y proceder a su explicación. No son todos los que se pueden dar, "aunque sí son todos los que están", pero creo son los más representativos para la comprensión de esta acción del agua en el terreno. Tampoco se van a dar soluciones a estos problemas, que ya serán expuestos en siguientes ponencias, simplemente se intentará transmitir y explicar estos fenómenos para así entender muchos de los comportamientos de los suelos y por lo tanto de las obras.

2. CONCEPTO DE PRESIÓN EFECTIVA

La tensión efectiva es aquella que gobierna el comportamiento de un suelo. Es decir, de todas las presiones, es "la importante", aquella cuya variación y sólo cuya variación provoca cambios en el suelo, tanto en su resistencia como en su deformabilidad.

Primero vamos a ver que el terreno es un sistema trifase, como ya se ha comentado en la introducción. En suelos saturados, evidentemente sólo tenemos dos fases: las partículas sólidas y el agua. Si consideramos las fuerzas que actúan en un corte a través de la superficie de contacto entre dos partículas, tenemos lo siguiente si es que consideramos que el contacto entre partículas es puntual (hipótesis razonable):

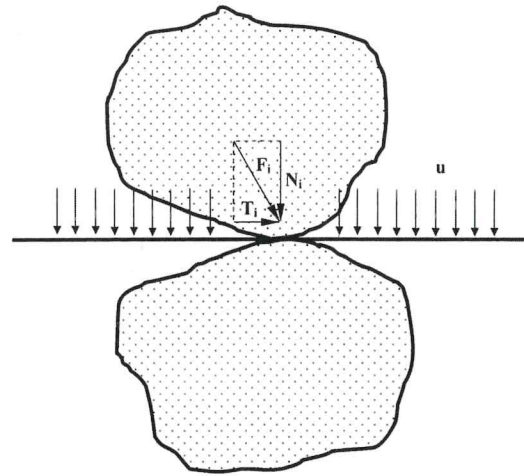


Figura 1. Tensiones en el interior de un suelo saturado.

Como tensión normal (σ) y tangencial (τ), dividiendo fuerzas por el área (A), siendo u la presión del agua, y N_i y T_i la fuerza transmitida entre partículas, queda:

$$\sigma = N_i/A + u$$

$$\tau = T_i/A$$

Sustituyendo por las presiones entre los granos (intergranulares: σ_i y τ_i):

$$\sigma = \sigma_i + u$$

$$\tau = \tau_i$$

Terzaghi llegó a la conclusión que las tensiones efectivas (σ' y τ') eran las intergranulares, con lo que quedaría:

$$\sigma' = \sigma_i = \sigma - u$$

$$\tau' = \tau_i = \tau$$

Esto si se piensa con un poco de rigor, parece que no puede crear lugar a dudas, ya que dentro de las presiones totales van incluidas las del agua, pero esta presión del agua actúa siempre alrededor y de forma perpendicular a la partícula en todos y cada uno de sus puntos, con lo que la fuerza neta, debida a esta presión del agua que actúa sobre la partícula es nula, por lo que no producirá sobre ella ningún efecto. Por lo tanto a las presiones totales habrá que quitarlas esta presión intersticial.

Vamos a ver un par de ejemplos que van a aclarar esto último:

1. Las arenas del fondo marino (figura 2) están sometidas a una muy alta presión total: la presión correspondiente al peso de todo el agua que tienen encima, y sin embargo parece como si no estuvieran sometidas a ninguna pre-

sión, ya que están sueltas. Creo que cualquiera puede recordar algún documental en el que se ven peces de fondo marino que incluso se camuflan bajo esa arena, o incluso algún buceador que roza con su equipo el fondo marino y mueve con suma facilidad esas arenas. La explicación es clara: la presión del agua en este caso coincide con la total, con lo que la presión efectiva es nula.

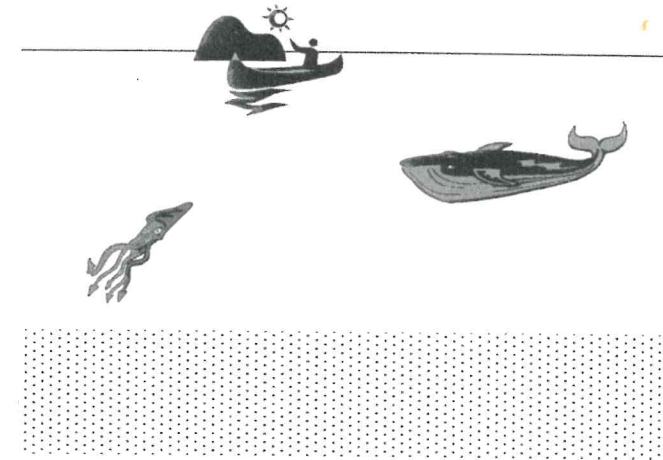


Figura 2. Presiones efectivas en el fondo del mar.

2. En la superficie de la playa (figura 3), justo cuando acaba de pasar una ola y se retira el agua, la arena es como si estuviera sometida a una presión, ya que sus granos están unidos entre sí, sin embargo la presión total que actúa sobre

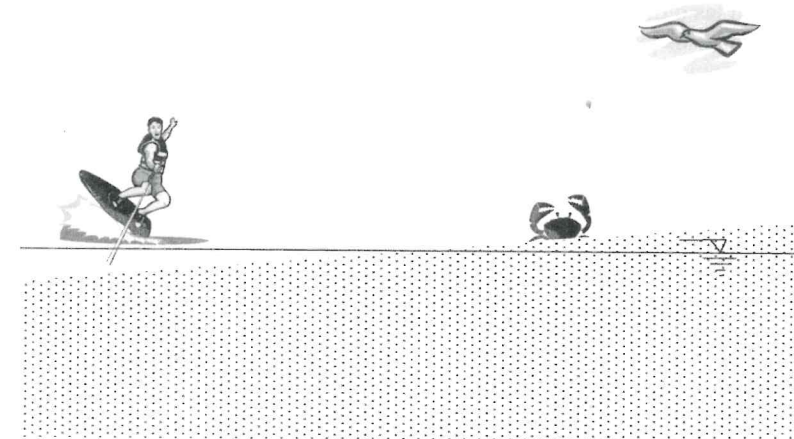


Figura 3. Tensiones efectivas positivas en la superficie de la playa.

la misma es nula, ya que no hay nada por encima que ejerza presión alguna. Ésto se explica también a través del concepto de presión efectiva, ya que, aunque la presión total es nula, existe una presión de agua negativa, ya que la arena de la superficie estaría, en este caso, por encima del nivel freático y en estos casos el agua se mantiene por succión capilar por lo que su presión es negativa. Por lo tanto, las presiones efectivas resultan positivas.

3. SIFONAMIENTO

Al abrigo de este concepto de presión efectiva que acabamos de ver se pueden entender muchos fenómenos. Parece claro, que las presiones totales hacen que las partículas se junten, mientras que las presiones del agua tienden a separarlas.

Puede darse una circunstancia en la que la presión del agua sea tan grande como la presión total, pero no sólo en un determinado punto: por ejemplo el fondo del mar como vimos en el apartado anterior, sino en una zona, por ejemplo un estrato de una determinada potencia. En este caso, la presión efectiva sería nula en ese estrato, con lo que las partículas estarían separadas unas de otras, ya que las fuerzas que intentan juntar las partículas (la presión total) y las fuerzas que las separan (la presión intersticial) serían iguales. Tendríamos por lo tanto una especie de "sopa de partículas".

Es fácil comprender que un terreno así no tendrá capacidad portante alguna. A esta situación de sifonamiento generalizado no se suele llegar con facilidad, pero sí que se puede llegar a situaciones más o menos cercanas a este punto, en el que las presiones efectivas en el suelo sean bajas, y por lo tanto también será baja su capacidad portante. Y es que bajas presiones efectivas, que no dejan de ser las intergranulares, implican que las fuerzas de rozamiento entre partículas sean pequeñas, con lo que la resistencia al corte de ese suelo sería muy pequeña.

Acabamos de ver que el sifonamiento consiste en la anulación de presiones efectivas. Para que se de éste deberán ser muy altas las presiones intersticiales. Lo normal es que las presiones del agua crezcan linealmente con la profundidad desde el nivel freático, y con una pendiente γ_w (densidad del agua), es decir, que las presiones del agua son las hidrostáticas: presión correspondiente al peso del agua desde el nivel freático. Con estas presiones de agua no se consigue llegar al sifonamiento, pero hay una circunstancia que hace que el valor de las presiones del agua sean mayores: la filtración de agua ascendente.

Si consideramos i el gradiente hidráulico, y ϕ el potencial hidráulico sin considerar el tercer sumando ($v^2/2g$), despreciándolo por suponer baja la velocidad de filtración, queda lo siguiente:

$$-|i| = \frac{d\Phi}{dz} = \frac{d\left(z + \frac{u}{\gamma_w}\right)}{dz} = 1 + \frac{du}{dz} \cdot \frac{1}{\gamma_w} \Rightarrow -\frac{du}{dz} = (1 + |i|) \cdot \gamma_w$$

El gradiente hidráulico tiene realmente signo menos porque en filtraciones ascendentes el potencial hidráulico disminuye con la altura (z), y por eso se ha puesto así (en valor absoluto).

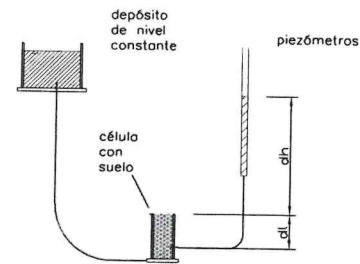
Como $\frac{du}{dz} = -\frac{du}{dh}$ (siendo h la profundidad), queda:

$$\frac{du}{dh} = (1 + |i|) \gamma_w$$

Es decir, que ahora la presión del agua crece con la profundidad con una pendiente mayor que antes: $(1 + |i|) \gamma_w$

Es ahora cuando se puede producir sifonamiento: cuando tenemos una filtración de agua en sentido ascendente, debida a un alto gradiente hidráulico.

Vamos a continuación a explicar un ensayo de sifonamiento (figura 4), que se realizará en el aula mediante un aparato llamado permeámetro. El ensayo se va a realizar con una arena fina de playa y vamos a conseguir simular en el aula el fenómeno vulgarmente llamado de las "arenas movedizas". Comprobaremos in situ como al llegar a esta condición de sifonamiento se anula la capacidad portante de ese suelo.



Ensayo de sifonamiento en la célula de carga constante

Figura 4. Ensayo de sifonamiento
Foto cedida por José Antonio Barco Herrera.

Se puede ver claramente, como se establece un flujo ascendente vertical por la muestra de arena desde su base, debido a la diferencia de potencial hidráulico entre la zona de arriba y la de debajo de la muestra de arena (evidentemente mayor en la zona de abajo). Despreciando el tercer sumando de la ley de Bernouilli ($v^2/2g$) queda que el gradiente hidráulico creado en la probeta es:

$$i = \frac{\Delta\Phi}{\Delta l} = \frac{dh}{dl}$$

Y este gradiente hidráulico debe coincidir con el $i_{cr} = \frac{\gamma_{sum}}{\gamma_w}$ que se obtiene teóricamente, y es aquel que produce el sifonamiento.

En la ingeniería civil se suele dar este fenómeno en excavaciones por debajo del nivel freático, ya que en estos casos, se genera un flujo de agua ascendente hacia el interior de la excavación, como se puede ver en la figura 5.

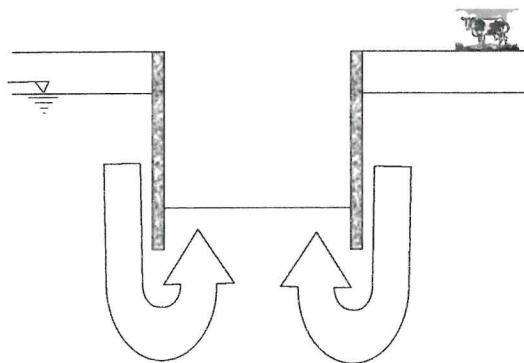


Figura 5. Excavación por debajo del nivel freático.

4. LICUEFACCIÓN

Es un fenómeno que guarda una estrecha relación con el sifonamiento en cuanto a los resultados que produce. Y es que al igual que antes, la licuefacción es una anulación de presiones efectivas. La diferencia estriba en que esta pérdida de presión efectiva se debe a un aumento de la presión del agua, pero esta vez debida a esfuerzos dinámicos que producen cargas pulsatorias, como por ejemplo en un terremoto.

Se produce sólo en arenas finas o limos arenosos saturados en los que, durante la aplicación de estas cargas, no da tiempo al drenaje.

Existe más probabilidad de producirse este fenómeno cuanto:

- Menor es el índice de densidad.
- Menor es la presión efectiva normal inicial.
- Mayor es la deformación pulsatoria.
- Mayor es el número de ciclos.
- Cuanto más llano es el terreno, ya que es menor la relación entre la tensión de corte inicial y la tensión efectiva normal.

En el terremoto de Niigata en Japón la mayor parte de los daños fueron debidos a este fenómeno.

5. COLAPSO

El colapso es el fenómeno que consiste en que cuando sobre un suelo parcialmente saturado se colocan unas cargas, y se espera a que se produzcan todos los asentamientos debidos a esa carga, si después se satura ese suelo se pueden producir asentamientos adicionales.

Unido a que esta saturación, al elevarse el nivel freático, provoca un descenso de las presiones efectivas, ya que se anulan succiones capilares que unen las partículas, las posibles razones de estos asentamientos pueden ser las siguientes:

1. Acción lubricante del agua. Se da en suelos cohesivos...
2. Las partículas pierden resistencia al mojarse, se rompen sus bordes y aristas y se producen por tanto, movimientos de las partículas hasta posiciones más compactas. Se produce en suelos granulares.
3. Pérdida de cementación, si es que el cemento que une las partículas es soluble en agua.

6. FILTRACIONES

Las filtraciones afectan de diversas formas a las obras. Una de ellas, que ya se ha visto en parte, es que las filtraciones alteran las presiones del agua respecto de las hidrostáticas, con lo que quedan también modificadas las tensiones efectivas.

Otro fenómeno es que el agua en movimiento arrastra partículas en su movimiento produciendo erosiones internas. La más habitual de las erosiones internas se denomina tubificación. Es un tipo de erosión que se produce principalmente en presas de materiales sueltos si se produce un afloramiento de agua en el paramento de aguas abajo. Se forma un tubo de forma progresiva hacia aguas arriba desde la superficie del paramento de aguas abajo, que son aquellas que están "más libres" ya que no tienen aguas abajo otros granos que las confinen. Posteriormente según van quedando sueltas otras partículas del interior también van saliendo arrastradas por el agua, y así sucesivamente hasta la formación de un "tubo" que puede llegar a conectar los dos paramentos de la presa, y llevarla por lo tanto a la ruina. Estos procesos se ven favorecidos cuando hay altos gradientes hidráulicos.

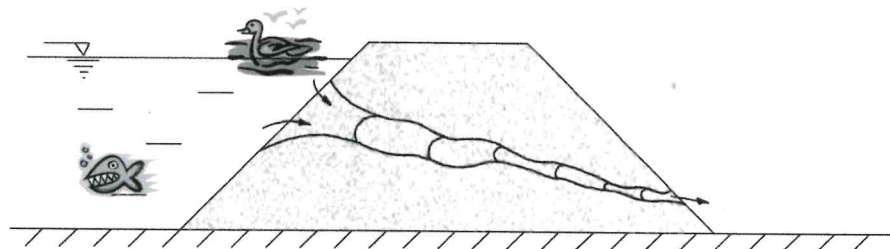


Figura 6. Tubificación de una presa de materiales sueltos.

Otro posible fenómeno originado por las filtraciones es que se favorece la alteración que produce el agua sobre ciertos tipos de suelos y rocas. Un ejemplo que tuvo mucha repercusión en Burgos capital, fue el que se originó debido a la construcción

del actual edificio de oficinas que antiguamente se correspondía con el Cine Avenida en la calle de Vitoria. Durante esta construcción se produjeron asentamientos cercanos que produjeron unas preocupantes grietas en los mismos. Se hizo un estudio específico del tema y se llegó a la conclusión de que estos asentamientos fueron debidos a la construcción de dicho edificio. Éste se diseñó con varias plantas de sótano, y como el nivel freático está más alto que la base de la excavación, se produjo un flujo de agua hacia la misma. Estas filtraciones produjeron, entre otras cosas (arrastre de partículas...), una disolución de parte del yeso que contienen esos terrenos adyacentes sobre los que se cimentan esos edificios que se agrietaron, y esos huecos que dejó el yeso fueron en parte los causantes de dichos asentamientos.

7. PÉRDIDA DE VALOR DE LOS PARÁMETROS RESISTENTES DEL TERRENO

El agua debido, entre otras cosas, a que lubrica y separa partículas, hace que se reduzcan los valores de la cohesión y el ángulo de rozamiento interno.

Un ejemplo práctico y real en el que tuvo que ver esta cuestión, entre otras muchas más, fue un suceso de infausto recuerdo dentro del campo de la ingeniería civil que ocurrió varios años atrás. Me estoy refiriendo a la presa de Vajont en Italia (en los Alpes, a unos 100 km al norte de Venecia).

En la figura 7 se puede ver la presa una vez construida.

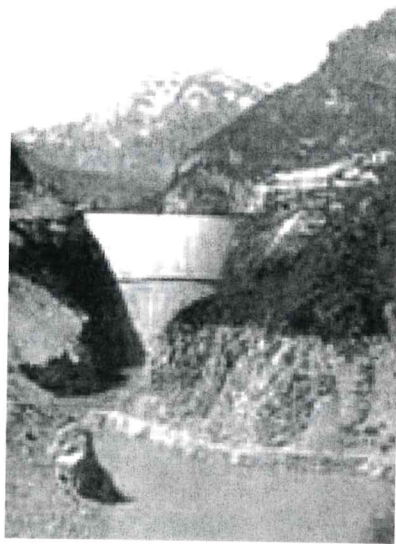
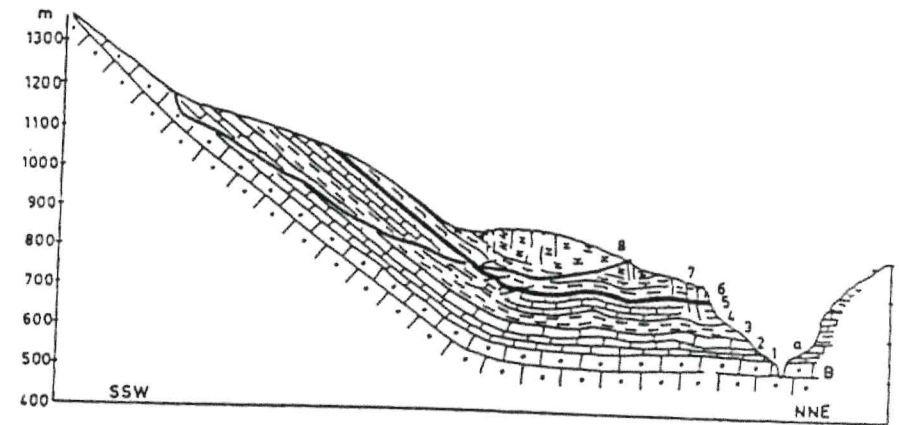


Figura 7. Presa de Vajont
Extraída de la página web: <http://www.itis-setificio.co.it/allievi/vajont>

Esta presa se terminó de construir en 1960, y en ese año entró en servicio. Se vinieron produciendo pequeños deslizamientos de ladera con posterioridad, pero fue en octubre del 63 cuando sobrevino la desgracia. Se produjo un rápido (hasta 30 m/s)

y gran deslizamiento (unos 270 millones de m³) de una de las laderas del embalse, sobre el vaso de la presa. Esto produjo una gigantesca ola (más de 200 m) contra la otra ladera, que arrasó un pueblo llamado Casso (a 260 m de altura respecto al nivel del embalse). Una gran parte de esta ola pasó por encima de la presa (40 millones de m³ de agua) y con una lámina del orden de 100-200 m arrasó en unos 10 minutos otros cinco pueblos del valle. Total: unos 2500 decesos. Paradójicamente, ni la presa, ni sus estribos sufrieron daños aparentes.

El corte geológico de la margen izquierda (donde se produjo el deslizamiento) de la cerrada de Vajont, visto desde aguas arriba es el de la figura siguiente (figura 8).



- a. Garganta del río
- B. Formación Dogger-Malm
- 1 y 2. Calizas del Malm superior y Cretácico inferior
- 3 a 8 Margas y calizas margosas del Cretácico inferior a superior

Figura 8. Corte geológico de la margen izquierda de la cerrada de Vajont
Foto extraída de "Accidentes ocurridos en Grandes Presas". G.A. Leonards (editor)
Comité Internacional de Grandes Presas. Comité nacional Español. 1975.

Las causas del deslizamiento han sido ampliamente estudiadas, y parece que los más recientes estudios confirman que el deslizamiento está localizado en delgados estratos de arcilla (5-15 cm) que se encuentran intercalados en las calizas. Parece que durante el llenado del embalse, en un momento dado, el agua penetró en estos niveles arcillosos, incrementándose por tanto las presiones intersticiales, reduciéndose las presiones efectivas, disminuyendo de ese modo la resistencia al corte de ese suelo, que fue por donde se produjo el deslizamiento.

A continuación se puede observar un corte geológico antes del deslizamiento y otro después del mismo (figura 9).

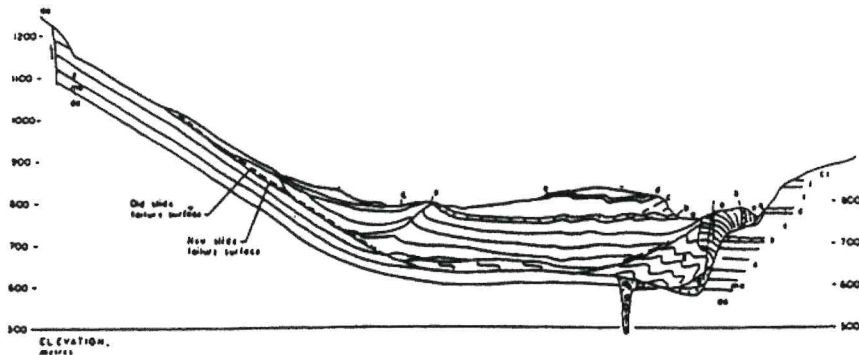
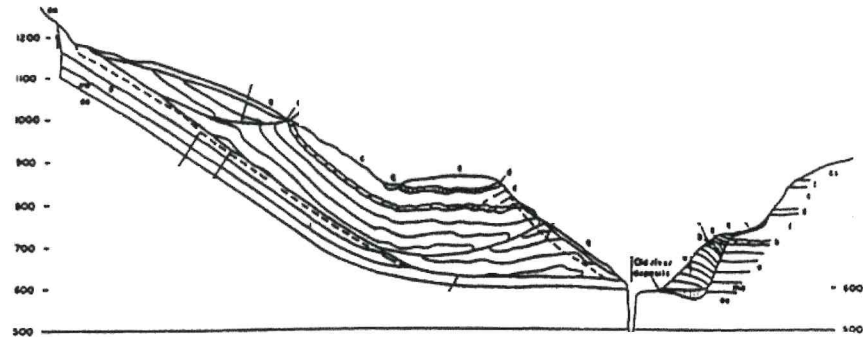


Figura 9. Corte geológico antes y después del deslizamiento.
Foto de D. Rossi & E. Semeza (1980).

8. AUMENTO DE LA PLASTICIDAD DE UN SUELO

Relacionado con lo anterior, es decir con la pérdida de la resistencia al corte cuando aumenta la humedad en un suelo, está este proceso de aumento de la plasticidad de un suelo, sobre todo en los cohesivos que pueden tener un muy alto índice de plasticidad.

Una mayor plasticidad en un suelo implica unas mayores deformaciones para el mismo estado tensional.

9. FLUCTUACIONES DEL NIVEL FREÁTICO

Al hilo de lo que se ha explicado de las presiones efectivas, si aumenta de altura el nivel freático dentro del interior de un terreno, las presiones efectivas se ven re-

ducidas, con lo que baja la capacidad portante del terreno, y por lo tanto cualquier estructura que estuviese apoyada en ese terreno experimentaría asientos adicionales.

Es fácil comprender esta pérdida de capacidad portante de un terreno si sube el nivel freático, a la luz de la fórmula de general de Brinch Hansen (escrita a continuación) para el cálculo de la presión de hundimiento (p_h) de una cimentación (presión que produciría la rotura generalizada del terreno debajo de la cimentación). Si el nivel freático sube por encima del nivel de la cimentación:

- El primer sumando de la expresión se hará más pequeño al disminuir la presión efectiva a la profundidad de la base de la cimentación (q).
- El segundo sumando también se verá reducido al disminuir la cohesión (c).
- Y finalmente también disminuirá el tercer sumando ya que se reduce la densidad hasta el valor γ_{sum} .

La fórmula de Brinch Hansen es la siguiente:

$$p_h = q N_q s_q d_q i_q \xi_q + c N_c s_c d_c i_c \xi_c + 1/2 \gamma B N_\gamma s_\gamma d_\gamma i_\gamma \xi_\gamma$$

Si el nivel freático desciende a mayor profundidad, no tiene porqué implicar cosas sólo positivas, ya que al descender el nivel freático aumentan las presiones efectivas, y ese aumento de presión, por sí mismo, puede implicar un asiento global en todo el terreno.

Incluso ese desecamiento, aunque produce un aumento de los parámetros resistentes del suelo, puede producir retracciones y grietas que podrían generar desprendimientos.

10. AUMENTO DE LA DENSIDAD DE UN SUELO

Al saturarse un suelo, aumenta su densidad hasta llegar a la densidad saturada, y por lo tanto aumenta el peso del suelo.

Entre otras consecuencias posibles, si ese suelo tiene forma ataluzada, al aumentar el peso del mismo, aumenta la probabilidad de deslizamiento.

11. PRESIONES SOBRE ELEMENTOS ESTRUCTURALES

Otra cuestión derivada de la existencia del agua en el terreno, es que si ese agua está en contacto sobre un elemento estructural, este agua ejercerá la presión que tenga sobre toda superficie con la que esté en contacto, de forma perpendicular a ella y en cada punto con la presión que tenga el agua en dicha posición.

Esto tiene una gran repercusión en muros de contención, ya que si no se diseñan con un material drenante en su trasdós, o con cualquier otro sistema que evacue el agua hacia el exterior, además del empuje de las tierras, habría que considerar también el empuje del agua, con el sobredimensionamiento, y por lo tanto aumento de presupuesto, que ello conllevaría.

También se darán estas presiones del agua en elementos estructurales con paramentos horizontales, como por ejemplo zapatas, losas de cimentación, soleras, etc.

si se encuentran apoyadas a una profundidad por debajo del nivel freático. En este caso particular estas presiones, como se manifiestan en la parte inferior de estos elementos estructurales, reciben el nombre de subpresiones, que si son mayores que el peso que transmiten estas estructuras, las termina levantando.

Se puede citar como ejemplo en el que las subpresiones tuvieron un resultado dramático, el de la presa de Malpasset, en Francia a unos 80 km de Niza. Esta obra, de trágico recuerdo también, tuvo una rotura que produjo un vaciado del embalse que generó una gigantesca ola que acabó con la vida de 421 personas en el valle aguas abajo.

En este caso, la presa estaba construida sobre un terreno como el de la figura 10.

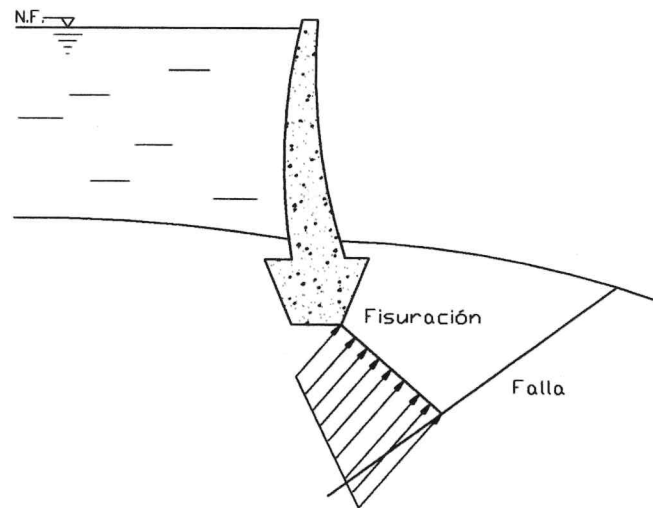


Figura 10. Esquema de la presa de Malpasset.

La presa estaba apoyada sobre unos gneis muy fisurados, con unas fisuras como la que está pintada, que va desde el cuerpo de la presa a la falla. Estas fisuras, que muchas de ellas eran debidas a la esquistosidad de esa roca, permitían el paso del agua a través de ellas, pero no perpendicularmente a sus paredes, con lo que el agua penetró por ellas, y quedó allí ocluida ya que no tenía posible salida, ya que la falla estaba rellena de material arcilloso (y por lo tanto muy impermeable) que impedía su drenaje. Este agua presionaba sobre las paredes de esas discontinuidades de forma perpendicular, de tal modo que se creó una especie de presión hacia arriba (subpresión) que es lo que se ha intentado expresar mediante esa ley de empujes que hay dibujada.

Como existía esa falla, que en el fondo es una superficie de debilidad, se terminó rompiendo el terreno por ahí, de tal modo que saltó esa especie de "tapón" que formaban el cuerpo de la presa, una fisura, y la falla, colapsando la presa, y formando esa enorme y fatídica ola ya comentada.

12. ALTERACIONES QUE PRODUCE EL AGUA EN SUELOS-ROCAS

Tratando en primer lugar alteraciones químicas, el agua puede producir disoluciones, tanto de rocas evaporíticas (cloruros, yesos, y otras sales...), como de ciertos materiales cementantes que unan partículas de un suelo.

Por otra parte, tenemos otras alteraciones químicas como la hidrólisis (caolinitización de los feldespatos...), oxidaciones, etc.

Podríamos considerar también alteración de tipo químico aquella que se produce sobre la anhidrita (sulfato cálcico anhidro) que, al absorber agua, experimenta una expansión: se convierte en sulfato cálcico hidratado.

Ya que estamos tratando el tema de la expansividad, no se puede dejar pasar por alto la que se produce en varios tipos de arcillas (las más típicas: las montmorillonitas) cuando absorben humedad. Igualmente peligrosas son las retracciones que se producen en estos materiales cuando baja la humedad (figura 11).

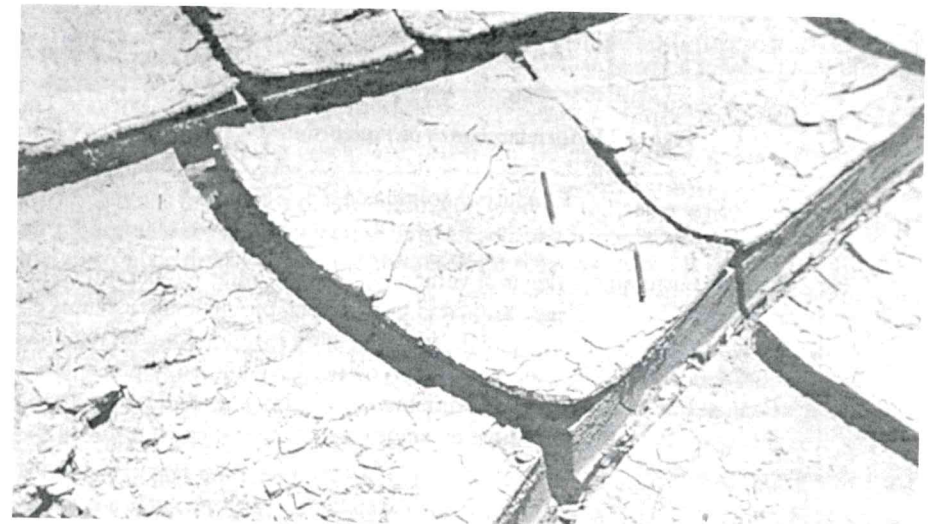


Figura 11. Grietas de retracción por secado en una arcilla.

Foto extraída del libro "Geología aplicada a la Ingeniería Civil". J.M. López Marinas.

Un ejemplo que puede ilustrar estos fenómenos negativos que se derivan de la expansividad de arcillas son las deformaciones que se producen en algunas edificaciones cimentadas sobre estas arcillas expansivas. En estos edificios, durante el paso de invierno a verano, se pueden producir agrietamientos de "quebranto", como en la figura 12.

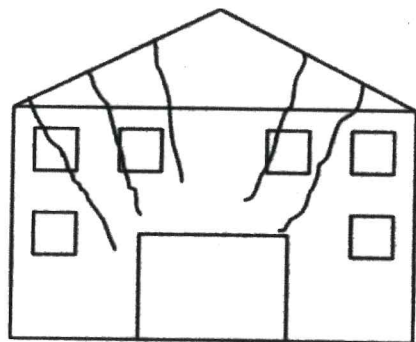


Figura 12. Agrietamientos de “quebranto”.

En este caso ocurre que al llegar el verano, y con él las altas temperaturas, las zonas perimetrales del terreno pierden humedad y se retraen, produciendo asientos en el edificio, sin embargo las zonas debajo del centro del edificio conservan durante más tiempo la humedad, con lo que tardan más tiempo en perder volumen, y por lo tanto en producir asientos. Por lo tanto en esas primeras fases el asiento en el perímetro es mayor que en el centro del edificio, y estos asientos diferenciales pueden producir estas grietas tan peligrosas.

13. INFLUENCIA DE LAS HELADAS

No se va a insistir en el fenómeno de la gelifracción, es decir rotura de rocas por aumento del volumen del agua al congelarse dentro de sus grietas, ya que se produce principalmente en ambiente periglacial.

Otra circunstancia aparte es la que ocurre en suelos, de tipo limo principalmente: el agua de su interior aumenta de volumen al helarse, e incluso se produce migración de agua, por verse atraída desde zonas no heladas hacia esas zonas heladas. Todo ésto produce fuertes expansiones.

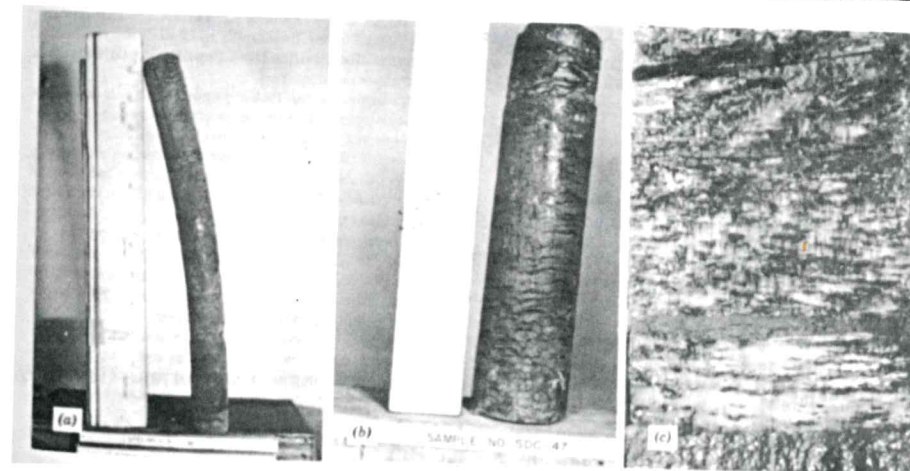


Figura 13. Hinchamiento por helada. Muestras sometidas a heladas que aumentaron de tamaño más del doble.

Foto extraída del libro “Mecánica de suelos”. T. William Lambe y Robert V. Whitman (C. W. Kaplar del U. S. Army CRREL).

No nos olvidemos del deshielo, que produce reblandecimiento del terreno, ya que el deshielo se suele producir de arriba hacia abajo, con lo que el agua de fusión del hielo no puede drenar hacia el terreno inferior helado.

14. OTRAS INCIDENCIAS DEL AGUA EN LAS OBRAS

Aparte de todo lo que hemos venido viendo a lo largo de esta ponencia, hay ciertos fenómenos asociados al agua en el terreno que producen dificultades durante las obras, y que no hace falta recurrir a explicaciones ingenieriles para su análisis. Dentro de este contexto es fácil de imaginar, como obras en terrenos con mucho agua, implican dificultades en la operabilidad de la maquinaria, peligros con equipos eléctricos, dificultades con explosivos...

15. CONCLUSIONES

Puede parecer, por lo explicado en esta ponencia, que la intención del arriba firmante es producir en el lector/asistente un sentimiento de pesimismo, e incluso de frustración al haber asistido a una exposición de tanta problemática que puede crear el agua a un profesional de la ingeniería. Nada más lejos de mi intención está el transmitir estas sensaciones, pero sí está el intentar inculcar ese deber de estar “en guardia” ante estos fenómenos relacionados con el agua.

Sin entrar en posibles soluciones a esta problemática que se ha expuesto, que serán objeto de estudio por posteriores ponentes, sí me gustaría decir a modo de con-

clusión final que muchos de los problemas asociados al agua se verían minimizados si se proyectase y ejecutase un buen sistema de drenaje adecuado a cada caso concreto.

BIBLIOGRAFÍA

- **GEOTECNIA Y CIMIENTOS I**
Autores: José A. Jiménez Salas y José L. de Justo Alpañés
Editorial Rueda (Madrid)
- **GEOTECNIA Y CIMIENTOS II**
Autores: José A. Jiménez Salas, J. L. de Justo Alpañés y A. A. Serrano González
Editorial Rueda (Madrid)
- **MECÁNICA DE SUELOS**
Autores: T. William Lambe y Robert V. Whitman
Editorial Limusa-Wiley, S. A. (Méjico D.F., Méjico)
- **MECÁNICA DE SUELOS EN LA INGENIERÍA PRÁCTICA**
Autores: Karl Terzaghi y Ralph B. Peck
Editorial El Ateneo (Barcelona)
- **PRESAS Y EMBALSES. INGENIERÍA GEOLÓGICA Y ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES**
Autores: Alberto Foyo, Carmen Tomillo y Miguel Ángel Sánchez
Editorial: Servicio de Publicaciones E.T.S de Ingenieros de Caminos, C. y P. de Santander
- **GEOLOGÍA**
Autores: José Águeda, Francisco Anguita, Vicente Araña, José López y Luis Sánchez
Editorial Rueda (Madrid)
- **GEOLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL**
Autor: J.M. López Marinas
Editorial: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Obras Públicas de Madrid

REPERCUSIONES DEL AGUA EN LA OBRA CIVIL

JAIME DÍVAR RODRÍGUEZ

*Licenciado en Ciencias Geológicas
Ministerio de Fomento.*
