

INGENIERÍA GEOLÓGICO AMBIENTAL

Control de las aguas subterráneas en la construcción

Eduardo Cassiraga¹ Alejandro Ferrer²

¹Grupo de Investigación de Hidrogeología
Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Universidad Politécnica de Valencia

²Perforaciones e Instalaciones
FERRER, S.L.

Ingeniería Geológica, 2008

Objetivos de la clase

- Presentar los **principios técnicos** del control del nivel piezométrico e introducir los **métodos comúnmente utilizados** para el control de las aguas subterráneas en las obras civiles.

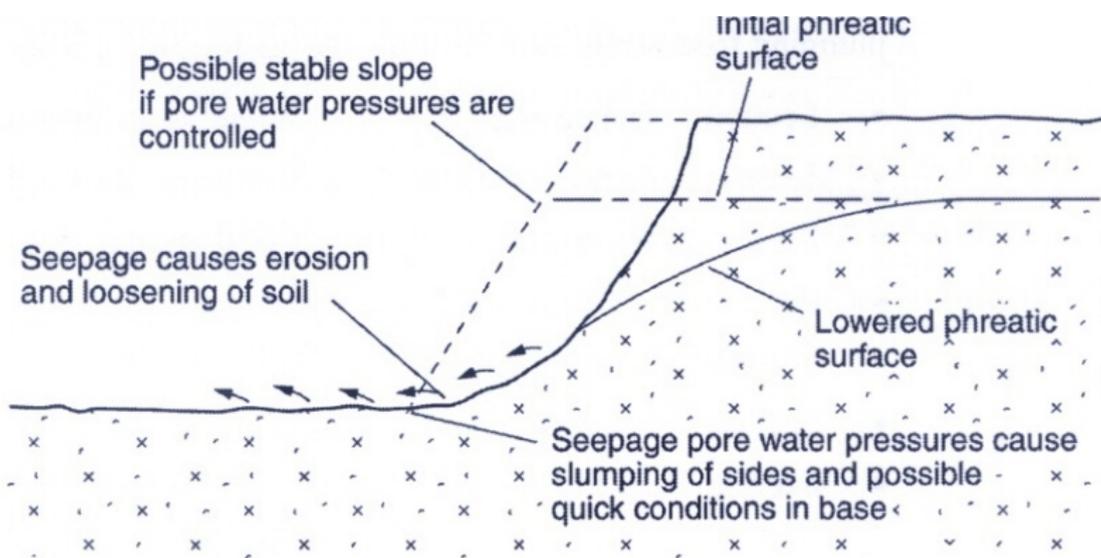
Contenidos

- 1 Introducción
- 2 Conceptos previos
- 3 Soluciones generales para el control del nivel freático
- 4 Sistemas para el control del nivel freático
- 5 Sistemas para el control de la presión intersticial
- 6 Resumen

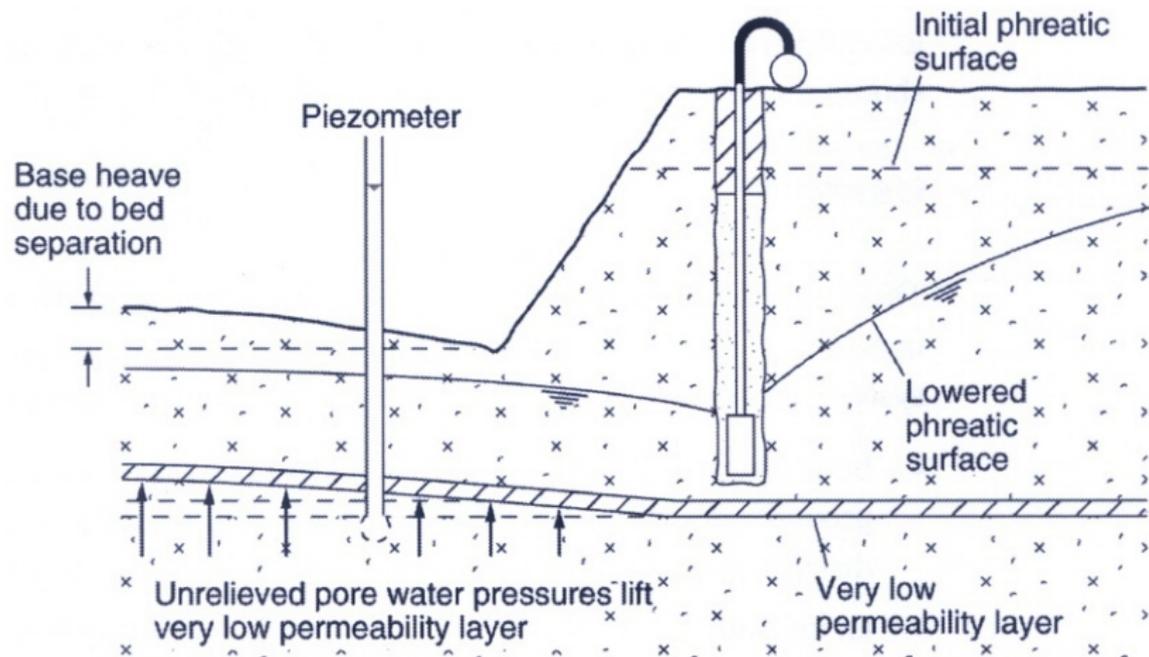
Introducción

- Cada vez que una **excavación se realiza por debajo del nivel freático**, existe un riesgo de que ésta sea **inestable** o se **inunde** si no se toman las medidas adecuadas para evitarlo.
- Dichas medidas pueden consistir en **barreras físicas** que impidan el acceso del agua a la excavación o en **bombeos** que depriman los niveles por debajo de la base de la misma o una **combinación de ambos**.
- Los **pozos de bombeo** correctamente diseñados, solos o combinados con una barrera física, son la **solución más económica y conveniente** al problema de control de niveles freáticos.
- El sistema de pozos a utilizar dependerá de la **naturaleza del terreno** y de la **profundidad de la excavación**.

Inestabilidad inducida por las aguas subterráneas en los taludes de una excavación



Inestabilidad inducida por las aguas subterráneas en la base de una excavación



Presión intersticial

- La presión del agua en los vacíos del suelo en cada punto es llamada **presión intersticial**.
- La presión intersticial **se mide en relación a la presión atmosférica**.
- La **superficie freática** se puede definir como aquella formada por los **puntos en los cuales la presión intersticial vale cero**.
- Por debajo de la superficie freática (zona saturada) la presión intersticial es **positiva y crece con la profundidad**.
- Por encima de la superficie freática (zona no saturada) se hace **negativa** hasta llegar a un valor constante.
- La presión intersticial es importante no sólo por sus **efectos sobre la dirección y velocidad del agua subterránea**, sino también por sus **efectos en la estabilidad de un suelo alrededor o bajo una excavación**.

Agua subterránea y estabilidad

- La **resistencia** del suelo y del agua a los **esfuerzos de corte** son bien distintas.
- La resistencia del agua a los esfuerzos de corte es despreciable mientras que el suelo puede resistir estos esfuerzos gracias a la **fricción entre partículas**.
- La **naturaleza friccional** de la resistencia de un suelo significa que cuanto más grande es la **tensión normal** que empuja a unas partículas contra otras, más grande será su resistencia a los **esfuerzos de corte**.
- Dadas las diferentes resistencias a los esfuerzos de corte de las partículas de suelo y del agua, las consideraremos por separado a través del concepto de **tensión efectiva**.

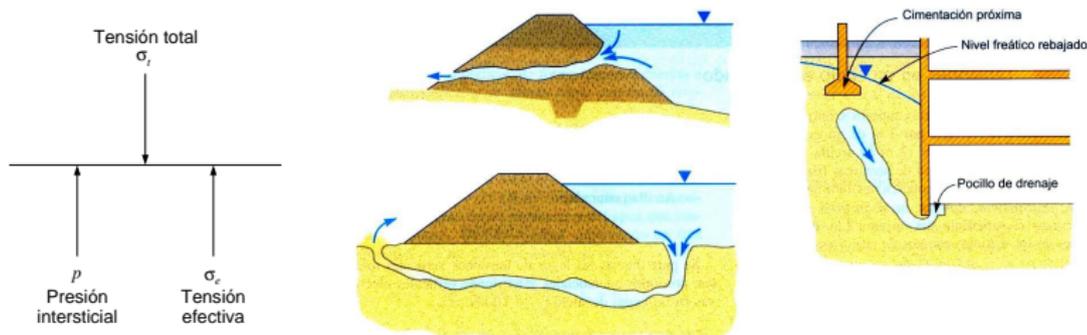
El principio de la tensión efectiva

- En palabras de Terzaghi:

“Las tensiones en cualquier punto de un plano que atraviesa una masa de suelo pueden ser calculadas a partir de las tensiones principales totales σ_t , que actúan en ese punto. Si los poros del suelo se encuentran rellenos de agua bajo una presión p , las tensiones principales totales se componen de dos partes. Una parte, p , llamada presión intersticial, actúa sobre el agua y sobre las partículas sólidas en todas direcciones y con igual intensidad. Las diferencias entre las tensiones principales y la presión intersticial representan un exceso de presión sobre la segunda, y actúa exclusivamente en la fase sólida del suelo. Estas fracciones de las tensiones principales totales se denominan tensiones efectivas σ_e .”

Tensión efectiva y estabilidad de la base

- La base de una excavación será inestable si la presión intersticial se acerca a la tensión total, o lo que es lo mismo si la **tensión efectiva vertical se aproxima a cero**.
- Esta condición es conocida como **sifonamiento** (“arenas movedizas” cuando ocurre sobre grandes áreas o “tubificación” sobre canales localizados).



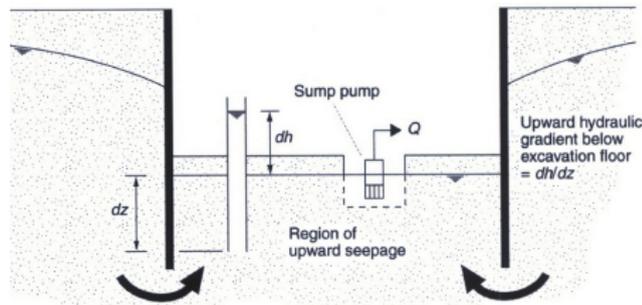
Tensión efectiva y estabilidad de la base

- Se puede demostrar que si consideramos un bloque de suelo a punto de sifonamiento, éste ocurrirá en las regiones en las cuales el gradiente hidráulico supera un **valor crítico** i_c definido como:

$$i_c = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_w}$$

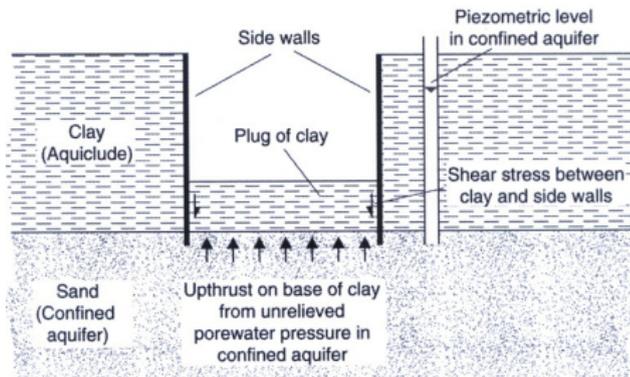
donde γ_s y γ_w son los pesos específicos del suelo saturado y del agua, respectivamente.

- Considerando que el peso específico de un suelo saturado ronda los 20 kN/m^3 y que el del agua es 10 kN/m^3 se verifica que $i_c \approx 1$.



Tensión efectiva y estabilidad de la base

- Una situación en la cual la base puede fallar es aquella para la cual la **excavación** se realiza en una **capa poco permeable sobre un acuífero confinado**.



- La inestabilidad se alcanza cuando el empuje hacia arriba debido a la presión intersticial del acuífero confinado iguala el peso del suelo de la base de la excavación más el esfuerzo de corte sobre las paredes de la excavación.

Tensión efectiva y estabilidad de taludes

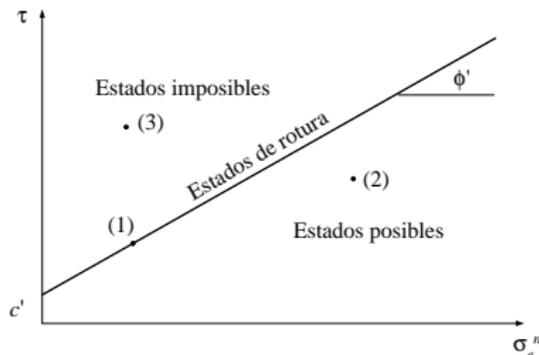
- La forma de rotura más habitual en los suelos es por **esfuerzo cortante** (tensión tangencial).
- Uno de los factores que más afecta la resistencia al corte de un suelo es el **estado tensional** del mismo y muy especialmente la presión del fluido que rellena sus poros (**presión intersticial**).
- El criterio de **rotura en suelos** más difundido deriva del propuesto por Coulomb y establece que, para un suelo saturado, la **resistencia al corte** viene dada por:

$$\tau = c' + (\sigma_t^n - p) \tan \phi' = c' + \sigma_e^n \tan \phi'$$

donde τ es la resistencia al corte del terreno a favor de un determinado plano; σ_t^n y σ_e^n son la tensión total normal y la tensión efectiva normal actuando sobre el mismo plano, respectivamente; p es la presión intersticial; c' es la cohesión efectiva y ϕ' es el ángulo de rozamiento interno efectivo.

Tensión efectiva y estabilidad de taludes

- La ecuación anterior se llama **línea de resistencia intrínseca** o **envolvente de rotura del suelo**, y proporciona para cada valor de la tensión efectiva normal σ_e^n a un plano, la máxima tensión tangencial τ soportable por dicho plano.
- La **cohesión efectiva** corresponde a la máxima τ cuando σ_e^n es nula.
- El **suelo es más resistente al corte cuanto mayor es σ_e^n** .
- La línea de resistencia separa **estados posibles** de imposibles:
 - (1) un estado de rotura.
 - (2) una combinación (σ_e^n, τ) del lado de la seguridad (estados posibles).
 - (3) una combinación (σ_e^n, τ) imposible.



Tensión efectiva y estabilidad de taludes

- Considerando **despreciable la cohesión efectiva** el criterio de rotura en suelos se expresa:

$$\tau = (\sigma_t^n - p) \tan \phi' = \sigma_e^n \tan \phi'$$

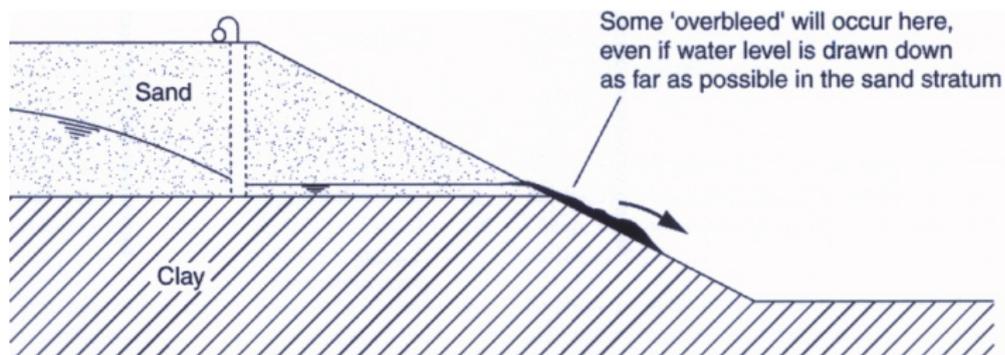
a partir de donde se ve que **una falla ocurrirá cuando**:

$$\frac{\tau}{(\sigma_t^n - p)} = \frac{\tau}{\sigma_e^n} = \tan \phi'$$

- Si el **suelo de un talud es drenado** tal que p es cero, se tendrá garantizada la estabilidad hasta pendientes iguales a ϕ' .
- Si hay **filtraciones de agua hacia el talud** y la presión intersticial crece, el ángulo para conseguir un talud estable puede reducirse hasta $\phi'/2$.

Tensión efectiva y estabilidad de taludes

- Si **la excavación corta dos estratos**, siendo el de abajo impermeable en comparación con el superior, resulta inevitable la aparición de un flujo de agua entre capas, el cual puede ocasionar erosión.



Soluciones generales para el control del nivel freático

- El control de los niveles freáticos en las obras civiles se puede conseguir por medio de **barreras físicas**, **pozos de bombeo** o **ambos**.
- El comportamiento de un **acuífero libre** ante la instalación de un sistema de control de niveles freáticos basado en pozos de bombeo depende del **tamaño de grano** del mismo.
- Si el acuífero está formado por **suelos de grano grueso**, el descenso de niveles se corresponde con un vaciado de los poros que quedan por encima de la capa freática.
- Si el acuífero está formado por **suelos de grano fino**, el agua no drena libremente por el espacio intergranular y aunque los niveles bajen, el suelo por encima de ellos puede permanecer saturado.
- La **presión intersticial** en los poros por encima de la nueva capa freática toma valores negativos e incrementa la tensión efectiva lo cual **aumenta la estabilidad del terreno**.

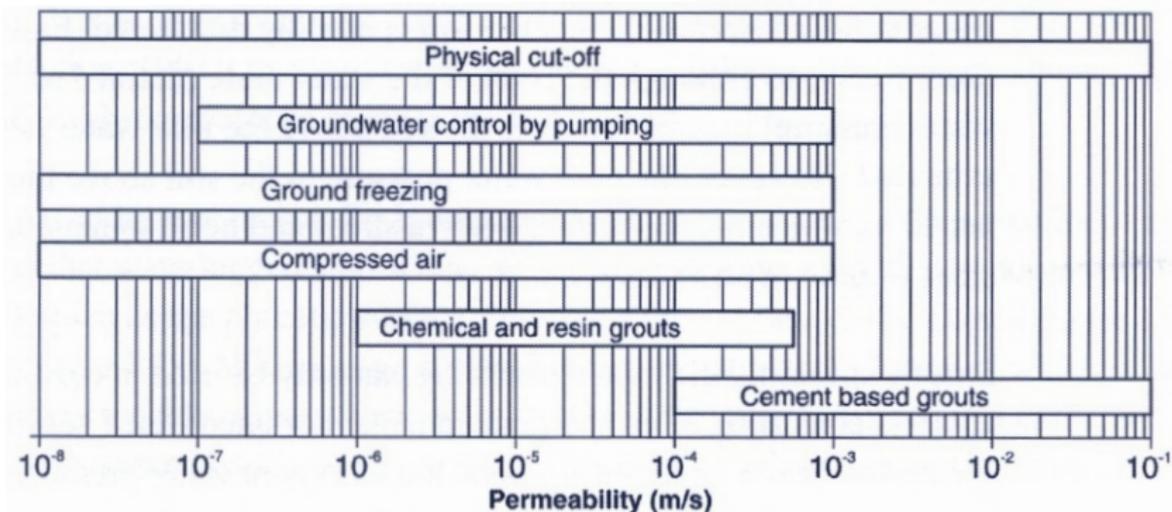
Una aclaración

- Estrictamente hablando, la denominación “control del nivel freático” (*dewatering*) sólo debería ser aplicada a **acuíferos libres formados por suelos de grano grueso**.
- En **acuíferos libres de grano fino o en acuíferos confinados** deberíamos hablar de “control de la presión intersticial” (*pore water pressure control*)

Tipos principales de barreras físicas

- Barreras por desplazamiento (*Displacement barriers*):
 - Tablestacas (*Steel sheet-piling*).
 - *Vibrated beam wall*.
- Barreras excavadas (*Excavated barriers*):
 - Zanjas rellenas con bentonita o arcilla del lugar (*Slurry trench cut-off wall using bentonite or native clay*).
 - Muro pantalla (*Structural concrete diaphragm walls*).
 - Columnas de jet (*Secant (interlocking) and contiguous bore piles*).
- Barreras de inyección (*Injection barriers*):
 - *Jet grouting*.
 - Inyección basadas en cemento (*Injection grouting using cementitious grouts*).
 - Inyección basadas en sustancias químicas (*Injection grouting using chemical and solution (acrylic) grouts*).
- Otros tipos:
 - Congelación del terreno usando nitrógeno líquido (*Ground freezing using liquid nitrogen*).
 - Aire comprimido (*Compressed air*).

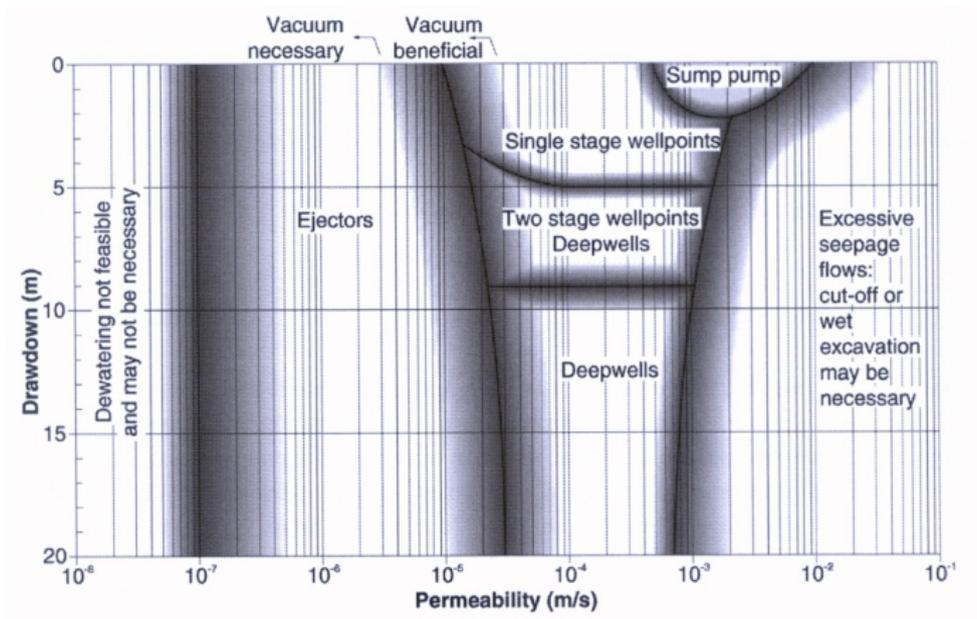
Rangos de aplicación



Tipos principales de métodos basados en pozos

- Tuberías o zanjas de drenaje (*Drainage pipes or ditches*).
- Bombeo desde sumideros (*Sump pumping*).
- Pozos puntuales (*Wellpoints*).
- Pozos puntuales horizontales (*Horizontal wellpoints*).
- Pozos profundos con bombas sumergibles (*Deepwells with submersible pumps*).
- Pozos de succión (*Suction wells*).
- Sistema eyector (*Ejector system*).
- Pozos pasivos y drenes de arena (*Passive relief wells and sand drains*).
- Pozos puntuales, eyectores y profundos con un sistema de vacío (*Vacuum wellpoints, vacuum ejector wells and deepwells with vacuum*).
- Electro-ósmosis (*Electro-osmosis*).

Rangos de aplicación



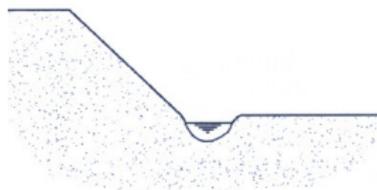
Sistemas para el control del nivel freático

- Los sistemas de control del nivel freático que se utilizan actualmente han sido **optimizados durante décadas** aunque **los principios en los que se basan permanecen sin cambios**.
- Las mejoras implementadas se han centrado en **reducir costos, utilizar nuevos materiales, sistemas de bombeo más óptimos y métodos de instalación más efectivos y rápidos**.
- Las limitaciones físicas de estos métodos **no han sufrido cambios importantes y no se espera que lo hagan en el futuro**.

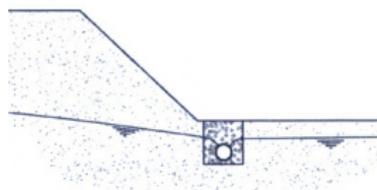
Control de las aguas superficiales

- En **suelos de grano grueso con una permeabilidad media o alta** el agua superficial se infiltra y puede ser capturada sin dificultad por cualquier sistema de control de niveles implementado.
- Cuando el **suelo es de grano fino y de media o baja permeabilidad** el agua puede no drenar o hacerlo muy lentamente.
- Las aguas superficiales se pueden controlar utilizando diferentes **sistemas de drenaje y captura**.

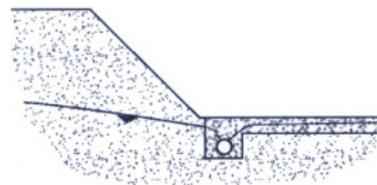
Control de las aguas superficiales



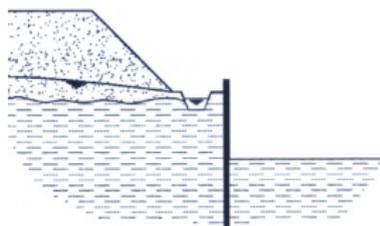
Ditch



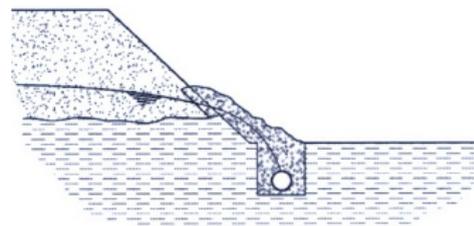
French drain



Drainage blanket



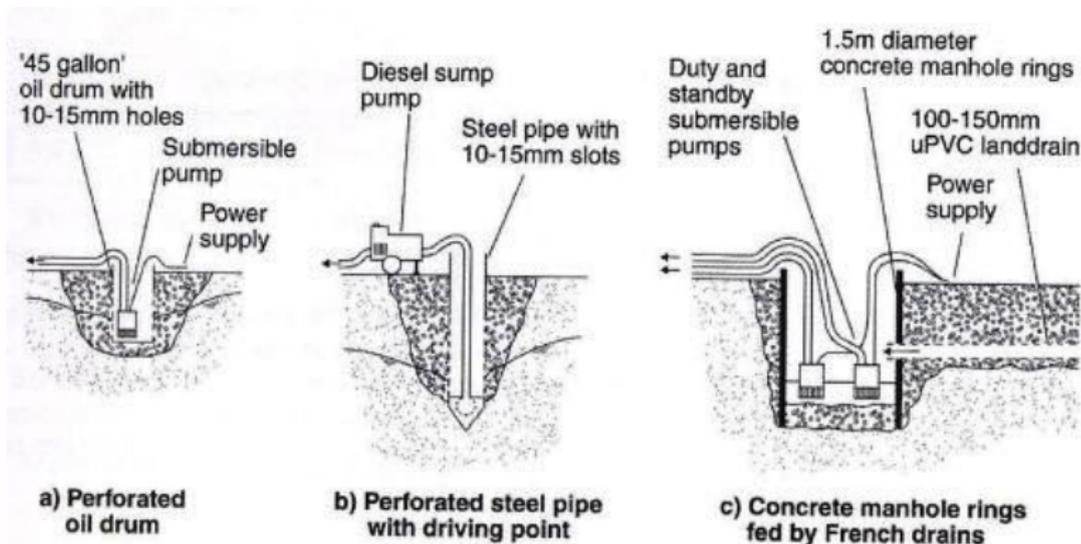
Garland drain



Batter protection

Bombeo desde sumideros (*Sump pumping*)

- Se trata de conducir por gravedad el agua hacia unos **sumideros** adecuadamente diseñados para extraerla luego por medio de **bombas**.

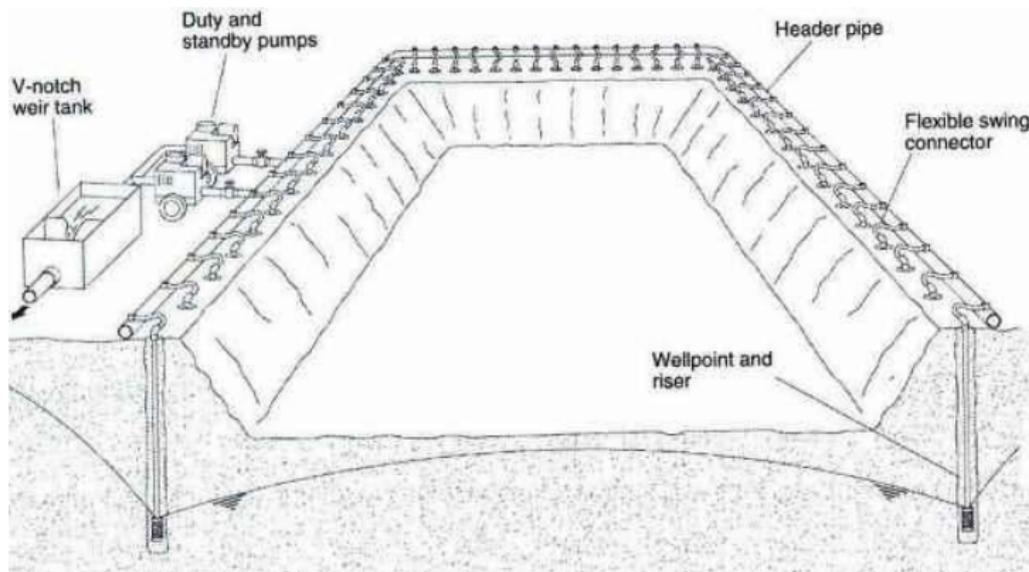


Bombeo desde sumideros (*Sump pumping*)

- No funcionará bien en suelos sensibles a las **fuerzas de arrastre** producidas por la filtración del agua pudiéndose crear condiciones aptas para el **sifonamiento**.
- Es un sistema al que afecta la **calidad** (sólidos en suspensión, cemento y/o hidrocarburos) y la **disposición** del agua bombeada.
- Requiere de un buen diseño de **control de aguas superficiales** y suele ser un método muy eficiente y barato si se dan las condiciones favorables para su aplicación.
- El sumidero debe ser construido teniendo en cuenta su **profundidad, tamaño, sistema de filtrado y acceso**.

Pozos puntuales (*Wellpoints*)

- Los sistemas de **pozos puntuales** constituyen un método de control de niveles **muy versátil** en cuanto a tipos de suelo y geometrías de la excavación.

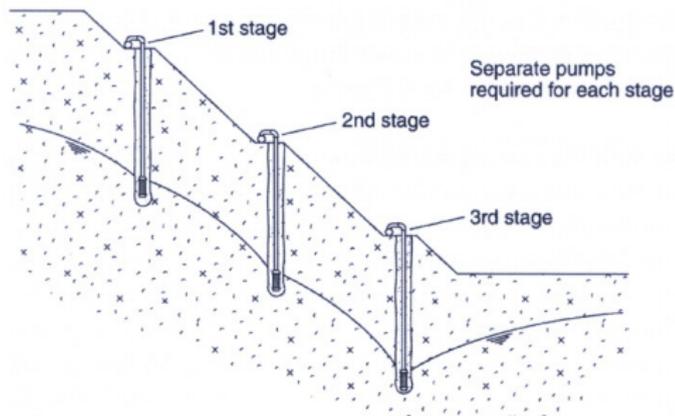


Pozos puntuales (*Wellpoints*)

- Los sistemas de pozos puntuales tienen las siguientes **ventajas**:
 - El mismo equipamiento puede ser utilizado alrededor de pequeñas y grandes excavaciones.
 - Se instalan rápidamente y en una gran variedad de suelos.
 - Los pozos se pueden emplazar muy cerca de manera que se consiguieren descensos efectivos en suelos estratificados.
- Los sistemas de pozos puntuales tienen las siguientes **limitaciones**:
 - La altura de succión en gravas y arenas puede ser de hasta 5 o 6 metros, pero en suelos de grano fino llega a 3.5 o 4.5 metros.
 - Las instalaciones superficiales que requieren pueden causar problemas de acceso al sitio.
- El **espaciado entre pozos** depende de los siguientes factores:
 - La permeabilidad del terreno y los flujos que se espera drenar.
 - La estratificación del suelo y el riesgo de flujos entre estratos (*overbleed flows*).
 - La geometría y el perímetro de la excavación.
 - Los descensos requeridos.

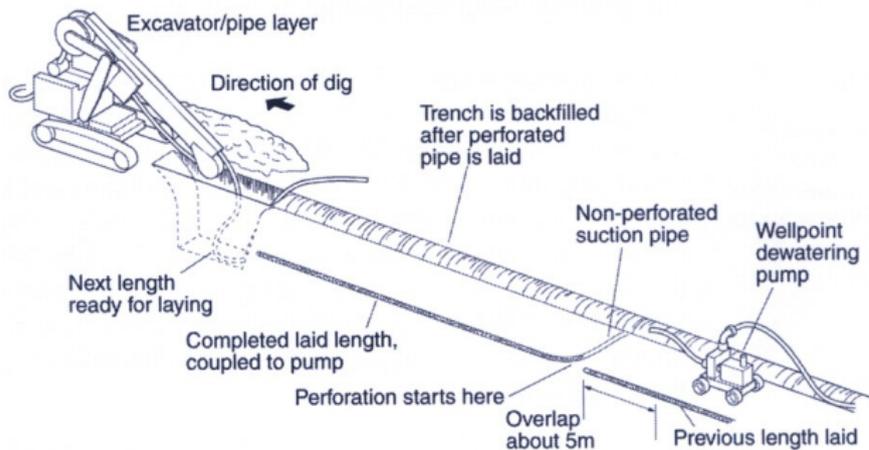
Pozos puntuales (*Wellpoints*)

- La **limitación en la altura de succión** se puede solventar a través de un sistema de pozos puntuales a diferentes profundidades (*multi-stage wellpoint system*).



Pozos puntuales horizontales (*Horizontal wellpoints*)

- Este sistema consiste en colocar una **tubería horizontal perforada en la base de una zanja** que puede llegar a tener una profundidad de entre 2 y 6 metros y una longitud de hasta 100 metros.
- La tubería se cubre rellenando la zanja y se conecta a una bomba ubicada en superficie.



Pozos puntuales horizontales (*Horizontal wellpoints*)

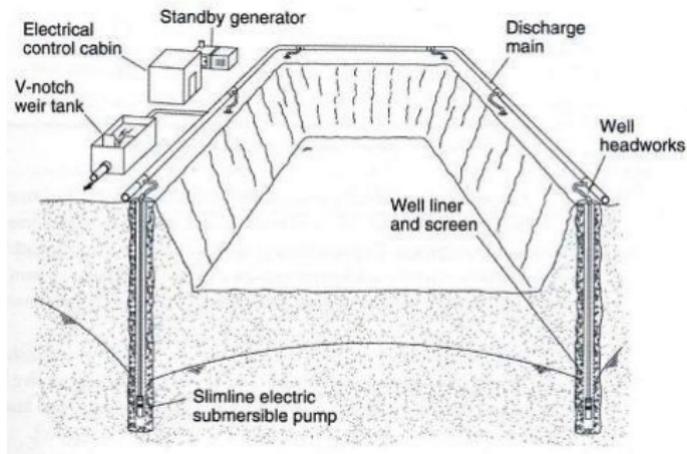
- La factibilidad de este sistema depende de la **velocidad** y el **costo de la instalación de drenaje**.
- En **suelos estables** se puede utilizar un sistema convencional de excavación y la instalación será económicamente viable.
- En **suelos inestables** la construcción de la zanja supondrá primero la instalación de un sistema de pozos puntuales convencional, por lo que su costo será mucho mayor.

Pozos puntuales horizontales (*Horizontal wellpoints*)

- Los sistemas de pozos puntuales horizontales tienen las siguientes **ventajas**:
 - Rápida instalación (hasta 1000 metros por día en buenas condiciones) con máquinas especiales para excavar zanjas.
 - No se requiere circulación de agua (*jetting water*) para su construcción.
 - Una vez que la tubería ha sido instalada, la puesta en marcha y desmantelamiento del sistema es simple y rápido.
- Los sistemas de pozos puntuales horizontales tienen las siguientes **limitaciones**:
 - La altura de succión está limitada a los 5 o 6 metros.
 - Si los suelos son blandos, el peso de las máquinas excavadoras puede hacer inviable su utilización.
 - Las máquinas excavadoras pueden sufrir graves daños si el suelo a excavar contiene adoquines y rocas.
 - La movilización de las máquinas excavadoras es caro pudiendo condicionar la instalación del sistema en caso de obras pequeñas.

Pozos profundos con bombas sumergibles (*Deepwells with submersible pumps*)

- En un sistema de pozos profundos, las limitaciones en la altura de succión, son resueltas colocando la **bomba en el fondo de la perforación**.
- Se trata de utilizar bombas similares a las empleadas en **pozos de suministro de agua**.



Pozos profundos con bombas sumergibles (*Deepwells with submersible pumps*)

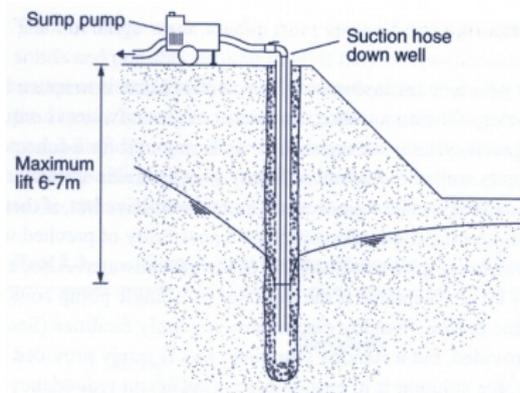
- En este tipo de sistemas los descensos conseguidos son función de la **potencia y comportamiento de las bombas instaladas y de las propiedades del terreno**.
- Si las formaciones bombeadas son **poco permeables**, los descensos conseguidos con un solo pozo serán insuficientes y se hace necesario implementar una batería de pozos.
- Una **batería de pozos** basa su funcionamiento en la **superposición de efectos** para lograr unos descensos buscados.
- En estos casos, las **propiedades del terreno** tienen una gran influencia sobre la factibilidad de la solución implementada.
- La **disponibilidad de información** caracterizando el terreno (ensayos de bombeo) es vital en este tipo de sistemas.

Pozos profundos con bombas sumergibles (*Deepwells with submersible pumps*)

- Los sistemas de pozos profundos con bombas sumergibles tienen las siguientes **ventajas**:
 - Los descensos conseguidos están sólo limitados por la potencia y profundidad de la bomba y por la estratificación del terreno.
 - Los pozos pueden ser emplazados fuera del área de trabajo.
 - Los pozos son construidos a gran distancia unos de los otros lo cual reduce los problemas de acceso a la obra.
- Los sistemas de pozos profundos con bombas sumergibles tienen las siguientes **limitaciones**:
 - Los costos de instalación por cada pozo son altos por lo que requiere optimizar su número.
 - Se requiere información cualitativa acerca del sitio donde se van a instalar los pozos.
 - Las bombas utilizadas son eléctricas por lo que se requiere del correspondiente suministro de energía.

Pozos de succión (*Suction wells*)

- Un pozo de succión es un pozo profundo que es bombeado por una **bomba de succión en superficie**.



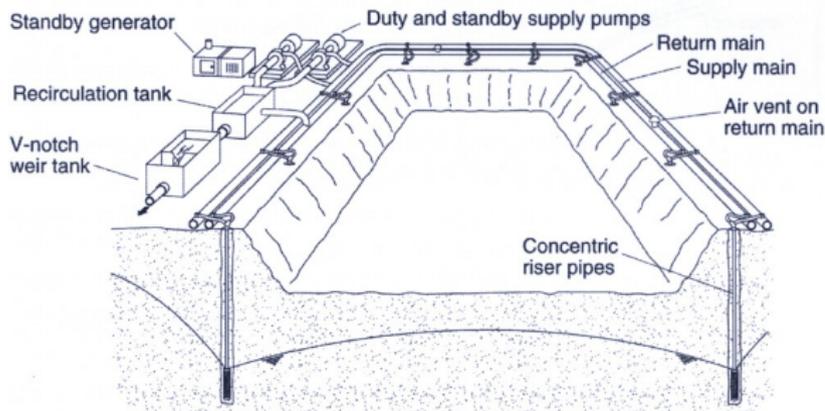
- El descenso máximo conseguible puede rondar los 6 metros.

Pozos de succión (*Suction wells*)

- Los sistemas de pozos de succión tienen las siguientes **ventajas**:
 - Se pueden utilizar bombas con motor diesel evitando el suministro de energía eléctrica.
 - Las bombas utilizadas para bombeos desde sumideros pueden ser utilizadas en esta técnica.
 - Se consiguen pozos con alto rendimiento y diámetros pequeños ya que el pozo sólo debe permitir el paso de la tubería de succión.
- Los pozos de succión son aptos para conseguir buenos descensos en acuíferos gravosos de alta permeabilidad.

Sistema eyector (*Ejector system*)

- Un sistema eyector es un conjunto de **pozos con bombas de chorro en la base de cada uno.**



Sistema eyector (*Ejector system*)

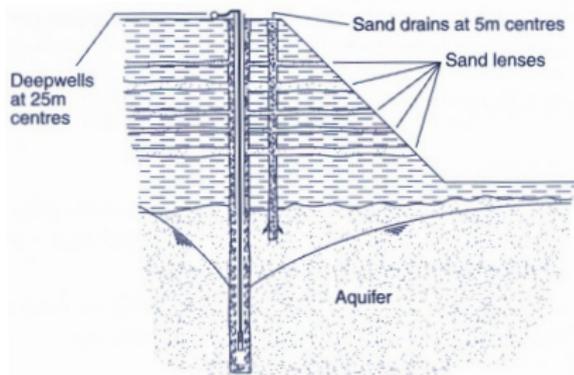
- Los sistemas eyectores tienen las siguientes **ventajas**:
 - Las profundidades de operación no están limitadas por la altura de succión, habiendo eyectores capaces de trabajar a 150 metros de profundidad aunque lo normal es estar entre los 30 y los 50 metros.
 - Cuando se utilizan eyectores de una sola conducción, el diámetro interno de la perforación puede llegar a ser tan pequeño como 50 mm, lo que hace que este sistema sea muy factible económicamente.
- Los sistemas eyectores tienen las siguientes **limitaciones**:
 - La capacidad individual de cada eyector es limitada.
 - Los eyectores tienen poca eficiencia energética por lo que si los caudales a bombear son moderados, su costo puede ser prohibitivo.

Pozos pasivos y drenes de arena (*Passive relief wells and sand drains*)

- Los pozos pasivos tienen las siguientes **ventajas**:
 - No necesitan bombas y pueden alcanzar un diámetro modesto.
 - Se trata de un pozo vertical relleno con arena o grava.
 - El agua se evacua con un sistema de bombeo desde sumidero fácilmente instalable.
- Los pozos pasivos tienen las siguientes **limitaciones**:
 - Es difícil comprobar la efectividad del sistema antes de su implementación a menos que se disponga de información acerca del comportamiento hidráulico de la zona (ensayo de bombeo).
 - Los pozos pasivos conducen el agua directamente de la formación a la excavación por lo que si la instalación de drenaje no está adecuadamente mantenida, las condiciones de trabajo se pueden ver afectadas.
 - Pueden estimular la inestabilidad de la capa inmediatamente por debajo de la excavación.
 - Pueden ser difíciles de sellar al acabar la obra.

Pozos pasivos y drenes de arena (*Passive relief wells and sand drains*)

- Los **drenes de arena** son un tipo especial de pozo pasivo que pueden **conectar hidráulicamente dos acuíferos**.
- Pueden ser utilizados para **drenar un acuífero colgado** hacia otro inferior cuyos niveles están siendo deprimidos.
- El agua de los acuíferos colgados puede afectar la **estabilidad de la excavación** si no es drenada.



Sistemas para el control de la presión intersticial

- La presión intersticial puede controlarse a través de **pozos puntuales, ejectores o profundos** a los que se acopla un **sistema de vacío** y por **electro-ósmosis**.
- El sistema de vacío acoplado a un pozo puntual, ejector o profundo tiene por objeto adaptar las configuraciones originales al caso de **suelos de baja permeabilidad**.
- La perforación realizada es de un diámetro que permita la instalación de un **material filtrante** entre tubería de succión y suelo tal que los orificios de la primera no se colmaten con las partículas del suelo.
- Un **sello de bentonita** sella la boca del pozo para evitar la entrada de aire a la zona de material filtrante y hacer más óptimo el sistema.

Electro-ósmosis

- La electro-ósmosis puede utilizarse para conseguir un control de la presión intersticial en **suelos arcillosos y limosos muy finos**.
- En dichos suelos, cuyas permeabilidades son muy bajas, es **difícil aplicar las técnicas de pozos con sistema de vacío**.
- Las desventajas de este método radican en el **alto costo de la energía necesaria** y en los **problemas que pueden derivarse en relación a la salud y la seguridad** por el hecho de trabajar con un circuito de corriente continua.
- Puede ser utilizado para **mejorar** el resultado conseguido con otros métodos.
- Es un método poco utilizado por que los **caudales conseguidos son pequeños** y los **expertos en él son escasos**.

Resumen

- El control de las aguas subterráneas cada vez que se realiza una **excavación por debajo del nivel freático** es inevitable si se quiere eliminar el riesgo de que ésta se torne inestable o se inunde.
- Para conseguirlo se deben tomar medidas que pueden consistir en **barreras físicas** que impidan el acceso del agua a la excavación o en **bombes** que depriman los niveles por debajo de la base de la misma o una **combinación de ambos**.
- Estrictamente hablando, la denominación “control del nivel freático” (*dewatering*) sólo debería ser aplicada a **acuíferos libres formados por suelos de grano grueso**.
- En **acuíferos libres de grano fino o en acuíferos confinados** deberíamos hablar de “control de la presión intersticial” (*pore water pressure control*)
- En esta clase hemos descrito las **medidas de control de niveles y de presión intersticial basadas en bombeos**.

Bibliografía

- **Groundwater**, Freeze, R. A. y Cherry, J. A., Prentice Hall, 1979.
- **Ingeniería Geológica**, González de Vallejo, L. I. (coord.), Prentice Hall, 2002.
- **Groundwater Control**, Preene, M.; Roberts, T.; Powrie, W. y Dyer, M., CIRIA, 2000.