

INGENIO^{xyz}

PATOLOGÍAS GEOTÉCNICAS EN EDIFICACIÓN

Fernando Rodríguez Ballesteros

www.ingenio.xyz



*Un experto es alguien que conoce cuáles son los peores errores
que pueden cometerse en su especialidad,
y que sabe cómo evitarlos.
(Heisenberg)*

ÍNDICE

1. **Objeto**
2. **Metodología de Actuación**
3. **Estados Límites**
 - 3.1. Estados Límites Últimos
 - 3.1.1. Fallo o Deformación excesiva del Terreno (GEO)
 - 3.1.1.1. Cimentaciones Superficiales
 - 3.1.1.2. Cimentaciones Profundas
 - 3.1.1.3. Estructuras de Contención de Tierras
 - 3.1.2. Fallo o Deformación excesiva de la Estructura (STR)
 - 3.1.3. Pérdida de Equilibrio de la Estructura o del Terreno (STR)
 - 3.1.4. Pérdida de Equilibrio de la Estructura o del Terreno por Levantamiento (UPL)
 - 3.1.4.1. Levantamiento del Fondo de la Excavación
 - 3.1.4.2. Levantamiento Hidráulico (Subpresión)
 - 3.1.5. Fallo ocasionado por la Filtración de Agua en el Terreno. Sifonamiento (HYD)
 - 3.1.5.1. Sifonamiento (Hydraulic Heave)
 - 3.1.5.2. Erosión interna. Tubificación (Piping)
 - 3.2. Estados Límites de Servicio
4. **Causas Principales de Patologías**
 - 4.1. Desconocimiento del Comportamiento del Terreno
 - 4.1.1. Afectación a Cimentaciones existentes
 - 4.2. Agua
 - 4.2.1. Consideraciones generales para excavaciones bajo el agua
 - 4.2.2. Variaciones del Nivel Freático asociadas a excavaciones
 - 4.2.3. Asientos debidos al descenso del Nivel Freático
 - 4.2.4. Agresividad del Agua Freática
 - 4.3. Terrenos Metaestables
 - 4.3.1. Suelos Colapsables
 - 4.3.2. Rellenos
 - 4.3.3. Arcillas Expansivas
 - 4.4. Cimentaciones en Terreno Inestable
 - 4.5. Deformaciones producidas por excavaciones
 - 4.5.1. Excavaciones a Cielo Abierto
 - 4.5.2. Excavaciones Profundas
 - 4.6. Excavaciones Inmoderadas
 - 4.7. Impacto de las prácticas constructivas
 - 4.8. Vibraciones

5. Fisuras y Grietas en Edificios

- 5.1. Daños. Clasificación y Criterios de Evaluación
 - 5.1.1. Planteamiento
 - 5.1.2. Categorización de Daños y Deformaciones Límites de Cimentaciones
- 5.2. Comportamiento de Edificaciones frente a Deformaciones Impuestas
 - 5.2.1. Deformación Límite de Tracción
 - 5.2.2. Deformaciones en Vigas Equivalentes de Sección Rectangular
- 5.3. Análisis de Fisuras y Grietas en cerramientos y tabiquería
 - 5.3.1. Efecto de la presión vertical en fisuras inclinadas
 - 5.3.2. Deformación cóncava (en arrufo) de la superficie del terreno
 - 5.3.3. Deformación convexa (en quebranto) de la superficie del terreno

6. Reparación y Consolidación de Cimentaciones

- 6.1. Atenuación o Anulación de los Agentes Desencadenantes
- 6.2. Intervenciones Directas
 - 6.2.1. Rigidización de la base de la estructura
 - 6.2.2. Profundización de la zona de transmisión de cargas al terreno
 - 6.2.3. Ampliación de la superficie de contacto cimentación – terreno.
- 6.3. Intervenciones Indirectas
 - 6.3.1. Cambio en alzado del sistema estructural
 - 6.3.2. Cambio inducido del estado tensional del subsuelo
 - 6.3.3. Inyecciones consolidación del terreno
 - 6.3.4. Congelación del agua del terreno
- 6.4. Enderezado de Edificios Inclinados

7. Referencias

4. Causas Principales de Patologías

4.1. Desconocimiento del Comportamiento del Terreno

- Reconocimientos Insuficientes
- Capacidad Portante
- Comportamiento en Profundidad. Asientos Diferenciales
- Interacción Suelo-Estructura
- Asientos de conjunto. Errores en el Cálculo de Asientos
- Afectación a Cimentaciones Existentes
- Cimentación heterogénea: zapatas + pilotes.
- Edificios anexos de distinta altura → sótanos

4.1.1. Afectación a Cimentaciones Existentes

La interacción con construcciones adyacentes debe investigarse cuidadosamente en la concepción y diseño de actuaciones sobre el terreno (cimentaciones, rellenos, excavaciones, ...) especialmente en presencia de suelos compresibles: suelos arcillosos normalmente o poco preconsolidados.

Como ejemplo extremo, se muestra el caso del colapso de un edificio de viviendas en el distrito Minhang de la ciudad de Shanghai (figura 4.1)

- (1) Se excavó un garaje de 4,6 metros en la cara sur del edificio.
- (2) La tierra excavada se amontonó en la cara norte, hasta una altura de 10 metros
- (3) Fuertes Lluvias: Reducción de resistencia del terreno, fuerzas de filtración
- (4) Cizalla de los pilotes por los empujes laterales debidos a la excavación y al relleno
- (5) Fallo por vuelco del edificio

En suelos arcillosos normalmente o poco preconsolidados, es habitual el empleo de cimentaciones compensadas por losa cuando el peso de las tierras retiradas para la excavación de los sótanos es superior al transmitido por la estructura. Esta solución es admisible únicamente en ausencia de actuaciones no previstas en los estratos compresibles (rellenos, excavaciones ...) o de estructuras adyacentes nuevas o ya existentes.

En la figura 4.2. se muestran los posibles tipos de daños causados a y entre construcciones adyacentes en edificios cimentados por losa [Ref.12].

- a) Los edificios A y B están contruidos aproximadamente en la misma época.
- b) Edificios A y B coetáneos y Edificio C un poco después.
- c) Edificio B construido mucho después que Edificio A.
- d) Edificios B y C contruidos casi simultáneamente tras un edificio ya existente, A.

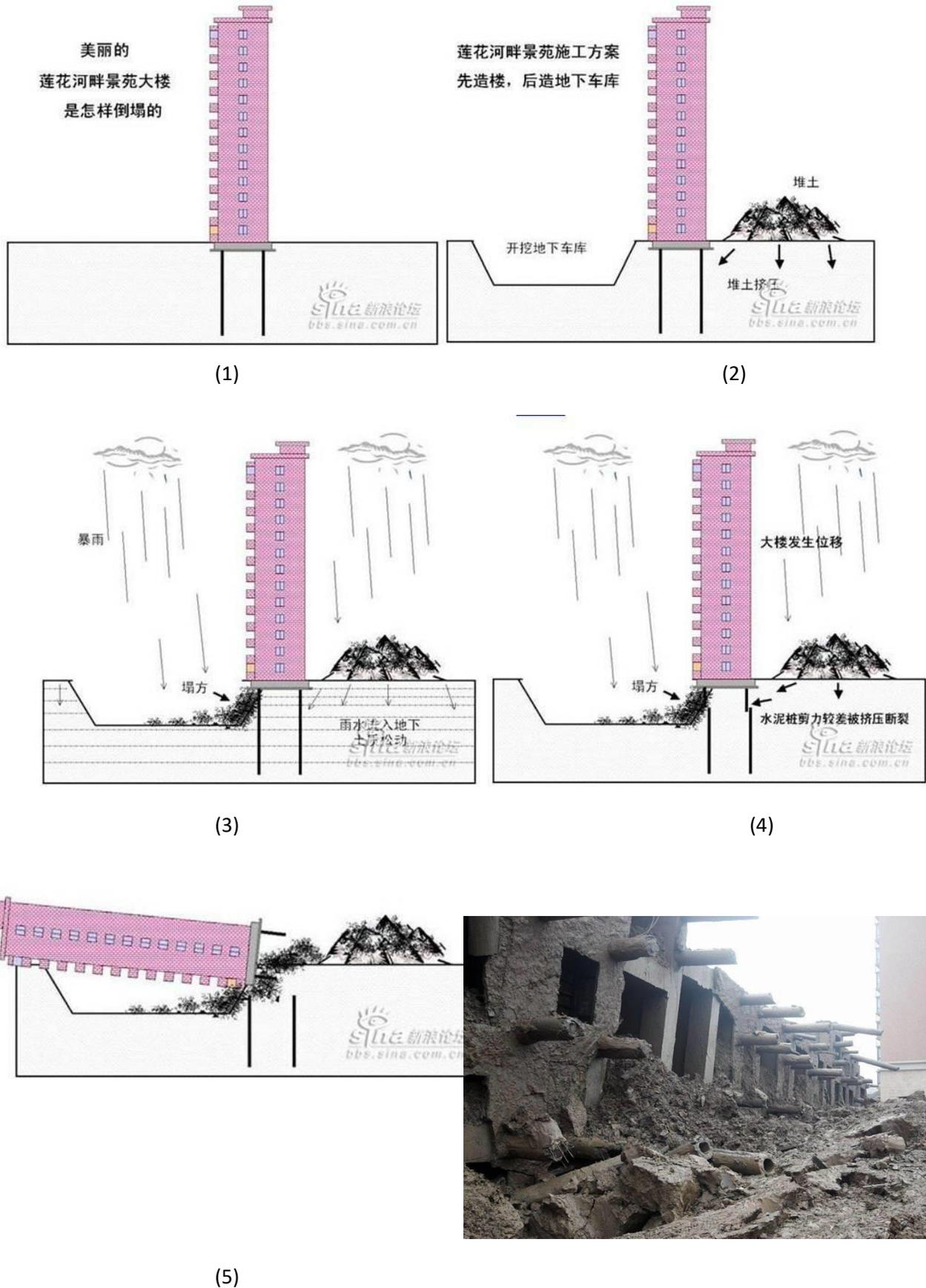
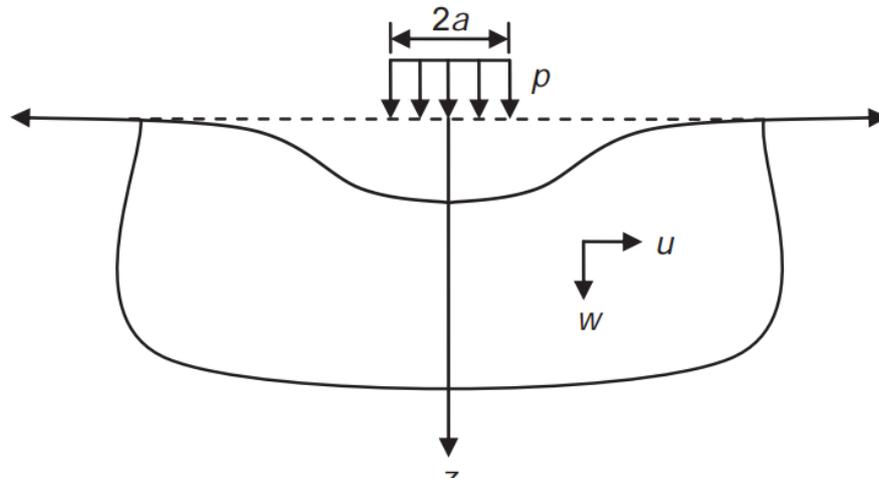


Figura 4.1.



Semiespacio Elástico

Perfil de asientos en superficie bajo una presión uniforme p sobre una superficie circular de radio a .

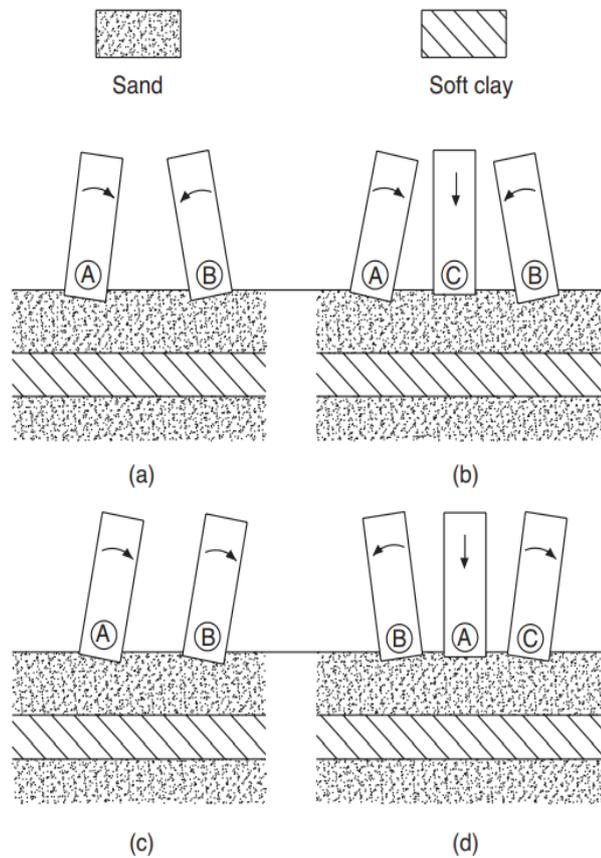
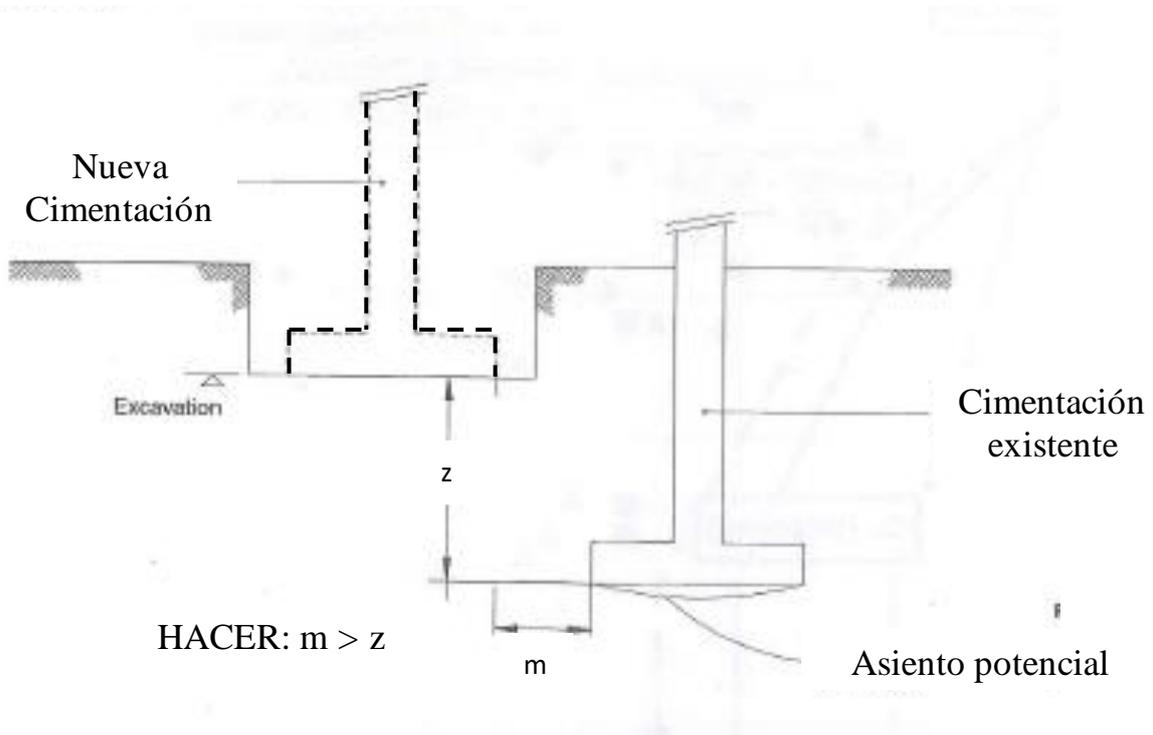


Figura 4.2

Influencia de edificios adyacentes (Texeira, 2003, [Ref.12])

Nuevas cimentaciones por encima de zapatas existentes pueden sobrecargarlas y, en consecuencia, generar nuevos asientos



Desestabilización de cimentaciones existentes, por la excavación de una nueva cimentación al mismo nivel

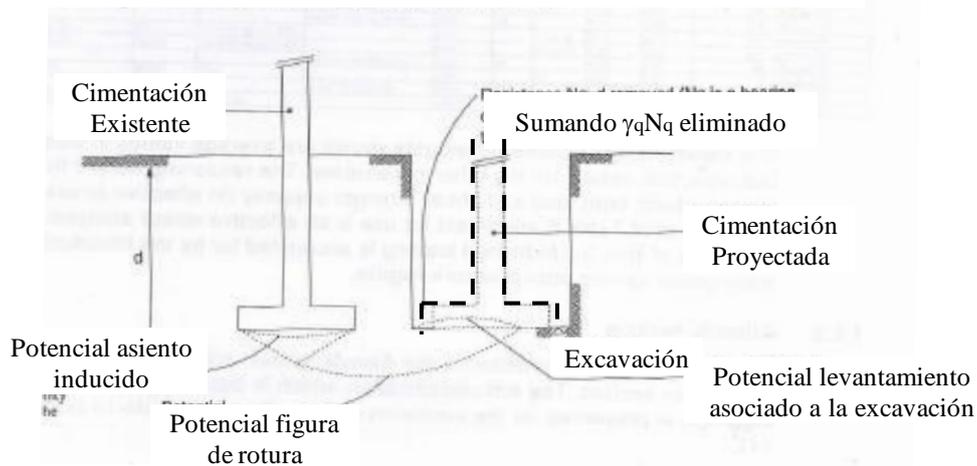
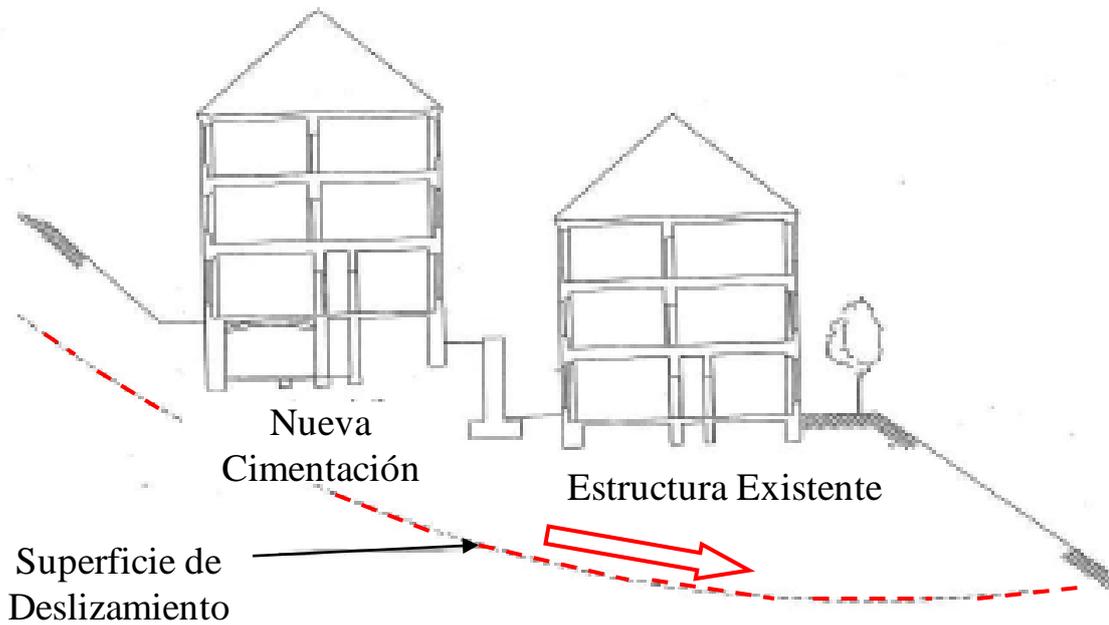


Figura 4.3
Afectación Cimentaciones existentes



Inestabilización de Ladera por el nuevo edificio

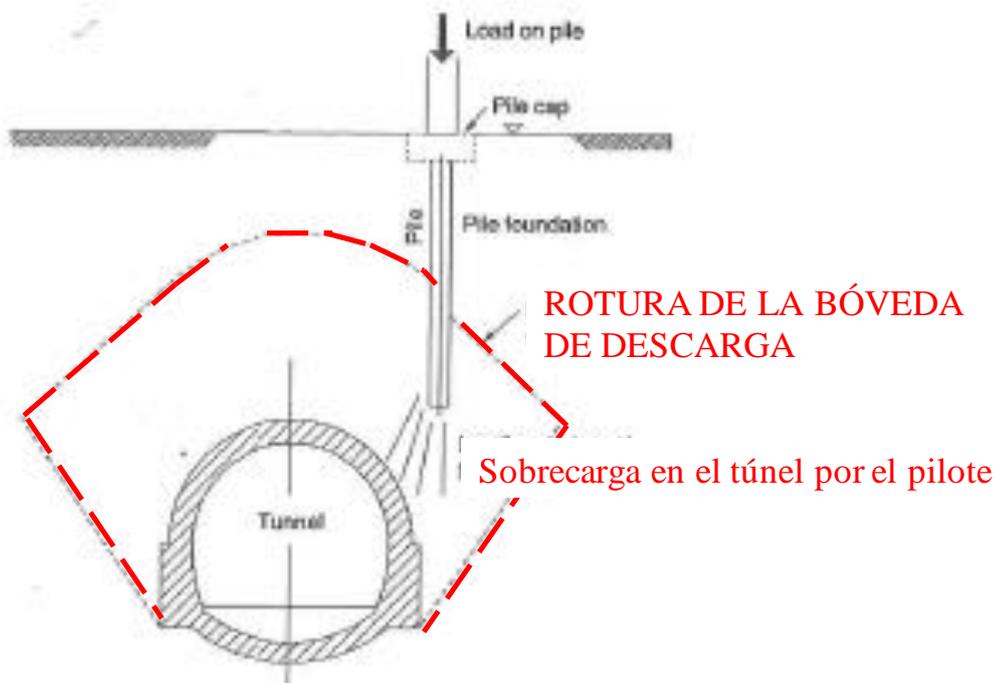


Figura 4.4
Afectación a Estructuras Existentes [Ref.17]

4.2. Agua

A continuación se enumeran las principales acciones del agua causantes de patologías:

- Erosión
- Socavación
- Heladas. Suelos Finos.
- Cambios de Volumen del Terreno
 - Colapso (§4.3.2.)
 - Hinchamiento y retracción (§4.3.3.)
- Alteración de la resistencia
 - Capacidad Portante
 - Deslizamientos
- Inestabilización causada por excavaciones
- Empujes hidrostáticos. Subpresiones (§3.1.4.2.).
- Sifonamiento o Licuefacción (§3.1.5), estática y dinámica
- Variaciones del Nivel Freático
- Asientos debidos al descenso del nivel freático
- Agresividad a los elementos en contacto con el terreno

4.2.1. Consideraciones generales para excavaciones bajo el agua

En relación al tipo de agua asociada a las excavaciones pueden presentarse los siguientes casos diferenciados:

- Aguas abiertas, lagos, ríos, por ejemplo
- Nivel freático libre
- Nivel freático confinado

Para la diferenciación entre acuíferos libre y confinado es preciso definir los conceptos de Nivel Freático y Nivel Piezométrico. Se define con nivel freático de un acuífero la superficie de agua que limita la parte superior del mismo. Como nivel piezométrico se entiende a la superficie donde la presión de las partículas líquidas es igual a la presión atmosférica.

Según las definiciones anteriores, un **acuífero libre** es aquel donde el **nivel piezométrico coincide con el nivel freático** o techo del acuífero. Generalmente se suele llamar acuífero freático al primer acuífero encontrado debajo de la superficie del terreno. Esta es la capa que suele alimentar los pozos y la que produce los principales problemas para las construcciones.

Un **acuífero cautivo (o artesiano)**, es aquel donde el techo del acuífero se mantiene por debajo del nivel piezométrico por la presencia de un nivel impermeable. Esto significa que el agua está bajo presión, y si se realiza un taladro en la parte superior del acuífero, el agua ascenderá por él hasta que desaparezca la presión y se iguale con la presión atmosférica.

Se denominan aguas artesianas las que circulan en el seno de un acuífero cautivo. Se distingue entre aguas artesianas surgentes y no surgentes. En las primeras el nivel piezométrico está por encima del nivel del suelo, y en las segundas el nivel piezométrico está por debajo del nivel del suelo.

En la figura 4.5 se esquematizan situaciones potenciales susceptibles de originar movimientos del terreno.

Para la adopción de parámetros para el diseño de una estructura de excavación bajo el agua deben tenerse en consideración los siguientes puntos:

- Puede desarrollarse una diferencia local excesiva de presión intersticial en arenas finas saturadas y en suelo limosos y, en consecuencia, puede establecerse un flujo de suelo licuefactado
- Pueden desarrollarse presiones intersticiales adicionales
- Es posible la meteorización o reblandecimiento del suelo.

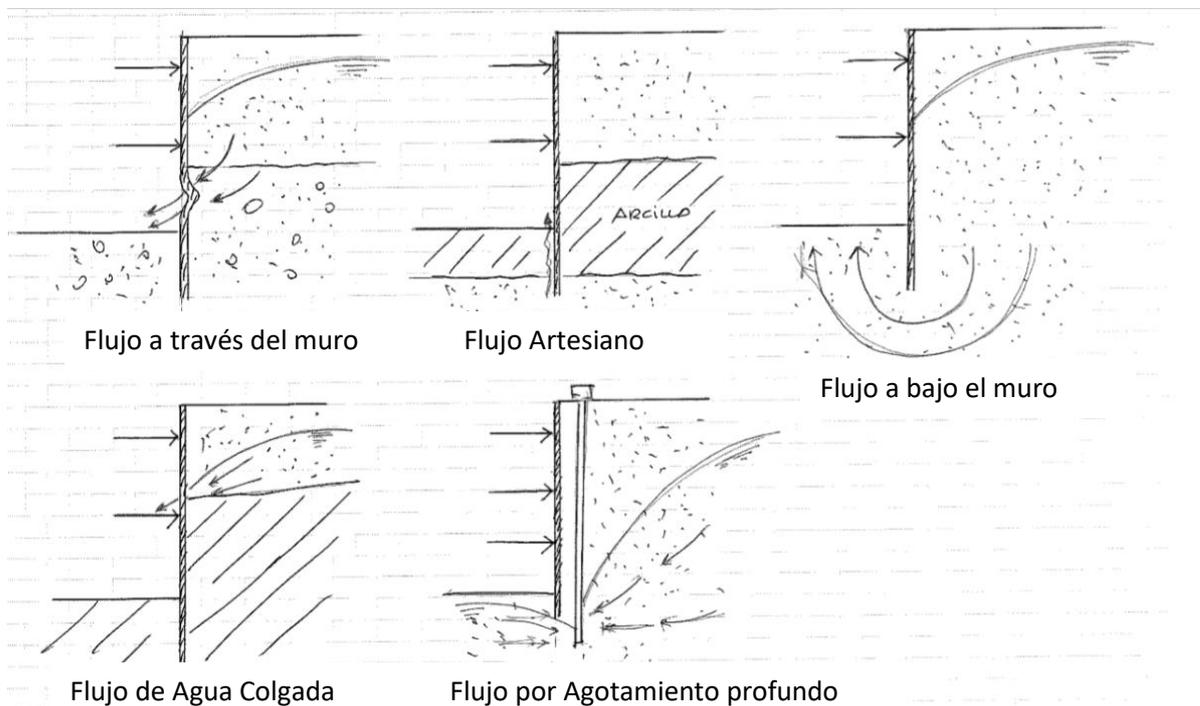


Figura 4.5
Excavaciones bajo Nivel Freático.
Situaciones potenciales que pueden causar movimientos del terreno [Ref.10]

- 1) Si el NF es rebajado como se muestra en la figura 4.6 a), deben analizarse el impacto de las fuerzas de filtración S en la estabilidad de la estructura de contención.
- 2) En suelos permeables, el perfil de la superficie libre es generalmente tan plana que el agua freática no ocasiona fuerzas de filtración apreciables. En **limos y arenas finas**, sin embargo, la superficie libre del agua rebajada puede presentar una pendiente tan marcada que intersecte la superficie de deslizamiento e influya en la magnitud de los empujes activos (Figura 4.6)

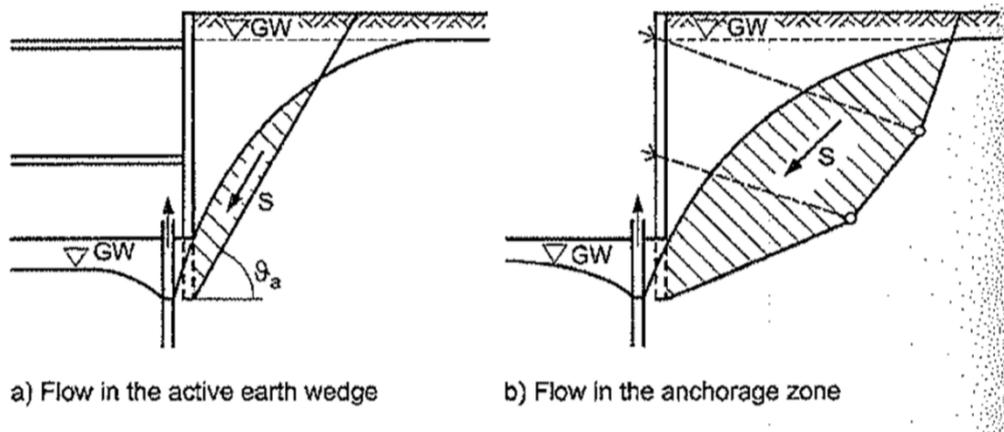


Figura 4.6

Fuerzas de Filtración asociadas a un rebajamiento del Nivel Freático [Ref.9]

- 3) En suelos estratificados, con alternancia de niveles permeables e impermeables, es a menudo imposible alcanzar el rebajamiento total del NF. Las aguas colgadas, no agotadas, producen los siguientes efectos (Figura 4.7.a):

- Se desarrollan presiones intersticiales adicionales en los horizontes permeables en que el agua no es drenada.
- El peso unitario del suelo es reducido de γ a γ' en los horizontes permeables señalados.
- Se desarrolla un gradiente $i = (h+d)/d$ en el horizonte impermeable. El peso unitario total del suelo se incrementa en consecuencia de $\gamma_t = \gamma' + \gamma_w$ a $\gamma_t = \gamma' + i\gamma_w$

Los efectos en la presión intersticial se muestran en la figura **Figura 4.7.b**, y los correspondientes a los empujes de tierras en la figura **Figura 4.7.c**.

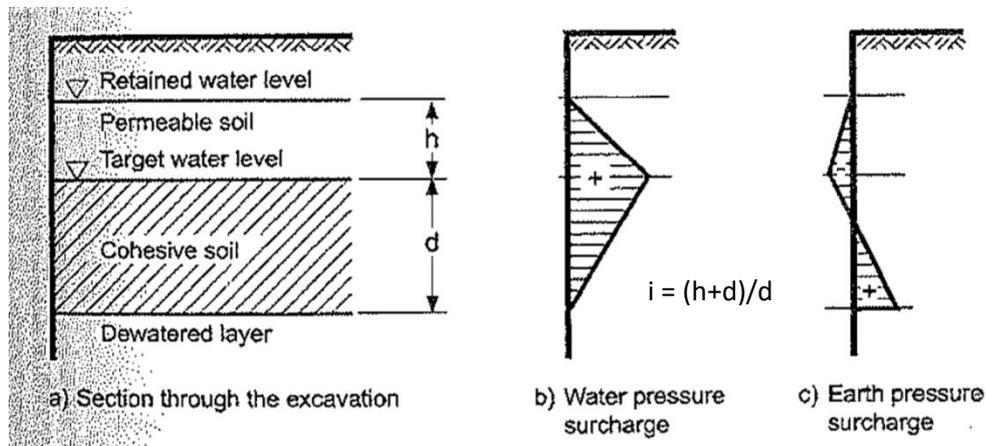


Figura 4.7.

Impacto de aguas colgadas en terreno estratificado [Ref.9]

- 4) Para la determinación del empuje pasivo se asume generalmente que el nivel de agua en el interior de la excavación puede coincidir con el fondo de la excavación y que el suelo está por consiguiente completamente sumergido. Los efectos del rebajamiento del NF y, en consecuencia, el peso unitario adoptado del suelo pueden tenerse únicamente en consideración si se adoptan medidas preventivas contra el fallo posible del bombeo.

Si, a pesar de las medidas de agotamiento adoptadas, un nivel cohesivo por debajo de la cota excavación es sometido a un empuje artesiano ascendente por un acuífero confinado subyacente, debe tenerse en cuenta la reducción del peso unitario y debe asegurarse la estabilidad frente a la rotura por subpresión del horizonte impermeable.

- 5) Si la curva del NF rebajado intersecta la región de suelo potencialmente inestable, como se muestra en la figura 4.6), debe tenerse en cuenta el efecto de las fuerzas de filtración S para los análisis de estabilidad profunda y general.
- 6) En presencia de suelos de permeabilidades diferentes, la caída de presión intersticial se concentra en los horizontes menos permeables. En principio, pueden diferenciarse los siguientes casos(Figura 4.8):
- En relación a la seguridad frente al sifonamiento, la presencia de un nivel menos permeable bajo la base de la excavación es desfavorable, pues se concentra en este horizonte la mayor parte de la pérdida de carga, incrementando el gradiente en el mismo respecto del correspondiente a un terreno homogéneo, tal como puede apreciarse en las redes de flujo de los gráficos representadas en la figura 4.8. En el análisis del caso 4.8.a, por ejemplo, la red de flujo debe limitarse al horizonte menos permeable.
 - Es particularmente desfavorable el caso en que un horizonte menos permeable, posiblemente cohesivo, está sobre un nivel permeable, conectado hidráulicamente con el nivel permeable superior (Figura 4.8.b).

c) Si hay un nivel menos permeable por encima de un nivel permeable como se indica en la figura 4.8.c), el efecto favorable asociado puede ser considerado únicamente bajo ciertas condiciones, ya que incluso ligeras alteraciones del terreno pueden afectar adversamente a los gradientes hidráulicos. En consecuencia, es recomendable la monitorización de la evolución de las presiones intersticiales durante la obra.

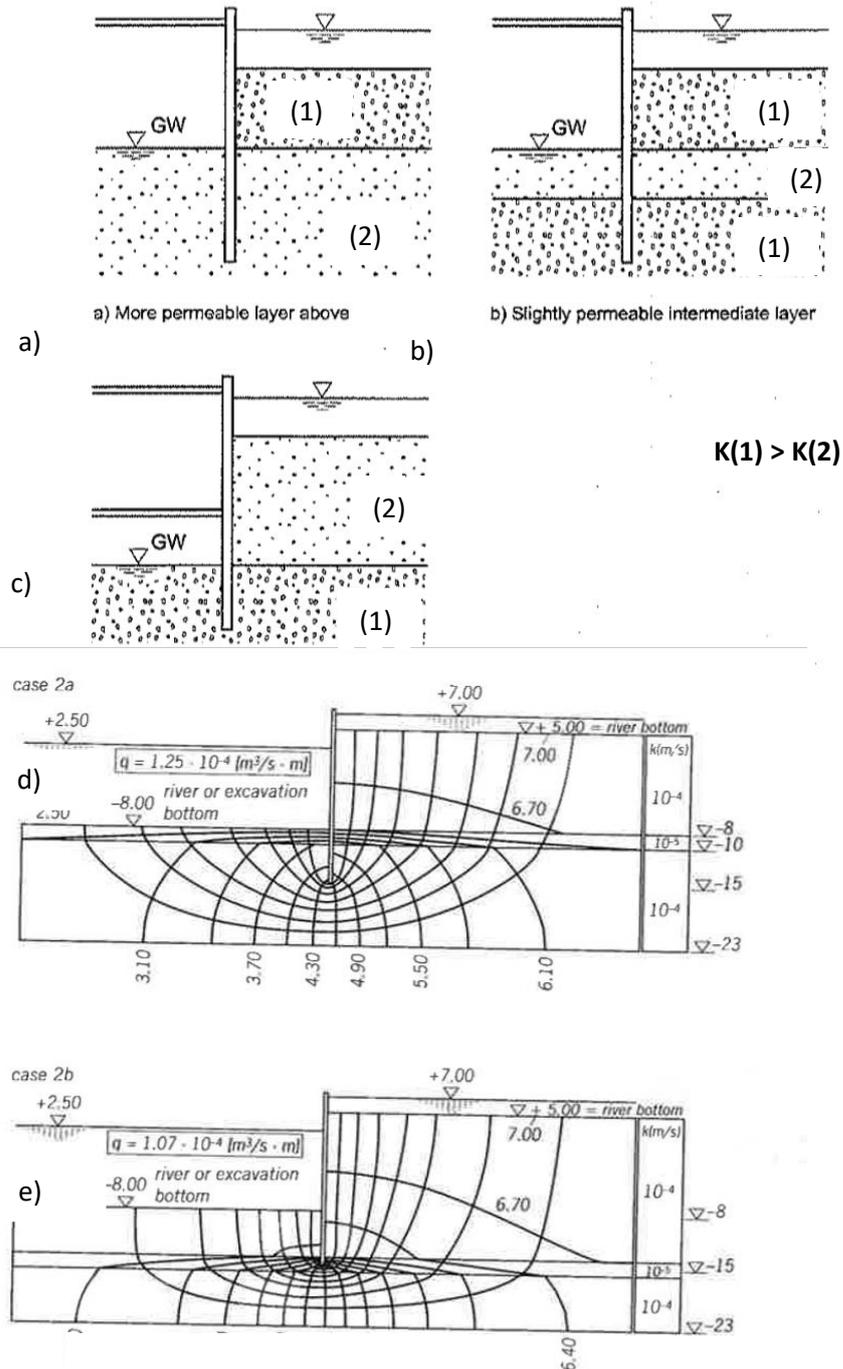


Figura 4.8

Estratos de diferente permeabilidad [Ref.11]

- d) Red de flujo con un estrato de menor permeabilidad aflorando en el fondo de la excavación
- e) Red de flujo con un estrato de menor permeabilidad en el pie de la pantalla.

En ambos casos puede apreciarse que la mayor pérdida de carga se concentra en el estrato de menor permeabilidad ($\approx 4,0$ metros sobre un total de $4,50\text{m}$ de reducción de altura piezométrica). En el primer caso se produciría un sifonamiento del terreno del fondo de la excavación ($i \approx 4,0/2,0 = 2,0 \gg 1,0$), y en el segundo caso, en torno al pie de la pantalla.

En la mitad izquierda del gráfico superior de la figura 4.9 se representan dos posibles fallos del fondo de una excavación ataluzada por debajo del Nivel Freático:

- Sifonamiento en el pie del talud por elevados gradientes en el mismo
- Levantamiento Hidráulico por Subpresión del horizonte de arcilla intercalado bajo el fondo

Estos fallos se soslayan mediante bombeo en los dos horizontes arenosos: well-point en el superior y bombeo profundo (pozo) del inferior.

En la mitad izquierda del gráfico inferior se muestra la excavación en una estratigrafía que podría llamarse complementaria de la precedente, pero cuyo peligro de colapso debido al efecto de los movimientos de filtración es sin embargo similar. Si el terreno es homogéneo (mitad derecha), la distribución de presiones intersticiales no depende de la permeabilidad del mismo. Para gradientes elevados en un terreno cohesivo, los fenómenos de colapso son diferidos en el tiempo respecto del caso de terrenos granulares.

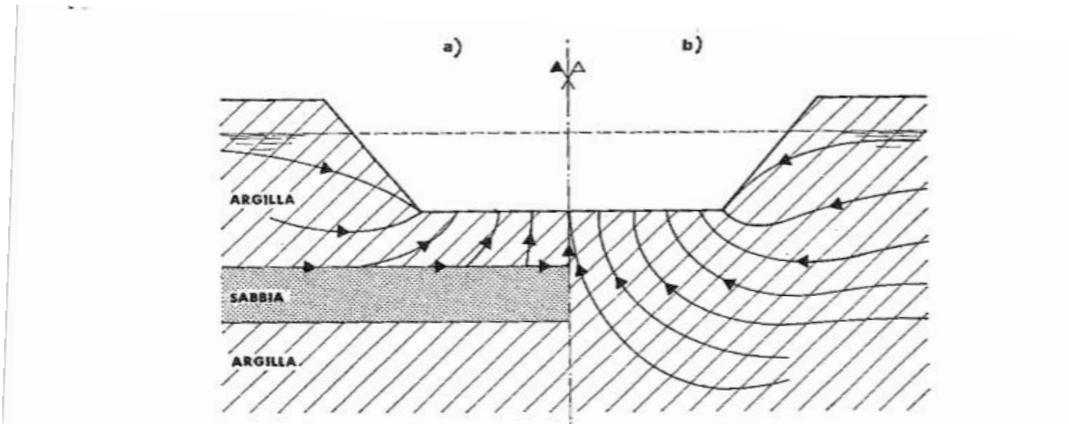
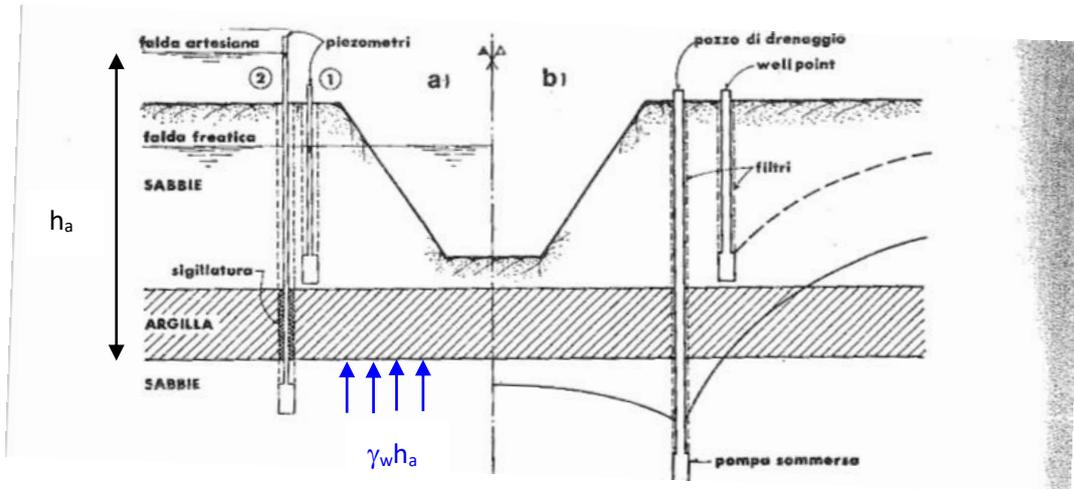
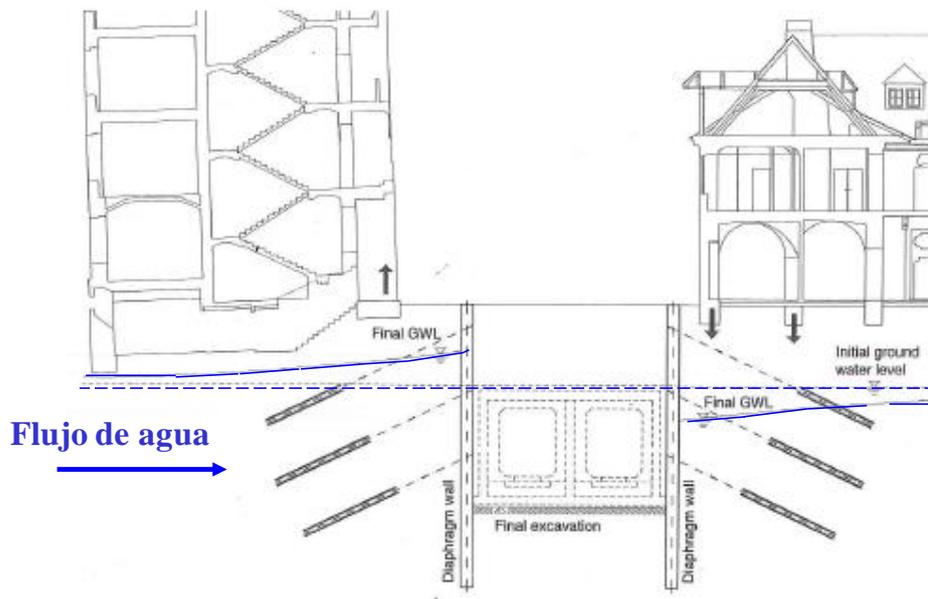


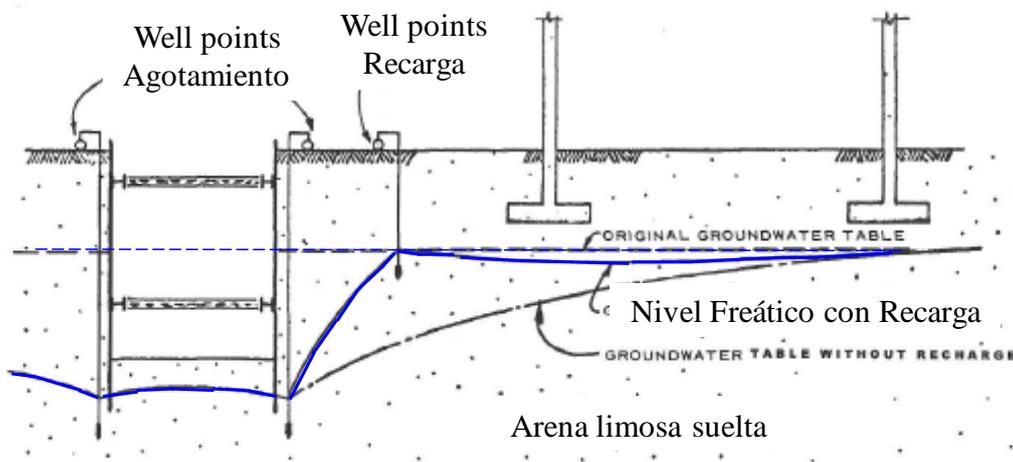
Figura 4.9

Posibles fallos del fondo de la excavación por Subpresión y Sifonamiento [Ref.8]

4.2.2. Variaciones del Nivel Freático asociadas a excavaciones



Variaciones Nivel Freático por efecto barrera



Rebajamiento NF originado por Agotamiento en una Excavación

Recarga para mantener el NF constante en el exterior de la excavación

Figura 4.8

7. Referencias

- 1) Eurocódigo 7 (1997-2010) Proyecto Geotécnico. Parte 1: Reglas Generales (UNE-ENV)
- 2) Smoltczyk et al, 2003. Geotechnical Engineering Handbook. Volume 3: Elements & Structures (Ernst & Sohn)
- 3) Ministère de L'Équipement, du Logement et des Transports, 2012. Règles Techniques de Conception et de Calcul des Fondations Superficielles et profondes. Fascicule 62 Titre V
- 4) Winterkorn & Hsai-Yang Fang, 1975. Foundation Engineering Handbook. (Van Nostrand Reinhold)
- 5) Jiménez Salas et al, 1976. Geotecnia y Cimientos III (Rueda)
- 6) Fellenius, B. 1984. Negative skin friction and settlement of piles. Proc. 2nd Intl. Geotech. Seminar, Pile Foundations, Nanyang Tech. Inst., Singapore.
- 7) H. G. Poulos et al, 2001. Foundations and retaining structures – research and practice. (15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul)
- 8) Cestelli-Guidi, Carlo, 1991. Geotecnica e Tecnica Delle Fondazione / Carlo Cestelli-Guidi (1991)
- 9) EAB, 2008. Recommendations on Excavations (Ernst & Sohn)
- 10) EAU 1996
- 11) EAU, 2004
- 12) Braja M. Das, 2011. Geotechnical Engineering Handbook (J. Ross Publishing, Inc.)
- 13) Clough, G.W. and O'Rourke, T. D.,1990. Construction induced movements of in situ walls. (Proc. Design and performance of earth retaining structure, ASCE Special conference, Ithaca, New York)
- 14) Mana, A. I. and Clough, G. W.,1981. Prediction of movements for braced cuts in clay. (J. Geotech. Engrg, ASCE, 107(6))
- 15) DIN-4150-3, 1999. Vibrations in Buildings – Part 3: Effects on Structures)
- 16) Hsieh & Ou, 1998. Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation (Canadian Geotechnical Journal 35)
- 17) R. Kastner et al, 2003. Avoiding damage caused by soil-structure interaction: lessons learnt from case histories (Thomas Telford)
- 18) Burland, J.B. & Wroth, C.P. 1974. Settlement of buildings and associated damage. Settlement of Structures, (Pentech Press, London)
- 19) Uriel Ortiz, A. 1983. Patología de las Cimentaciones (Informes de la Construcción)
- 20) Boscardin, M.D. & Cording, E.J. 1989. Building response to excavation induced settlement. (Jn. Geotech. Eng., ASCE, 115(1))
- 21) R. Lancellotta, J. Calavera, 1999. Fondazioni, (McGraw-Hill)
- 22) E. Dulácska et al, 1992. Soil Settlement Effects on Buildings, (Elsevier)
- 23) Burland, J.B, 1997. Assessment of risk of Damage to buildings due to Tunneling and Excavation. Earthquake Geotechnical Engineering (Balkema)
- 24) García López, M, Cimentaciones y Contenciones: técnicas de refuerzo y recalzo (Curso COAM)
- 25) Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS, 2012. Madrid. Recalces con Micropilotes y otras Técnicas Especiales
- 26) Guía para el Proyecto y Ejecución de Micropilotes en Obras de Carretera, 2005 (Ministerio de Fomento de España).
- 27) Jamiolkowski, M, 2001. Leaning tower of Pisa: End of an Odyssey. (15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Istanbul)

INGENIO^{xyz}

PATOLOGÍAS GEOTÉCNICAS EN EDIFICACIÓN

Fernando Rodríguez Ballesteros

www.ingenio.xyz

