

Elementos básicos para el estudio geotécnico de excavaciones superficiales en suelos blandos

Iván Rafael Berdugo De Moya*

Resumen: Se presenta un modelo de dimensionamiento conceptual de los elementos básicos que deben considerarse para abordar el estudio geotécnico de excavaciones superficiales en suelos blandos. Se sintetizan los criterios de clasificación de excavaciones y los factores que controlan su comportamiento; se identifican los efectos mecánicos de las excavaciones superficiales distinguiendo entre los relacionados con la configuración geométrica del movimiento de tierras y los relacionados con los alivios de esfuerzos y se exponen los modos de falla y los patrones típicos de movimientos de excavaciones superficiales en suelos blandos. Por último, se propone un modelo unificado de clasificación de sistemas de contención.

Abstract: A conceptual model of the basic elements associated to the geotechnical study of shallow excavations in soft soils is presented. The classification criteria and the behavior controlling factors in excavations are synthesized. The mechanic effects of shallow excavations are identified distinguishing those related to geometric configuration of earth removing and those related to stress relief. Failure modes and typical movement patrons are also exposed. Finally, a unified model intended to classify retaining systems is proposed.

1. Introducción

La baja resistencia al corte y alta compresibilidad que caracterizan a los suelos arcillosos y limosos blandos demanda que el manejo de excavaciones en ese tipo de materiales deba realizarse garantizando requisitos de seguridad excepcionalmente altos, sin duda los más rigurosos entre los exigidos a las obras civiles. Con-

* Ingeniero civil, Universidad de La Salle. Profesor Instructor, Departamento de Ingeniería Civil, Pontificia Universidad Javeriana.

secuente, la selección del proceso de construcción técnica y económicamente más conveniente para el manejo de una excavación en suelos blandos debe estar asistida por un muy buen conocimiento de los problemas de estabilidad y deformación asociados con la ejecución de este tipo de trabajos, así como por un muy claro entendimiento de los factores que controlan el comportamiento de los sistemas de contención.

2. Conceptos básicos sobre excavaciones

Las excavaciones son movimientos artificiales de tierra que contemplan el desalojo y relocalización de los materiales del subsuelo para facilitar el aprovechamiento de su espacio físico. El dimensionamiento conceptual de los problemas relacionados con las excavaciones puede abordarse, por un lado, estableciendo criterios funcionales para clasificarlas, y por otro lado, identificando los factores que controlan su comportamiento. La revisión de la literatura asociada con el tema revela la existencia de muchos sistemas de clasificación de excavaciones. Cuando se hace el ejercicio de organizarlos en función del criterio de clasificación, es posible obtener una síntesis como la indicada a continuación:

a. Clasificación según el tipo de movimiento de tierra:

- Excavaciones superficiales.
- Excavaciones subterráneas.

b. Clasificación según la duración:

- Excavaciones temporales.
- Excavaciones permanentes.

c. Clasificación según el manejo del corte:

- Excavaciones no soportadas.
- Excavaciones soportadas.

d. Clasificación según el propósito:

- Excavaciones para adecuación de terrenos.
- Excavaciones para explotación de materiales.
- Excavaciones para obras puntuales.
- Excavaciones para obras lineales.

En cuanto a los factores que controlan el comportamiento de las excavaciones superficiales, el ejercicio de distinguir entre factores geotécnicos y factores estructurales arroja el siguiente resultado:

a. Factores geotécnicos:

- Tipo de suelo.
- Condiciones del agua subterránea.
- Estado inicial e historia de esfuerzos.
- Dimensiones de la excavación.

b. Factores estructurales:

- Tipo y magnitud de las cargas impuestas.
- Tipo de sistema de contención.
- Rigidez del sistema de contención.
- Características del proceso de construcción.

3. Efectos mecánicos de las excavaciones

Cuando a una masa de suelo se le imponen acciones ocasionadas por procesos de carga o descarga, responde con reacciones provenientes de la redistribución de esfuerzos y deformaciones de su estructura. Siguiendo este razonamiento, las excavaciones corresponden a procesos de descarga en donde las acciones impuestas a la masa de suelo están controladas por la configuración geométrica del movimiento de tierras y la magnitud del alivio de esfuerzos; y las reacciones, por la variación en las condiciones de drenaje y los cambios en los esfuerzos efectivos. De esta manera los efectos mecánicos de las excavaciones se pueden conceptualizar estableciendo relaciones de causalidad entre las acciones y las reacciones, como las propuestas a continuación.

3.1. Efecto de la configuración geométrica del movimiento de tierras

El cambio en la geometría del terreno causado por una excavación genera incrementos en los gradientes gravitatorios debido a la disminución en la cota de interfase entre la atmósfera y el terreno. [González, 1993, 1998] Consecuentemente, el suelo manifiesta tres tipos de reacciones:

- a. Incremento de los gradientes hidráulicos y abatimiento de los niveles piezométricos en el perímetro y en el fondo de la excavación generando flujo hacia ésta y asentamientos en su perímetro. [Berdugo, 1997; González, 1993, 1998]

- b. Desestabilización y convergencia de los taludes de la excavación por movilización parcial de la resistencia al corte del suelo localizado en su perímetro. [Amador y Cárdenas, 1997]
- c. Desestabilización del fondo de la excavación por plastificación del suelo localizado por debajo de ésta. [Amador y Cárdenas, 1997]

Las consecuencias de estos fenómenos pueden adquirir dimensiones dramáticas cuando las excavaciones permanecen abiertas durante mucho tiempo o cuando son de carácter permanente, como es el caso de excavaciones para canales y otros tipos de obras lineales.

3.2. Efecto del alivio de esfuerzos

El alivio de esfuerzos ocasionado por una excavación está compuesto por la descarga del peso sumergido de los sólidos y la disminución de la presión de poros. [Zeevaert, 1983] Consecuentemente, el suelo manifiesta cuatro tipos de reacciones:

- a. Disminución de las fuerzas de cuerpo gravitacionales unitarias. [Berdugo, 1997]
- b. Decremento en los esfuerzos efectivos. [Berdugo, 1997]
- c. Expansión inmediata cuasielástica. [Amador y Cárdenas, 1997; Berdugo, 1997]
- d. Expansión retardada elasto-plasto-viscosa. [González, 1993, 1998; Amador y Cárdenas, 1997]

El más interesante y complejo de estos fenómenos es sin duda la expansión retardada. Corresponde a un proceso análogo al de consolidación pero controlado en el tiempo no por el coeficiente de consolidación, C_v , sino por el coeficiente de expansión, C_e . Como C_e es mayor que C_v , el proceso de expansión sobreviene más rápidamente que el de consolidación. [González, 1993, 1998] Las expansiones retardadas adquieren mucha importancia cuando las excavaciones permanecen abiertas durante mucho tiempo, cuando éstas son de carácter permanente, o en el peor de los casos, cuando las estructuras construidas dentro de ellas quedan sobrecompensadas.

4. Estabilidad y deformación de excavaciones

Un cuidadoso análisis de los efectos mecánicos de las excavaciones revela que éstos no son fenómenos mutuamente excluyentes; de hecho, evolucionan en el

tiempo como consecuencia de su interacción. Las reacciones de una masa de suelo son en realidad manifestaciones muy complejas de las propiedades esfuerzo-deformación-tiempo-resistencia de los materiales que la integran. Muy a pesar de esto, un recorrido por la literatura relacionada con el análisis y diseño de excavaciones en suelos blandos permite concluir que resulta útil organizar los efectos mecánicos de las excavaciones en términos de problemas de estabilidad y problemas de deformación. De esta manera es posible identificar modos potenciales de falla y patrones típicos de movimiento, cada uno de ellos con comportamientos relativamente definidos y para los cuales han sido desarrollados métodos específicos de análisis. Con estas simplificaciones las reacciones de la masa de suelo se modelan como esfuerzos efectivos movilizados y el análisis geotécnico se simplifica al compararlos con los niveles de esfuerzos disponibles. En el caso de los problemas de estabilidad, los esfuerzos efectivos movilizados se comparan contra la envolvente de resistencia y en el caso de los problemas de deformación, contra la envolvente de fluencia. [Berdugo, 1997]

4.1. Problemas de estabilidad

Los problemas de estabilidad están relacionados con la movilización parcial o total de la resistencia al corte del suelo, que en el caso de excavaciones en suelos blandos puede ocasionar tres modos de falla:

- a) Falla de taludes: Los taludes de una excavación no soportada pueden alcanzar una altura crítica que depende, en algunas ocasiones, de la manera como la geometría de la excavación interactúa con la resistencia al corte del suelo localizado en su perímetro. [Taylor, 1937; Terzaghi, 1943; Terzaghi, Peck y Mesri, 1996] La aproximación más conservadora del valor de la altura crítica de una excavación en suelos blandos tiene la forma:

$$(1) \quad H_c = \frac{C_u N_s}{\gamma}$$

Donde:

H_c : Altura crítica de la excavación [L]

C_u : Resistencia al corte no drenada del suelo [FL⁻²]

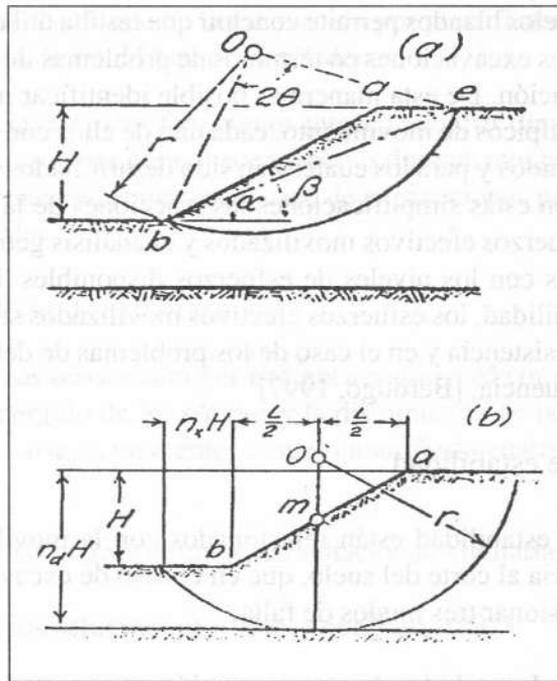
N_s : Coeficiente de estabilidad

γ : Peso unitario del suelo [FL⁻³]

El coeficiente de estabilidad, N_s , es un parámetro adimensional que depende de la inclinación del talud, b , y de un parámetro denominado factor de profundi-

dad, n_d , que expresa la relación entre la altura del talud y la profundidad a la cual se presenta un estrato firme. (Figura 1)

Figura 1. Falla de taludes



Fuente: [Terzaghi, Peck y Mesri, 1996].

- b) Falla de base: Este modo de falla se produce en excavaciones soportadas cuando el suelo del fondo no es lo suficientemente resistente como para soportar los esfuerzos impuestos por el material localizado en su perímetro. Cuando ocurre, el suelo del fondo es forzado a desplazarse dentro de la excavación causando grandes movimientos de la masa de suelo adyacente. Este modo de falla fue estudiado por Terzaghi [1943], Bjerrum y Eide [1956] y Jambu [1956], quienes llegaron a proponer un criterio de evaluación de las condiciones de seguridad de las excavaciones dado por la ecuación:

$$(2) \quad F_s = \frac{C_u N_{cb}}{\gamma H + q}$$

Donde

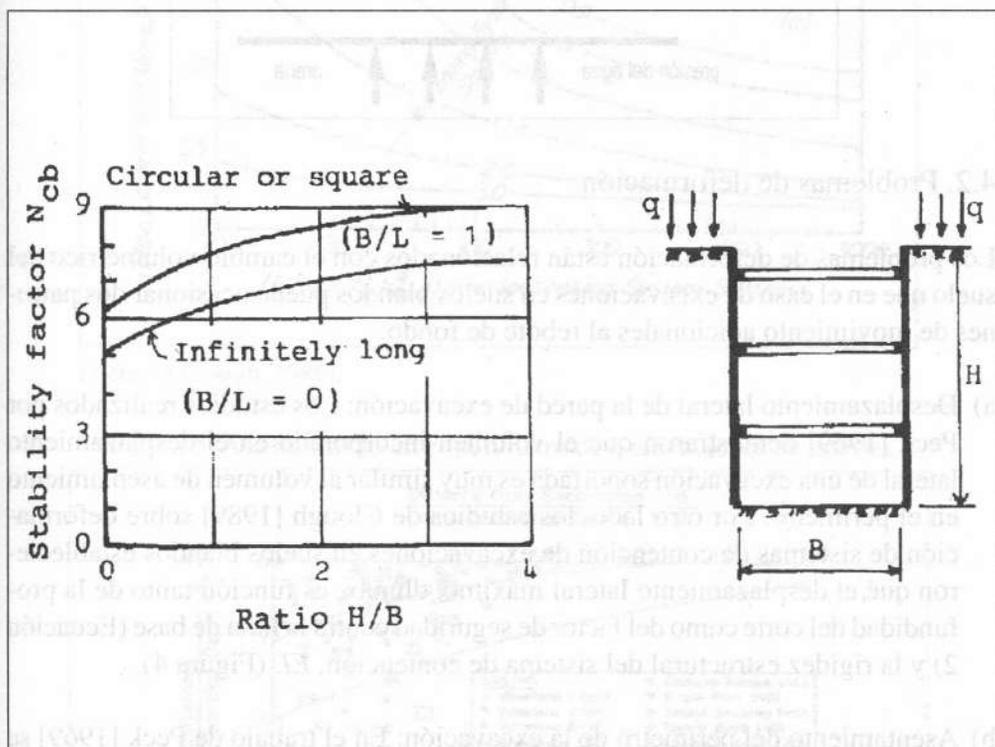
F_s : Factor de seguridad

C_u : Resistencia al corte no drenada del suelo [FL^{-2}]

- N_{cb} : Factor de estabilidad
 γ : Peso unitario del suelo [FL^{-3}]
 H : Profundidad de la excavación [L]
 q : Sobrecarga perimetral [FL^{-2}]

El factor de estabilidad N_{cb} es un parámetro adimensional que depende del factor de forma, B/L , y la relación de profundidad, H/B , de la excavación. (Figura 2)

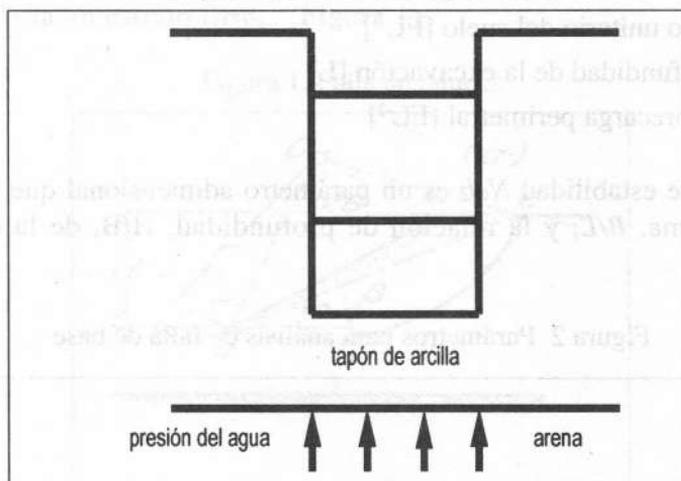
Figura 2. Parámetros para análisis de falla de base



Fuente: [Terzaghi, Peck y Mesri, 1996].

- c) Falla por subpresión: Este modo de falla se produce en excavaciones soportadas y no soportadas como consecuencia de las presiones de poros en las capas de suelo localizadas por debajo del fondo de la excavación. Es muy frecuente cuando existen acuíferos de materiales granulares en el subsuelo y los empujes del agua vencen la resistencia al corte y el peso del tapón de arcilla localizado entre ellos y el fondo de la excavación. (Figura 3)

Figura 3. Falla por subpresión

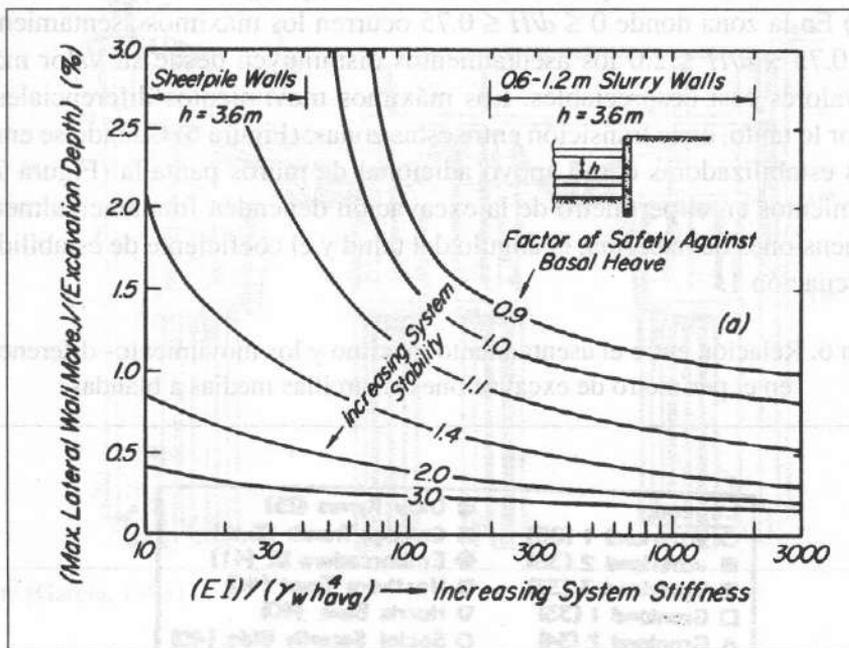


4.2. Problemas de deformación

Los problemas de deformación están relacionados con el cambio volumétrico del suelo que en el caso de excavaciones en suelos blandos puede ocasionar dos patrones de movimiento adicionales al rebote de fondo:

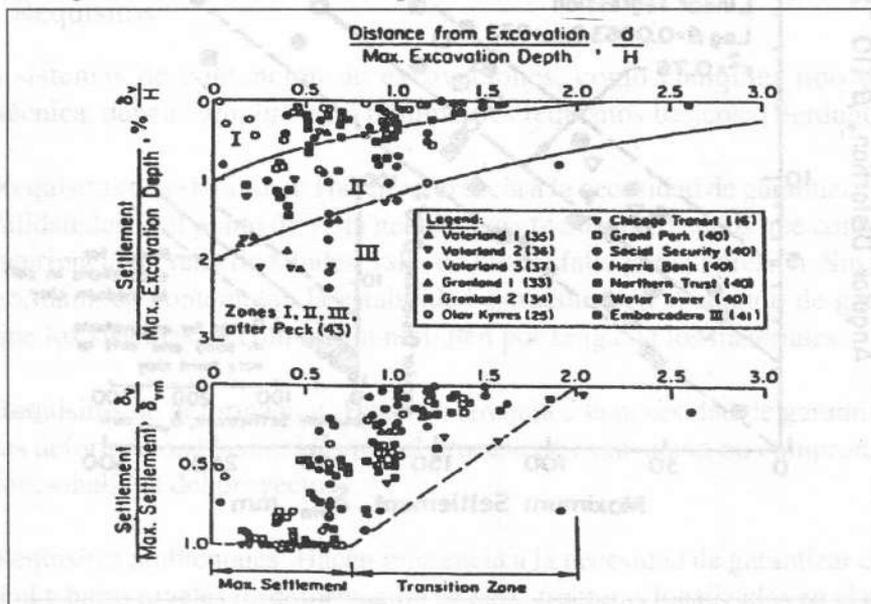
- a) Desplazamiento lateral de la pared de excavación: Los estudios realizados por Peck [1969] demostraron que el volumen incorporado en el desplazamiento lateral de una excavación soportada es muy similar al volumen de asentamiento en el perímetro. Por otro lado, los estudios de Clough [1989] sobre deformación de sistemas de contención de excavaciones en suelos blandos establecieron que el desplazamiento lateral máximo, $d_{h\text{máx}}$, es función tanto de la profundidad del corte como del factor de seguridad contra la falla de base (Ecuación 2) y la rigidez estructural del sistema de contención, EI . (Figura 4)
- b) Asentamiento del perímetro de la excavación: En el trabajo de Peck [1969] se hace claridad sobre los asentamientos en el perímetro de las excavaciones y su relación con la distancia a borde de la misma. Normalizando los asentamientos contra la profundidad de excavación, este autor definió tres categorías de comportamiento. La categoría I corresponde a materiales arenosos, arcillas firmes y arcillas blandas de poco espesor que presentan movimientos muy bajos, usualmente del orden de 1% de la profundidad de excavación. Los suelos de las categorías II y III corresponden a arcillas blandas de gran espesor en las cuales la estabilidad del fondo de la excavación es un factor determinante de la magnitud de los movimientos y donde éstos alcanzan valores entre 2% y 3%. (Figura 5)

Figura 4. Relación entre el desplazamiento lateral del sistema de contención, la rigidez estructural y el factor de seguridad contra falla de base en excavaciones en suelos blandos



Fuente: [Clough, 1989].

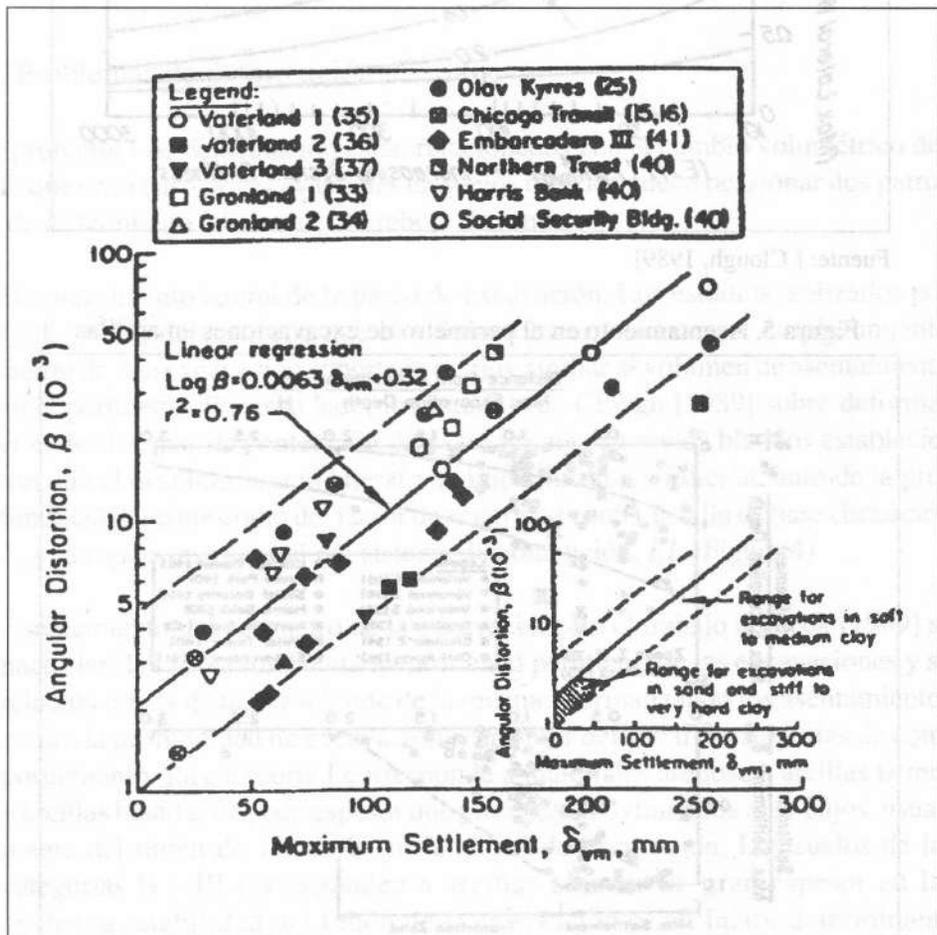
Figura 5. Asentamiento en el perímetro de excavaciones en arcillas



Fuente: [Clough y O'Rourke, 1990].

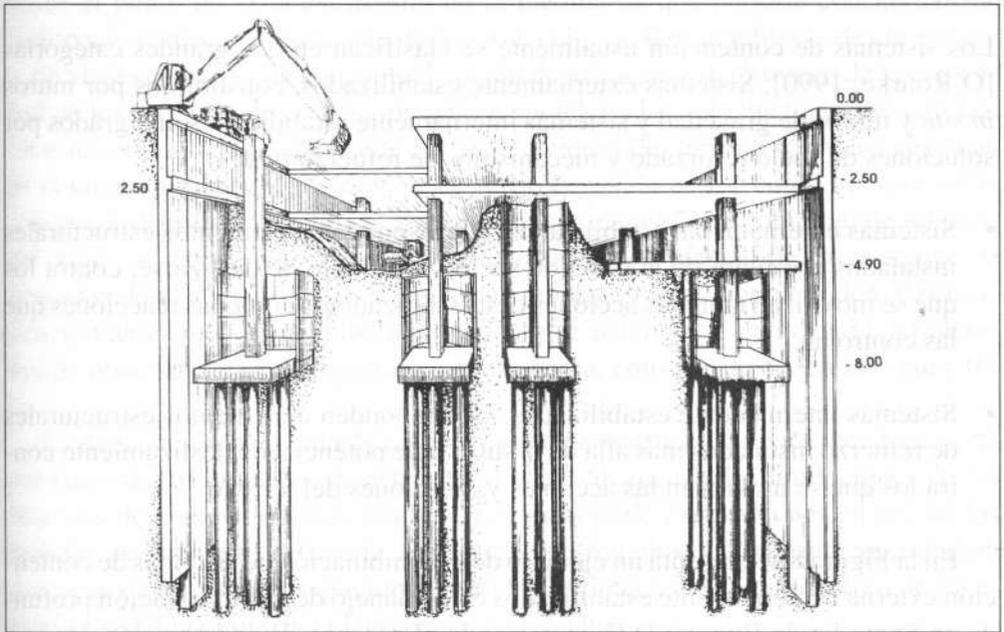
Cuando los asentamientos se normalizan contra el valor máximo registrado en el perímetro, los datos se agrupan de una forma bien definida con una envolvente trapezoidal en la cual se pueden identificar dos patrones de movimiento. (Figura 5) En la zona donde $0 \leq d/H \leq 0.75$ ocurren los máximos asentamientos; y donde $0.75 \leq d/H \leq 2.0$ los asentamientos disminuyen desde su valor máximo hasta valores casi despreciables. Los máximos movimientos diferenciales ocurren, por lo tanto, en la transición entre estas zonas. (Figura 6) Cuando se emplean bermas estabilizadoras como apoyo adicional de muros pantalla (Figura 7), los asentamientos en el perímetro de la excavación dependen fundamentalmente de las dimensiones de la berma, el ángulo del talud y el coeficiente de estabilidad N_s de la Ecuación 1.

Figura 6. Relación entre el asentamiento máximo y los movimientos diferenciales en el perímetro de excavaciones en arcillas medias a blandas



Fuente: [Clough y O'Rourke, 1990].

Figura 7. Muro pantalla con bermas estabilizadoras



Fuente:[García, 1995].

5. Sistemas de contención de excavaciones

5.1. Requisitos

Los sistemas de contención de excavaciones, como cualquier tipo de obra geotécnica, deben cumplir como mínimo tres requisitos básicos: [Berdugo 1997]

1. Requisitos de estabilidad: Hacen referencia a la necesidad de garantizar la estabilidad desde el punto de vista geotécnico efectuando diseños que controlen la ocurrencia de falla de taludes, falla de base y falla por subpresión. Sin embargo, también contemplan la estabilidad estructural en el sentido de garantizar que los sistemas de contención no fallen por fatiga de los materiales.
2. Requisitos de deformación: Hacen referencia a la necesidad de garantizar que las deformaciones inducidas por el proceso de excavación no comprometan la funcionalidad del proyecto.
3. Requisitos ambientales: Hacen referencia a la necesidad de garantizar estabilidad y bajos niveles de deformación en las estructuras localizadas en el perímetro de la excavación.

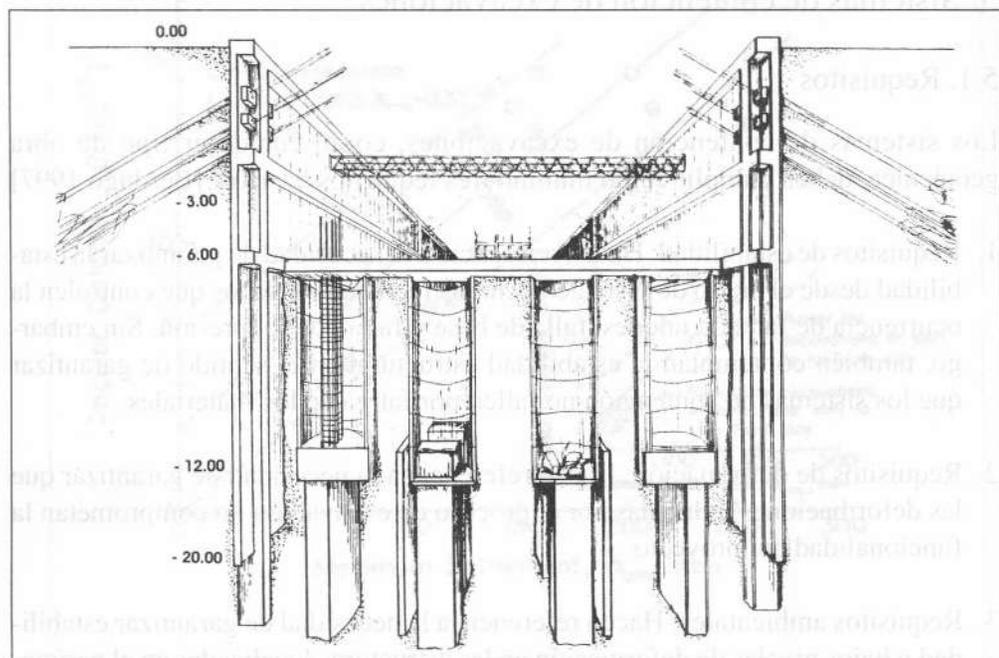
5.2. Criterios de clasificación

Los sistemas de contención usualmente se clasifican en dos grandes categorías [O'Rourke, 1990]: Sistemas externamente estabilizados, constituidos por muros *in situ* y muros de gravedad y sistemas internamente estabilizados, integrados por soluciones de suelo reforzado y mecanismos de refuerzo *in situ*.

- Sistemas externamente estabilizados: Corresponden a elementos estructurales instalados por fuera de la masa de suelo susceptible de deslizarse, contra los que se movilizan tanto las acciones desestabilizadoras como las reacciones que las controlan.
- Sistemas internamente estabilizados: Corresponden a elementos estructurales de refuerzo instalados más allá de la superficie potencial de deslizamiento contra los que se movilizan las acciones y reacciones del terreno.

En la Figura 8 se presenta un ejemplo de la combinación de sistemas de contención externa e internamente estabilizados en el manejo de una excavación profunda en Santa Fe de Bogotá, D.C., empleando el proceso de construcción *Up and Down*.

Figura 8. Excavación para la construcción del proyecto TELEPORT



Fuente: [García, 1995].

Este modelo de clasificación de sistemas de contención es bastante consistente desde el punto de vista estructural en la medida en que permite conceptualizar fácilmente el mecanismo básico de soporte. (Figura 9) Sin embargo, desde el punto de vista geotécnico la conceptualización debe hacerse en términos de la capacidad de los sistemas de contención para responder a las sollicitaciones del terreno. En este sentido resulta claro que las sollicitaciones del terreno sobre los sistemas de contención pueden provenir tanto de procesos de carga, como los asociados con la construcción de rellenos compactados y manejo de estabilidad de taludes, así como de procesos de descarga, relacionados con manejo de excavaciones o dragados. Por esta razón, resulta más conveniente reorganizar el modelo de clasificación antes mencionado distinguiendo entre sistemas de contención para control de procesos de carga y procesos de descarga, como se ilustra en la Figura 10.

La descripción detallada de los procesos de construcción de excavaciones está por fuera de los objetivos de este artículo. Los alcances y las limitaciones de los sistemas de contención más usados en el manejo de excavaciones en los suelos blandos de Santa Fe de Bogotá, D.C., han sido tratados con bastante amplitud en una serie de documentos que reposan en la Biblioteca del Departamento de Ingeniería Civil de la Pontificia Universidad Javeriana.

Figura 9. Clasificación de sistemas de contención.
Enfoque estructural - Mecanismo de soporte

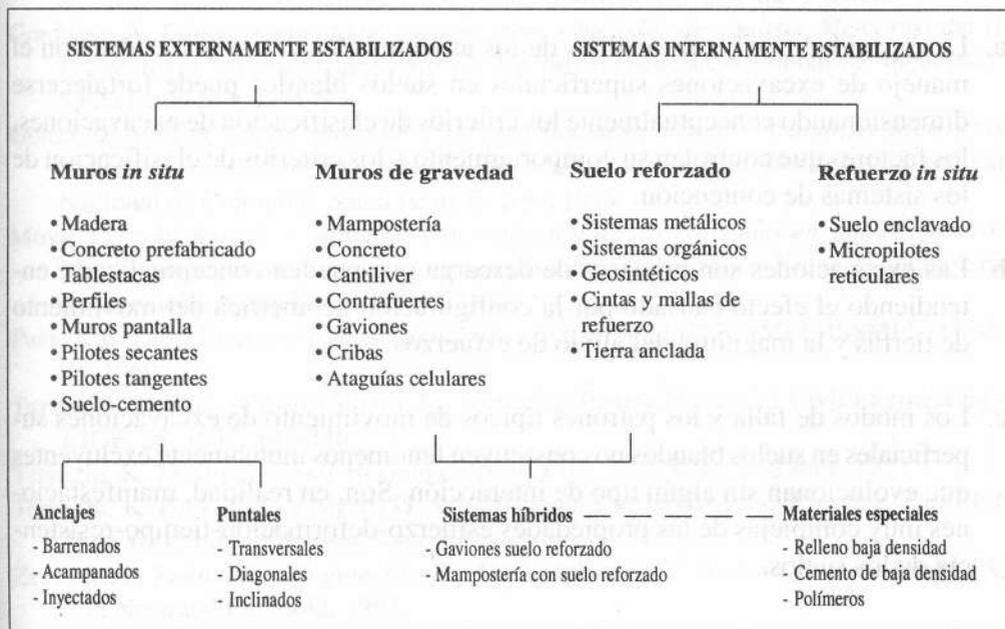
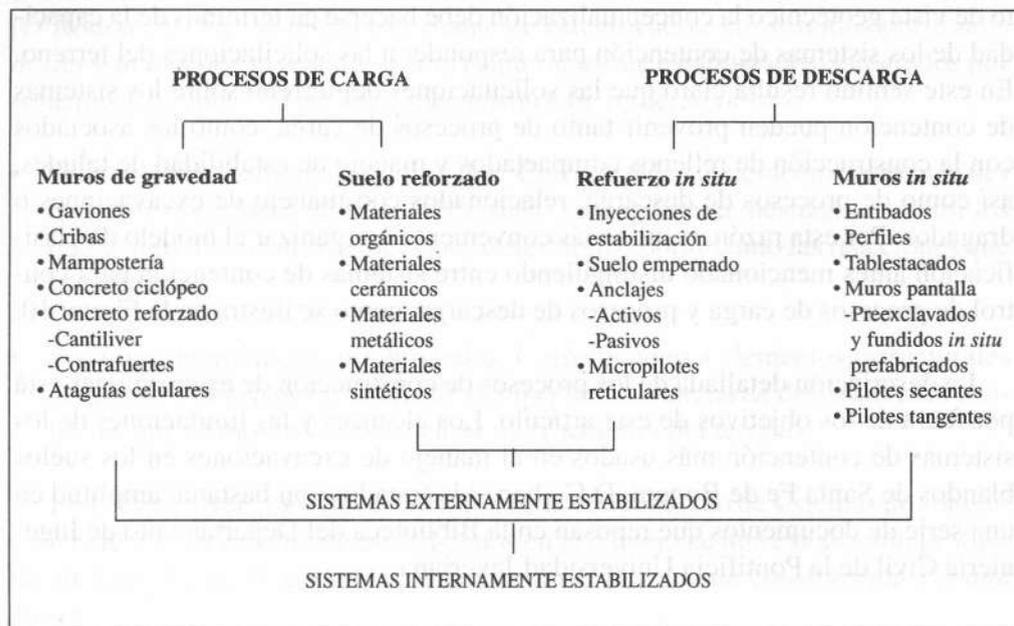


Figura 10. Clasificación de sistemas de contención
Enfoque geotécnico - Aplicabilidad de acuerdo con el tipo de sollicitación del terreno



6. Conclusiones

- La capacidad masiva de análisis de los aspectos técnicos relacionados con el manejo de excavaciones superficiales en suelos blandos puede fortalecerse dimensionando conceptualmente los criterios de clasificación de excavaciones, los factores que controlan su comportamiento y los criterios de clasificación de los sistemas de contención.
- Las excavaciones son procesos de descarga que pueden conceptualizarse entendiendo el efecto causado por la configuración geométrica del movimiento de tierras y la magnitud del alivio de esfuerzos.
- Los modos de falla y los patrones típicos de movimiento de excavaciones superficiales en suelos blandos no constituyen fenómenos mutuamente excluyentes que evolucionan sin algún tipo de interacción. Son, en realidad, manifestaciones muy complejas de las propiedades esfuerzo-deformación-tiempo-resistencia de los suelos.
- El enfoque estructural de clasificación de sistemas de contención es bastante consistente en la medida en que permite conceptualizar fácilmente el mecanis-

mo básico de soporte. Sin embargo, no distingue entre los sistemas de contención aplicables a procesos de carga y los aplicables a procesos de descarga. El modelo unificado de clasificación de sistemas de contención propuesto en este artículo establece relaciones funcionales entre el tipo de sollicitación del terreno y el mecanismo de soporte más conveniente.

Referencias

- Amador, A. y Cárdenas, L. *Estabilidad y deformación de excavaciones soportadas en los suelos blandos del ambiente geotécnico de Santa Fe de Bogotá, D.C.* Parte I - Estudio de casos. Trabajo de grado de la Pontificia Universidad Javeriana. 1997.
- Berdugo, I. *Construcción e instrumentación de excavaciones en los suelos blandos del ambiente geotécnico de Santa Fe de Bogotá, D.C., Memorias de la III Conferencia Latinoamericana de Ingenieros Geotécnicos.* Sociedad Venezolana de Geotecnia. Caracas, 1997.
- Clough, G.W. y Schmidt, B. *Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft Clay.* Soft Clay Engineering. Amsterdam: Elsevier, 1981.
- Clough, G.W. *Movement Control of Excavation Support Systems by Iterative Design.* Conference of Foundation Engineering. Evanston: ASCE, 1989.
- Clough, G.W. y O'Rourke, T. D. *Construction Induced Movements of In Situ Walls. Design and Performance of Retaining Structures.* New York: ASCE, 1990.
- García, A. *Seguimiento de algunos sistemas constructivos para la ejecución de multisótanos en suelos blandos.* Trabajo de grado de la Pontificia Universidad Javeriana. 1995.
- González, A. *Comportamiento de excavaciones y métodos de análisis. Memorias del II Encuentro de Ingenieros de Suelos y Estructuras.* Escuela Colombiana de Ingeniería. Santa Fe de Bogotá, 1993.
- González, A. *Comportamiento general de excavaciones y métodos de análisis. Memorias del curso de excavaciones superficiales y túneles en suelos blandos.* Universidad Nacional de Colombia. Santa Fe de Bogotá, 1998.
- Moya, J. *Problemas de estabilidad y deformación de excavaciones en suelos blandos. Memorias del curso de excavaciones en condiciones complejas.* Escuela Colombiana de Ingeniería. Santa Fe de Bogotá, 1997.
- Peck, R.B. *Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground.* 7th ICSMFE-ISSMFE. México, 1969.
- Taylor, D. *Stability of Earth Slopes.* In: Journal of Boston Society of Civil Engineering - EJGE, 24, 1937, 197-246.
- Terzaghi, K. *Theoretical Soil Mechanics.* New York: John Wiley and sons, 1943.
- Terzaghi, K, Peck, R.B. y Mesri, G. *Soil Mechanics in Engineering Practice. Third Ed.* New York: John Wiley and sons, 1996.
- Zeevaert, L. *Foundation Engineering for Difficult Subsoil Conditions. 2nd Ed.* New York: Van Nostrand Reinhold, 1983.