

IV ENCUENTRO DE INGENIEROS DE SUELOS Y ESTRUCTURAS

COMPORTAMIENTO DE EDIFICACIONES SOBRE TALUDES

JAIME SUÁREZ DÍAZ

Profesor Universidad Industrial de Santander jaimesuarez@intercable.net.co

Resumen

Se presentan algunos de los problemas que un ingeniero de estructuras debe analizar para la toma de decisiones en las construcciones sobre taludes. Entre los problemas identificados se encuentran los problemas de estabilidad de taludes y el efecto de las cargas de cimientos superficiales y de cimientos profundos sobre la estabilidad de un talud; Los efectos de los esfuerzos de tensión que se generan en el suelo cerca de la corona de los taludes y la posibilidad de agrietamientos de la estructura; La capacidad de soporte de edificaciones sobre taludes y la variación del módulo de reacción del suelo al acercarse la cimentación a la superficie del talud. Como ejemplo se presentan los problemas en el barrio Campoalegre en Barranquilla, en el cual se han presentado problemas de agrietamiento y falla total de construcciones sobre taludes de arcillas marinas, duras sensitivas, las cuales aparentemente son muy competentes pero que pierden su resistencia por la alteración causada por el proceso de urbanización y/o por los procesos de humedecimiento y secado. (Este era el problema que estaba manejando el Ingeniero Aquiles Arrieta cuando le sobrevino la muerte).

Se presentan además algunas de las normas establecidas en Bucaramanga para el manejo de construcciones sobre taludes o laderas.

Introducción

La ingeniería de fundaciones se ha concentrado principalmente en el análisis y diseño de cimentaciones para edificaciones en áreas planas y es muy escasa la investigación sobre el comportamiento y diseño de cimentaciones cerca o sobre taludes. La diferencia fundamental de un cimiento en terreno plano y uno sobre un talud o ladera es la falta de confinamiento lateral para el suelo de fundación en el caso de un talud. Esta falta de confinamiento puede generar los siguientes problemas:

- ☐ Aparición de esfuerzos de tensión en el suelo de cimentación y la posibilidad de agrietamiento del suelo, la cimentación, la mampostería y la estructura.
- ☐ La disminución de la capacidad de soporte del suelo de cimentación debida a la presencia del talud.
- ☐ La variación de los módulos de reacción del suelo a medida que la cimentación se acerca al talud, lo cual puede inducir asentamientos diferenciales.
- ☐ La falla de los taludes al cortante, la cual se evalúa mediante sistemas de equilibrio límite.

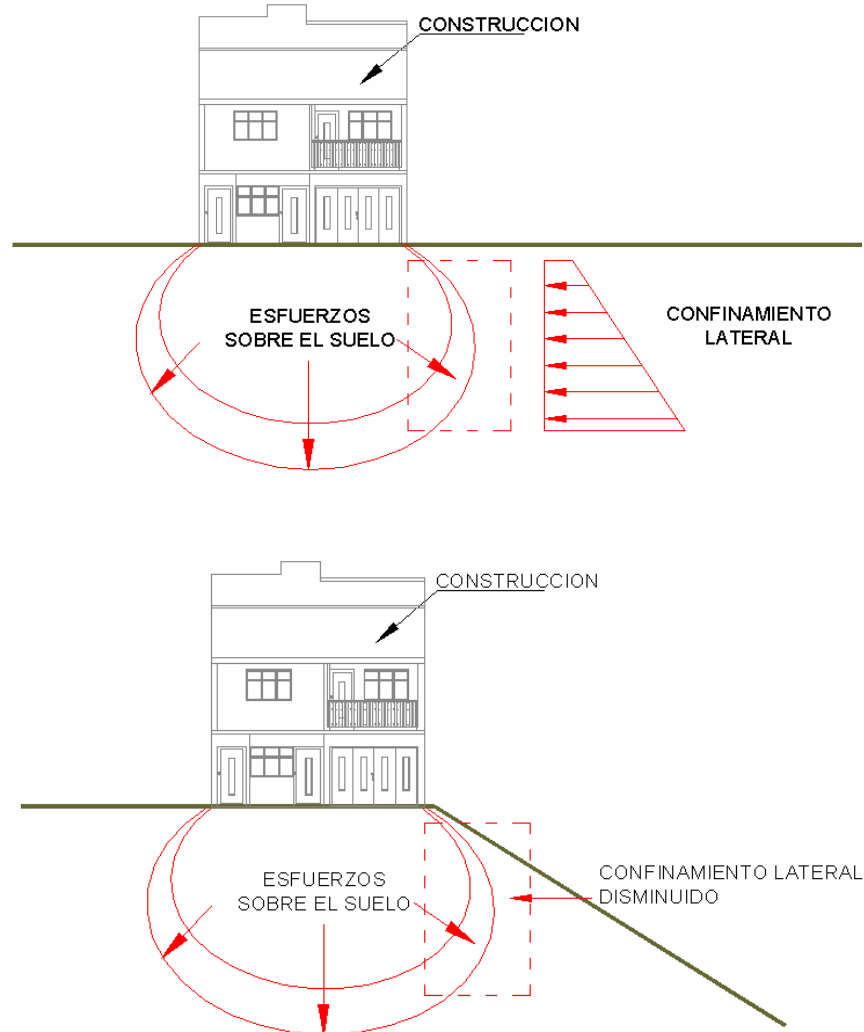


Figura 1. Falta de confinamiento lateral en un talud en comparación con una construcción en terreno semi-plano

Los esfuerzos de tensión en el suelo cerca a los taludes

La falta de confinamiento lateral puede inducir esfuerzos de tensión en el suelo. Existen teorías comprobadas en modelos de laboratorio y en el campo que permiten determinar la localización y características de estas grietas de tensión.

Las grietas de tensión se forman en la corona de taludes en suelos cohesivos debido a la baja resistencia del suelo a los esfuerzos de tensión (Abramson y otros, 2002).

La profundidad de las grietas de tensión puede obtenerse teóricamente por medio de la ecuación:

$$Z_c = \frac{2c}{\gamma} \tan^2 \left(45 + \frac{1}{2} \phi \right)$$

Donde:

Z_c = profundidad de la grieta de tensión

c = cohesión

ϕ = ángulo de fricción

γ = peso unitario del suelo

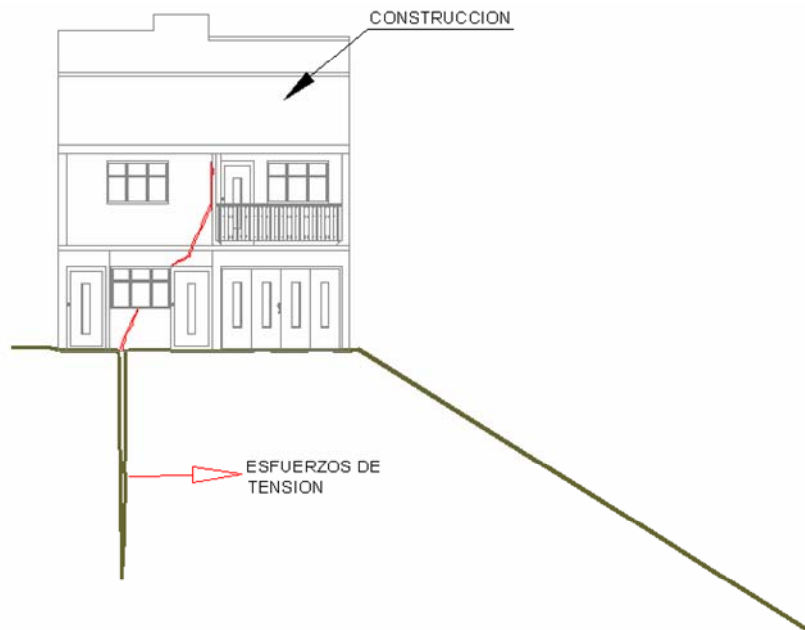


Figura 2. Ocurrencia de agrietamientos relacionados con los esfuerzos de tensión cerca a la corona de un talud.

Estas grietas se forman a corto plazo después de la realización de cortes en los taludes y su profundidad trata de aumentar con el tiempo. Igualmente en materiales estructurados como suelos residuales o rocas blandas, la debilidad de las fracturas permite la formación de grietas de tensión.

Comúnmente estas grietas de tensión se traducen en grietas en el piso de las construcciones y ocasionalmente en fisuras o grietas en las vigas de amarre de la cimentación y en los elementos de mampostería.

En el período de diseño estas grietas de tensión generalmente no son tenidas en cuenta como parámetro, pero una vez aparecen las grietas o fisuras en las construcciones existen pocas maneras de resolver el problema.

Es muy común en el medio colombiano la presencia de estas grietas, las cuales son un problema importante post-venta en los programas de vivienda.

Las grietas de tensión pueden terminar en un problema de estabilidad general del talud y en ocasiones en el colapso o falla de elementos estructurales.

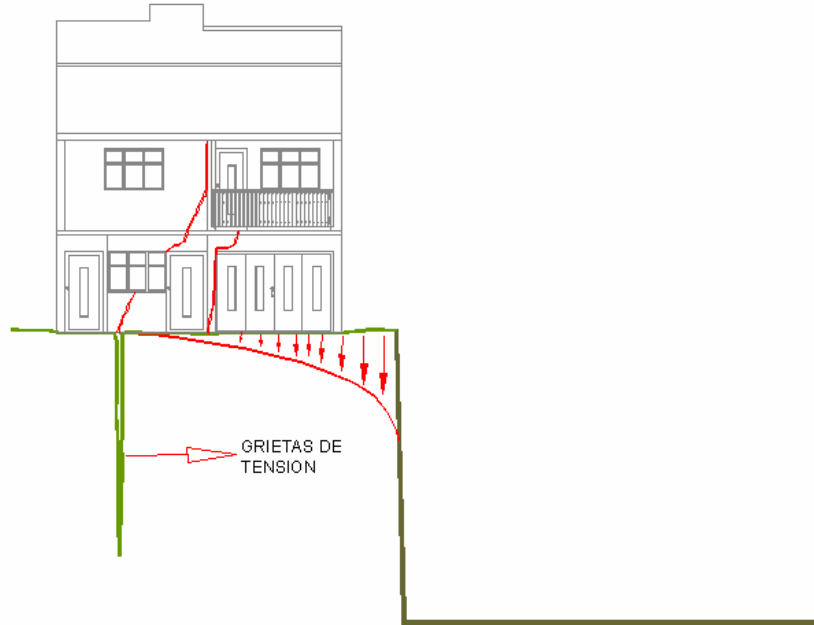


Figura 3. Agrietamientos en la corona de excavaciones.

La capacidad de soporte de cimientos sobre taludes

La capacidad de soporte del suelo cerca o sobre taludes es inferior a la capacidad de soporte de mismo suelo en topografía semi-plana.

La capacidad de soporte sobre taludes se puede calcular mediante la expresión (Meyerhof, 1957).

$$q = cN_{cq} + \frac{1}{2} \gamma B N_{\gamma q}$$

Donde:

N_{cq} y $N_{\gamma q}$ son los factores de capacidad de soporte, los cuales se pueden obtener de acuerdo a la figura No. 4.

Generalmente en Colombia la práctica de la ingeniería no diferencia la capacidad de soporte en terreno plano o sobre taludes y es común que se utilice en taludes las mismas expresiones para calcular capacidad de soporte utilizadas en terreno plano.

Esta interpretación equivocada de las teorías de la capacidad de soporte ha traído en ocasiones problemas de estabilidad, especialmente de cimientos o zapatas aisladas apoyadas cerca de la corona o sobre taludes.

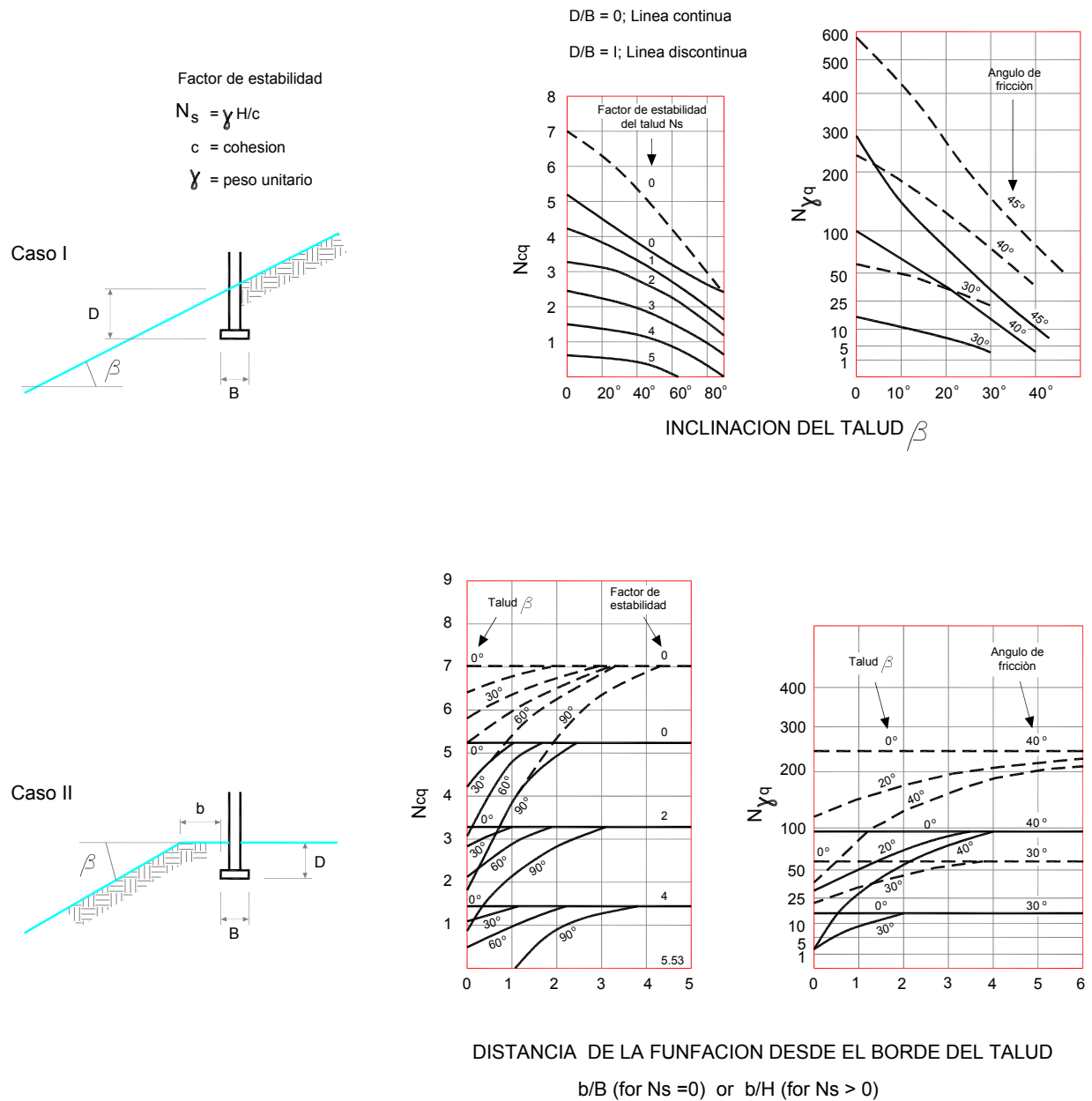


Figura 4. Cálculo de factores para la capacidad de soporte sobre taludes.

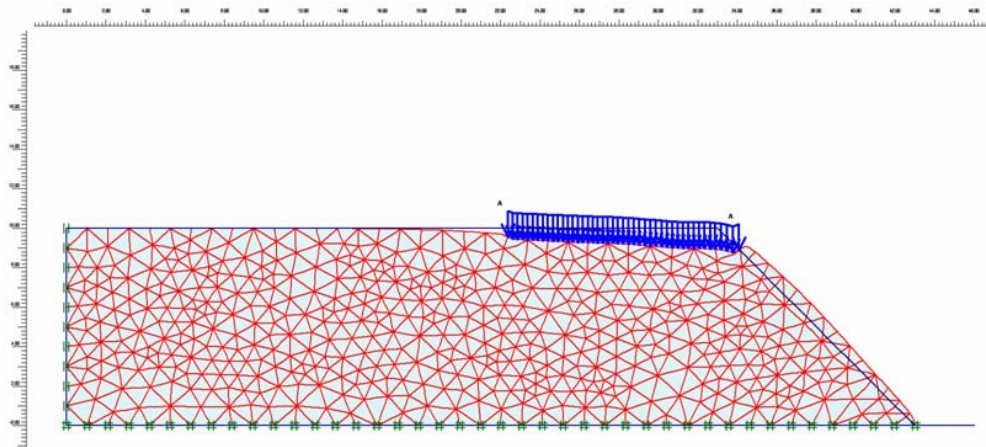


Figura 5. Deformaciones relacionadas con la variación del módulo de reacción cerca a la corona de los taludes.

Módulo de reacción del suelo en taludes

El módulo de reacción del suelo es una constante matemática que muestra la “rigidez” del suelo de fundación. Este parámetro del suelo se utiliza para el diseño de cimientos sobre suelos de comportamiento elástico.

$$k_s = \frac{q}{\delta}$$

k_s = módulo de reacción del suelo (MN/m³)

q = presión aplicada sobre el suelo (kN/m²)

δ = asentamiento de la fundación en un determinado punto (m)

En terrenos planos y en distancias cortas el término k_s puede asumirse razonablemente constante; Sin embargo, a medida que se acerca a la corona de un talud, el valor de k_s disminuye en forma substancial, lo cual equivale a que las deformaciones verticales en un cimiento son mayores cerca al talud que lejos del talud. En cimientos continuos esta diferencia en el módulo de reacción genera un efecto de asentamiento diferencial, el cual se traduce en un efecto de voladizo sobre el cimiento. El módulo de reacción en un suelo duro cerca de un talud puede ser menos de la mitad del módulo de reacción en un sector plano sin efecto de talud.

La diferencia es todavía mayor si se presentan grietas de tensión. La diferencia en los módulos de reacción es particularmente grande en rocas blandas y en suelos muy duros.

Estabilidad general de construcciones sobre taludes

La estabilidad general del talud es un factor que se debe tener en cuenta en el análisis y diseño del proyecto. La estabilidad a largo plazo involucra el deterioro de las propiedades y la estructura del suelo con el tiempo.

La definición de factor de seguridad puede utilizarse como referencia para la toma de decisiones, sin embargo los procesos de inestabilidad no son estáticos sino que pueden ser acelerados por procesos antrópicos o por fenómenos naturales. No existe un modelo que pueda ser aplicado a todos los casos.

Existen los modelos estadísticos y los modelos físicos. Entre los modelos físicos existen modelos basados en flujos de agua y presiones de poro positivas y modelos de flujo no saturado. El modelo a utilizar depende de la información existente y del mecanismo de falla presente.

Los modelos físicos con base en software que combina elementos hidrogeológicos y geotécnicos son una herramienta útil para determinar niveles de amenaza (Crostra y Frattini 2003), para problemas locales de un determinado deslizamiento cuando la complejidad geológica no es muy grande y la información existente es suficiente para la elaboración de un modelo. Por ejemplo los modelos elaborados para la cañada Angulito en Girón Santander (Suárez y Suárez 2006), permitieron obtener resultados de predicción muy similares a los realmente ocurridos para un ambiente geológico y geomorfológico muy sencillo de respuesta inmediata.

Marín Nieto (2003), indica que la complejidad geológica en las zonas tropicales es tal que impide obtener una relación para predecir la ocurrencia de un deslizamiento en una determinada región climática y geológica. La respuesta hidrogeológica depende del marco geológico y no existen dos sitios geológicamente iguales.

La extrapolación de información de un sitio para otro generalmente no es confiable. Sin embargo, “conceptualmente” se puede extrapolar entre dos ambientes geológicamente similares, con un determinado margen de error.

Ejemplo : Construcciones sobre taludes en las arcillas marinas sensitivas de Barranquilla.

El Ingeniero Aquiles Arrieta Guerra, un muy importante geotecnista colombiano, me comentó de un caso en el barrio Campoalegre de Barranquilla: “Las construcciones sobre una formación de arcillas muy duras se estaban desplazando sin una razón lógica aparente. Los procedimientos rutinarios de análisis y diseño geotécnico no funcionaron y se presentan actualmente deslizamientos en varios sectores del barrio Campoalegre de Barranquilla”.

El problema no era de capacidad de soporte, asentamientos o estabilidad general del talud. El problema está relacionado con la microestructura de la arcilla.

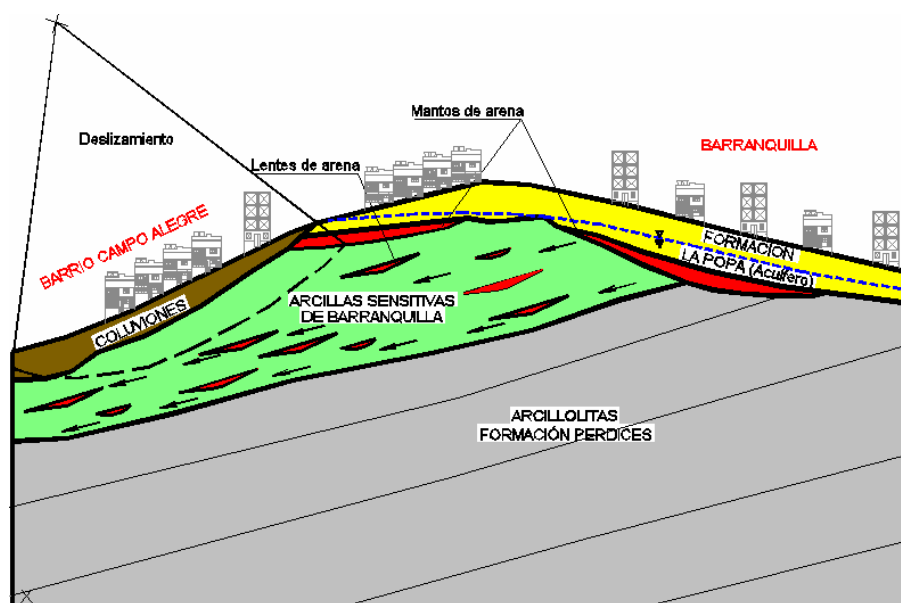


Figura 6. Esquema de corte geológico de las laderas noroccidentales de Barranquilla.

Los movimientos del suelo en el barrio Campoalegre se deben a que el suelo del barrio está compuesto por arcillas de origen marino muy sensitivas o rápidas, las cuales pierden gran parte de su resistencia al ser alteradas por los procesos de urbanización y/o por procesos de humedecimiento y secado.

Entre los procesos de urbanización que alteran el suelo y pueden actuar como activadores de los movimientos se encuentran los siguientes:

- ☐ Excavaciones y rellenos para la construcción de vías.
- ☐ Excavaciones de zanjas para servicios públicos.
- ☐ Cimentación de viviendas, edificios y otros tipos de estructuras.
- ☐ Modificación de los patrones de drenaje superficial.
- ☐ Vibraciones por equipos y maquinaria.

Los suelos antes de urbanizarse se encontraban en un equilibrio aparente, pero al ser afectados por el proceso de urbanización se han ido alterando en un proceso progresivo. Este proceso de alteración toma varios años.

El movimiento inicial del terreno por una alteración se trasmite a los suelos inmediatamente contiguos y el proceso se va extendiendo ladera arriba en forma similar a un proceso “creep”. Inicialmente la superficie de falla de deslizamiento puede no ser perceptible pero poco a poco se va formando por reacomodo de las partículas.

Las partículas poseen una estructura floculada y el proceso de alteración permite la modificación o colapso de esta estructura a una estructura orientada o desordenada.



Fotografía. Agrietamientos en la corona de los taludes del barrio Campoalegre de Barranquilla.

Efecto de los procesos de humedecimiento y secado

Las arcillas marinas sensitivas poseen una estructura “floculada” en la cual las uniones predominantes de las partículas son cara-borde.

Esta estructura se debe al proceso de depositación en un ambiente con concentraciones altas de sal. Esta estructura produce resistencias muy altas, debido a que las uniones entre partículas son muy fuertes.

Al humedecerse el suelo y luego secarse o al paso de corrientes de agua dulce, la sal presente se va lavando y a medida que disminuye la concentración de sal en el suelo se va perdiendo la fuerza entre las partículas de arcilla y por lo tanto también la resistencia del suelo.

La resistencia del suelo que es muy alta en estado de depositación se pierde y se facilitan en esta forma los procesos de alteración y posterior deslizamiento.

Las arcillas depositadas en ambientes marinos salados generalmente poseen una estructura floculada y poseen una sensibilidad muy alta.

Dentro de esta categoría se encuentran las arcillas “rápidas” las cuales poseen una sensibilidad superior a 30.

Estas arcillas rápidas generalmente fueron sedimentos provenientes de áreas de glaciares y contienen minerales no activos.

El comportamiento de las arcillas marinas sensitivas de Barranquilla es similar al comportamiento de las arcillas “rápidas”. Sin embargo debe tenerse en cuenta que las arcillas marinas de Barranquilla no corresponden con precisión a arcillas “rápidas”.

La sensibilidad de las arcillas marinas de Barranquilla varía de sitio a sitio. En algunos sitios las arcillas son muy sensitivas y en otros no. Los mantos no son homogéneos y no pueden generalizarse como arcillas rápidas.

Códigos geotécnicos para las construcciones sobre ladera

Algunas ciudades han establecido códigos para reglamentar las construcciones sobre laderas. Algunos de los códigos más conocidos son los de Las ciudades de Hong Kong y de Los Angeles.

En Colombia, Bucaramanga fue la primera ciudad en establecer un código de laderas. En las Normas geotécnicas de Bucaramanga se establecen criterios relacionados con:

- Estudios que se requiere realizar siempre que se vaya a construir un proyecto sobre ladera.
- Limitaciones y aislamientos en las construcciones en ladera.
- Obras que se requiere construir para garantizar la estabilidad de las construcciones sobre ladera.

Actualmente se está elaborando el código de laderas de Barranquilla y es posible que en pocos años las principales ciudades de Colombia tengan cada una su código de construcciones sobre ladera.

Referencias

Abramson L.W., Lee T.S., Sharma S y Boyce G.M. (2002). "Slope Stability and Stabilization Methods". Second Edition. John Wiley & Sons Inc. New York. Pp. 702

Arrieta Aquiles (2005). "Asesoría geotécnica urbanización Campoalegre – Barranquilla, zona alterada". Parrish S.A. – Urbe INV / Pidsa S.A. – Carson Inmobiliaria.

CDMB (2005). "Normas Geotécnicas CDMB". Bucaramanga. Pp. 54

Crosta G.B., Frattini P. (2003), "Distributed physically-based rainfall thresholds for landslide triggering". Geophysical Research Abstracts, Vol. 5, 11896.

Geotecnología Ltda (2006). Propuesta General Definitiva del Plan de Manejo y Obras del Plan Maestro para la Estabilización Geotécnica de las Laderas del Barrio Campoalegre en Barranquilla". Distrito de Barranquilla. Pp 68

Marín-Nieto, L. (2003). "Rainfall-Landslide Relationships during El Niño", 12th Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Boston, USA.21

Meyerhof (1957). "The Ultimate Bearing Capacity of Foundation on Slopes". Proc. 4th. Inter. Conf. On Soil Mech. And Foundation Engineering, I, 384-86. London.

Suárez N. R. y Suárez J. (2006), "Caracterización, análisis y diagnóstico de los flujos de lodos y detritos cuenca quebrada Angulito – Girón (Santander). Tesis de Grado. Universidad Industrial de Santander.

Teng W. C. (1962). "Foundation design". Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey. Pp 465