

## **Análisis de confiabilidad de excavaciones en arcillas blandas**

Jorge Alberto Rodríguez O., PhD  
Jefe de Geotecnia  
HMV Ingenieros Ltda.  
Tel 3175060 ext 116, fax 3175214:  
Cr. 7 71-21 Torre B Piso 14  
[jrodriguez@h-mv.com](mailto:jrodriguez@h-mv.com)

### **Resumen**

Desde hace mas de 5 años HMV Ingenieros Ltda. ha venido desarrollando extensivos trabajos de investigación geotécnica para el diseño de excavaciones para tuberías, canales, pondajes, jarillones, estaciones de bombeo y túneles en el sector del Río Bogotá entre La Conejera y el Tintal. Se cuenta con información de cientos de perforaciones con resultados de toda la gama de ensayos disponibles en el medio. Con base en el análisis de esta información, de los diseños realizados y la observación del comportamiento de varios de estos proyectos ya construidos, se hace una evaluación integral de la confiabilidad en el diseño de excavaciones. Se discute el sentido de la confiabilidad en el diseño, y su relación con los procesos que actúan en estos suelos así como con la variabilidad estadística de los parámetros.

### **Introducción**

Desde hace mas de 5 años HMV Ingenieros Ltda. ha venido desarrollando extensivos trabajos de investigación geotécnica para el diseño de excavaciones para tuberías, canales, pondajes, jarillones, estaciones de bombeo y túneles en el sector del Río Bogotá entre La Conejera y el Tintal. Se cuenta con información de cientos de perforaciones con resultados de toda la gama de ensayos disponibles en el medio. Esta información ha permitido hacer una evaluación sistemática de los factores que determinan el comportamiento mecánico de los suelos del área. Se ha podido establecer que el desarrollo de los procesos geomorfológicos que han dado origen a los depósitos y su desarrollo actual en un sitio dado, son los que determinan la resistencia y deformabilidad que en un sitio y momento dados pueden desarrollar los suelos. Con el propósito de poder evaluar la confiabilidad de los diseños que se puedan hacer, se hace una revisión de los conceptos del análisis de confiabilidad en geotecnia. Con base en el análisis de esta información, de los diseños realizados y la observación del comportamiento de varios de estos proyectos ya construidos, se hace una evaluación integral de la confiabilidad en el diseño de excavaciones. Se discute el sentido de la confiabilidad en el diseño, y su relación con los procesos que actúan en estos suelos así como con la variabilidad estadística de los parámetros.

### **Análisis de confiabilidad**

Los análisis de confiabilidad tradicionalmente en geotecnia han estado estrechamente relacionados con los que se hacen para estructuras. Estos requieren la adopción de un modelo geotécnico, usualmente un análisis de equilibrio límite, y se parte del precepto de que la incertidumbre se da sólo proviene de incertidumbre en los parámetros de entrada, generalmente los parámetros de suelos y en ocasiones las cargas. Estos análisis normalmente producen una distribución de probabilidad del factor de seguridad. Entre mayor es la confiabilidad de la información más angosta es la distribución de probabilidad resultante. Los componentes de este tipo de análisis se presentan en la Figura 1 (adaptado de Vick, 2002).

Para entender que significan los resultados de un análisis de confiabilidad, es necesario examinar sus fundamentos conceptuales los cuales están relacionados con dos áreas. La

interpretación probabilística de la frecuencia relativa de los valores de los parámetros y el paradigma de la teoría que se aplique para los análisis la cual se considera como verdadera y objetiva.

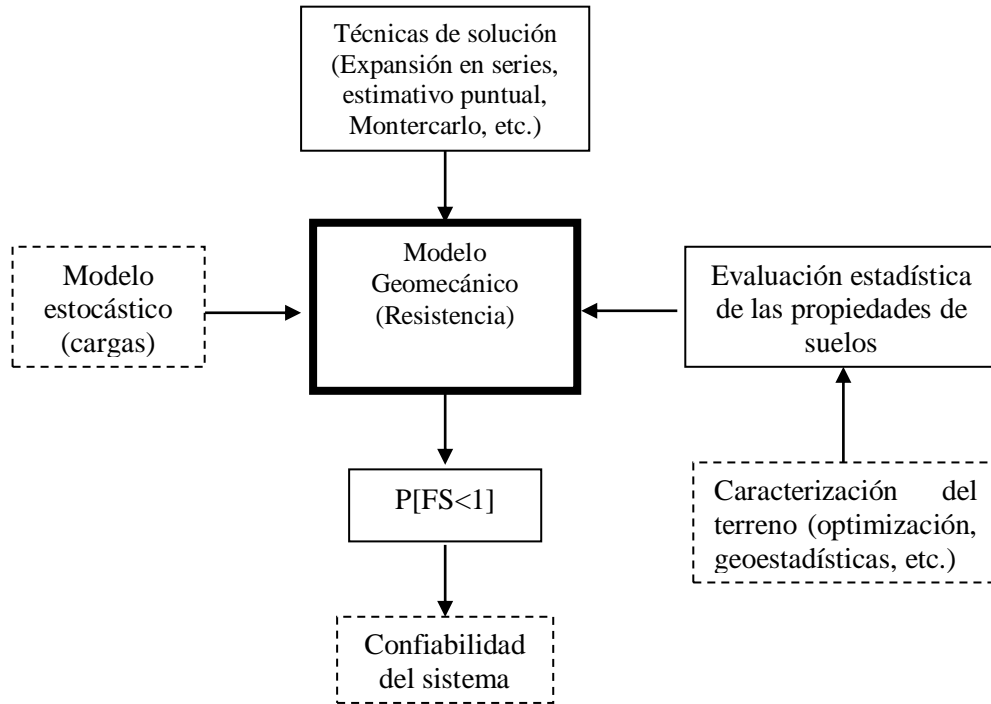


Figura 1 – Componentes de un análisis geotécnico de confiabilidad

En estos aspectos hay que tener en cuenta que la aplicación de una teoría implica una serie de premisas o suposiciones que pueden no representar la realidad de la situación que se quiere analizar. Por lo tanto existe un componente de la incertidumbre que puede ser mucho más importante que el de los parámetros de suelos que no se está teniendo en cuenta en el análisis.

Con respecto a la caracterización estadística de los parámetros hay que tener en cuenta varios aspectos. Uno de ellos es que la muestra sea efectivamente representativa. Esto requiere que se tengan en cuenta aspectos básicos de geología y geomorfología, de manera que los parámetros que se midan correspondan a muestras que tienen un mismo origen y se encuentran en un estado similar al de los procesos que moldean los materiales y determinan su comportamiento.

Un ejemplo de esta situación se tiene con respecto la resistencia no drenada de las arcillas blandas superficiales de la Sabana de Bogotá. En la figura 2 (Rodríguez, 2002), se muestra el rango de variación de este parámetro medidas en las arcillas a lo largo de los jarillones del río Bogotá en la zona de estudio. En esta figura se muestra una clara tendencia que tiene comportamiento similar pero rangos de valores diferentes para arcillas tipo CL y CH respectivamente. Estos dos tipos de arcillas corresponden a materiales de las formaciones Chia y Sabana respectivamente. Por lo tanto corresponden a materiales similares pero formados bajo condiciones ambientales y de depositación diferentes. Por otra parte se aprecian variaciones muy grandes de resistencia que presentan una variación exponencial con el contenido de humedad. Estas diferencias de humedad se deben a procesos de desecación. La desecación además produce fisuramiento de la arcilla, por lo que si bien una muestra pequeña de arcilla desecada presenta una alta resistencia en un talud la resistencia de la arcilla estará controlada a una escala más grande por efecto de las fisuras.

Tenemos por lo tanto una gran muestra de datos que se puede caracterizar estadísticamente de diferentes formas. Sin embargo, cualquier caracterización que se haga, sin tener en cuenta que la

variación de los datos está influenciada por el origen, la humedad, desecación y la fisuración de la muestra no será representativa de la variabilidad de un parámetro básico para los análisis.

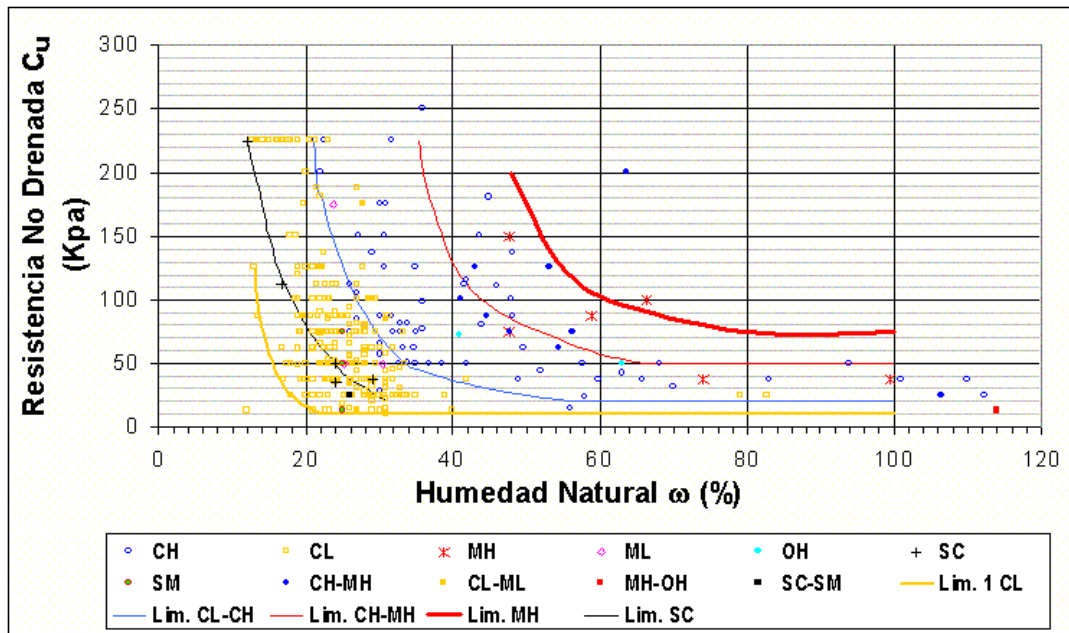


Figura 2 – Variación de la resistencia no drenada en función del tipo de material y la humedad

En el caso del análisis de excavaciones y taludes en este tipo de materiales se pueden aplicar modelos de cálculo de estabilidad de taludes en arcillas en los que los parámetros básicos de análisis son la geometría y la resistencia no drenada de la arcilla. Teniendo datos confiables en suficiente cantidad, se debería poder hacer un análisis estadístico de los mismos y, en principio tener un análisis completo de confiabilidad. Este tipo de análisis se han hecho, resultando en altos factores de seguridad para la excavación. Sin embargo, en diferente tipo de obras de excavación, a pesar de contar con muy buenos estudios y en muchos casos análisis confiabilidad, se han presentado fallas de diferentes tipos como las que se relacionan a continuación. En cada caso se identifica la causa de la falla en relación con el componente del estudio de confiabilidad:

- Deslizamientos de rellenos colocados sobre la margen del río debido a la presencia de materiales reblandecidos cerca de la margen, con condiciones de humedad diferentes a las de las muestras tomadas a pocos metros de distancia. (*muestras no representativas*)
- Fallas de taludes de excavación debido a zonas reblandecidas localmente, por ejemplo debido a fugas en tuberías, o a agua infiltrada en el suelo durante fases previas de la construcción (por ejemplo por construcción de pilotes). Estas condiciones produjeron cambios de humedad con respecto a las condiciones encontradas durante la exploración del subsuelo (*muestras no representativas de la condición real*)
- Fallas locales de taludes en excavaciones en suelos de buena resistencia, controladas por fisuras (*modelo de análisis inadecuado*)
- Deformaciones excesivas y flujo plástico del fondo de excavaciones entibadas debidas a extrusión del material del fondo de la excavación favorecido por su mayor deformabilidad y concentración de esfuerzos por los sistemas de apuntalamiento utilizados (tablestacas o pantallas). Corresponde a un mecanismo de falla controlado por la deformabilidad del suelo (*modelo de análisis inadecuado*)
- Desplazamiento de muros, pantallas y entibados de diferentes formas debido a apuntalamiento insuficiente, no colocado a tiempo, o no colocado en los niveles y el momento adecuado. Estos mecanismos de falla son controlados enteramente por la interacción suelo – estructura, en la que la deformabilidad del suelo y las estructuras de

contención y la secuencia constructiva determinan la posibilidad de un mecanismo de falla. La suposición de una condición de empujes puede cambiar por efecto de las deformaciones, de igual manera la resistencia y deformabilidad de los materiales cambia por efecto de las deformaciones. (*modelo de análisis inadecuado*)

- Falla de recubrimientos de canales por fluencia a largo plazo (creep) de arcillas deformables, debido a las deformaciones que sufre la arcilla bajo esfuerzos cortantes constantes, situación equivalente a la compresión secundaria (*modelo de análisis inadecuado*)
- Falla de sistemas de entibado por concentración de esfuerzos en la cimentación o empotramiento de los parales (*modelo de análisis inadecuado*)
- Falla de taludes a lo largo de zonas reblandecidas en el contacto entre suelo natural y rellenos que actúan como sobrecarga. Estas zonas débiles se presentan por efecto de agua infiltrada y niveles freáticos colgados y son localizadas y discontinuas, difícilmente detectables durante la exploración (*muestras no representativas, modelo de análisis inadecuado*)

En todos estos casos el análisis de confiabilidad realizado para el diseño falló en identificar una alta probabilidad de falla. Estas situaciones se pueden repetir si no se tienen en cuenta sus causas y dejan sin sentido los análisis de confiabilidad que se hagan.

Del análisis de la causa de las fallas se aprecia que en muchas ocasiones las muestras no eran estadísticamente representativas de las condiciones reales de los suelos que controlaron la falla. Esto sucedió generalmente por tratarse de suelos de condiciones particulares (casos atípicos), difíciles de identificar durante la exploración, o que fueron identificados durante la exploración, pero por tratarse de datos atípicos se descartaron en los análisis estadísticos, o que tuvieron muy poco peso en un análisis estadístico, o que cambiaron de condiciones desde el momento en que se hizo el estudio geotécnico y el momento de la falla.

Un análisis más detallado del porque las muestras en estos casos no fueron representativas revela que más que un problema de variabilidad estadística de los parámetros se trata de un problema de identificación de los procesos que determinan el estado de los materiales térreos. En este sentido la variabilidad de la resistencia de una arcilla reblandecida puede estar en el rango de 15 a 20 kPa, mientras que la misma arcilla desecada, sin tener en cuenta el efecto de las fisuras puede presentar valores de resistencia no drenada entre 150 y 200 kPa. Estos valores claramente indican que las diferencias debidas a la **incertidumbre en el estado** de la arcilla son mucho más importantes que la **variabilidad** estadística para unas condiciones dadas.

La otra causa de la falla en los casos estudiados ha sido el uso de un modelo de análisis inadecuado. En muchas ocasiones se puede hacer una gran énfasis en controlar la precisión de los modelos, por ejemplo haciendo discretización muy fina en análisis con elementos finitos o un gran número de tajadas en análisis de equilibrio límite. Esto contribuye a limitar el error en los cálculos realizados. Sin embargo cualquier modelo es sólo una idealización de la realidad, formulado para representar sólo algunos de los componentes de los procesos que ocurren en cualquier problema geotécnico. Por lo tanto las suposiciones y simplificaciones de los modelos introducen errores en los resultados de los modelos. Estas limitaciones pueden ser tales, que no puedan representar los mecanismos de falla que finalmente son los que controlan el comportamiento en la realidad. En estos casos se puede hacer un análisis de confiabilidad muy completo, detallado y preciso, pero para el problema equivocado. Esta situación es la mas desfavorable para un proyecto. Este componente se relaciona con la conceptualización del proceso y como se desarrolla e introduce incertidumbre en los resultados. Por lo tanto, mientras los **errores del modelo** son un problema de precisión, la **incertidumbre de modelo** es un problema de apreciación correcta de los principios involucrados y es un problema de juicio.

Las situaciones descritas ponen de manifiesto una diferencia fundamental entre los análisis de confiabilidad en estructuras y en geotecnia. Aún si se tiene un modelo analítico universalmente

aceptado, en el caso de la geotecnia la incertidumbre de los modelos es muy grande por cuanto siempre habrá una amplia variedad de interpretaciones del comportamiento de los suelos y de los procesos geomorfológicos que siempre están presentes. Estas interpretaciones se ven complicadas por la necesidad de ajustar el comportamiento del suelo a modelos establecidos, algunos sencillos (como el modelo de resistencia no drenada), otros más complejos como modelos con envolventes de resistencia de Mohr-coulomb, (equilibrio límite), pasando por modelos elastoplásticos más o menos complejos, acoplando las deformaciones por corte y volumétricas, considerando de manera acoplada la generación y disipación de presiones de poros y efectos viscoplásticos en función del tiempo, bajo cargas estáticas o dinámicas, con o sin interacción suelo estructura, con análisis en dos o tres dimensiones, etc. A parte de la selección del modelo existe el problema de poder considerar mecanismos de falla tales como falla progresiva, flujo, erosión interna, disolución, y otros que los modelos no pueden representar.

El problema de la incertidumbre en los modelos implica que se pueden obtener tantas distribuciones de probabilidad, como modos de falla pueda haber, por lo que el análisis de confiabilidad se torna indefinido. Por lo tanto es muy importante entender en un momento dado lo que los resultados de un análisis de este tipo significan, teniendo en cuenta con claridad las suposiciones del modelo, y entendiendo que estas suposiciones normalmente son mucho más significativas que la variación misma de los parámetros.

## Conclusiones

Los resultados del presente estudio permiten establecer varios aspectos fundamentales y recomendaciones para poder utilizar de manera efectiva los análisis de confiabilidad aplicados a problemas geotécnicos.

Las diferencias debidas a la **incertidumbre en el estado** de los suelos son mucho más importantes que la **variabilidad** estadística para unas condiciones dadas. El estado de los suelos siempre corresponde a un punto en el espacio y el tiempo dentro de un proceso geomorfológico (incluyendo en esta acepción los procesos de origen antrópico). Por lo tanto es fundamental identificar los procesos actuantes y determinantes de la respuesta de los suelos. Esto incluye procesos naturales, secuencia constructiva, cambios de condiciones debidas al proyecto o proyectos que se desarrollen en el área e interacción suelo-estructura. En general es necesario Identificar las causas de la variación de los parámetros de los suelos, y no simplemente caracterizar su variabilidad estadística

Directamente relacionado también con los posibles procesos geomorfológicos que ocurran en un dado caso, esta la selección apropiada de métodos de análisis aplicables a dichos procesos. En este sentido es fundamental hacer diferencia entre los **errores del modelo** que son un problema de precisión, y la **incertidumbre de modelo** es un problema de apreciación correcta de los principios involucrados y es un problema de juicio. El adoptar el modelo equivocado, efectivamente resulta en resolver un problema diferente al que se requiere lo cual es altamente riesgoso.

Con respecto a esto en general es necesario utilizar métodos de análisis que tengan en cuenta compatibilidad de deformaciones y posibilidad cinemática de los mecanismos de falla. Tener en cuenta las limitaciones de los métodos de análisis incluyendo el rango de aplicación de procedimientos de diseño basados en datos empíricos que pueden no ser representativos de las condiciones del proyecto.

Por otra parte, la ocurrencia de una falla normalmente depende de que se produzca una cadena de eventos sucesivos dentro de un proceso. Normalmente, aunque se calculen factores de seguridad menores que uno, no necesariamente esto corresponde con la ocurrencia de la falla, lo contrario también ocurre. Por lo tanto para hacer un análisis de confiabilidad objetivo, es

necesario prestar atención ante todo a los procesos que puedan ocurrir que puedan llevar a una situación de posible falla. Para las condiciones correspondientes a estos procesos críticos se pueden aplicar las técnicas convencionales de análisis de confiabilidad. Sin embargo, para evaluar la confiabilidad integralmente es necesario evaluar la probabilidad de ocurrencia de los diferentes eventos y de sus probabilidades condicionales correspondientes. .

En los análisis y diseños es conveniente considerar las condiciones esperadas, pero también unas condiciones extremas que se puedan producir por diferentes razones. Estas se debe establecer con claridad como limitaciones o condiciones de riesgo para el proyecto, y se deben establecer acciones de contingencia para esos eventos.

## **Referencias**

- Rodríguez J. (2002) “parámetros geomecánicos de las arcillas superficiales de la sabana de Bogota” IX Congreso Colombiano de Geotecnia, Sociedad Colombiana de Geotecnia, Noviembre, Medellín. Vick S. (2002). Degrees of Belief – Subjective probability and engineering judgement, ASCE Press, Reston Virginia.