

Análisis de taludes mediante ensayos y back análisis de fallas

Rodrigo Arellano, Javier Bielefeldt y Dennys Correa

Introducción

El análisis retrospectivo (back analysis) es usado comúnmente en la ingeniería geotécnica para estimar la resistencia *in situ* del suelo. Esta resistencia se representa generalmente por los parámetros de resistencia al corte en tensiones efectivas de Mohr-Coulomb, cohesión c y ángulo de fricción interna ϕ . El análisis retrospectivo de fallas de taludes es un método efectivo que incorpora importantes factores que muchas veces no son bien representados en ensayos de laboratorio, tales como la estructura del suelo, la no homogeneidad, influencia de fisuras en la resistencia al corte y el efecto de los planos de debilidad dentro de la masa de suelo.

El análisis retrospectivo asume un factor de seguridad igual a la unidad y considera la geometría original en el momento de la falla. Luego se estima la resistencia al corte del suelo que fue movilizada en la falla consistente con un modelo 2D realizado con un método seleccionado (Morgenstern-Price, Spencer, Janbu, Bishop, etc.) para un FS=1. Estudios han demostrado que usando un método que considere todas las condiciones de equilibrio ($\Sigma F=0$, $\Sigma M=0$) se obtiene un factor de seguridad que varía en $\pm 5\%$ (Tang, 1999).

En muchos casos se dispone de poca información de las condiciones bajo las cuales ocurrió un deslizamiento, lo que reduce la confiabilidad de los valores de c y ϕ obtenidos mediante análisis retrospectivo. Estos valores pueden ser utilizados para analizar la estabilidad de otros taludes en la misma formación geológica y recomendar medidas de estabilización si corresponde.

En este trabajo se definen los conceptos básicos del análisis retrospectivo de taludes, así como también algunos métodos usados en la obtención de los parámetros de resistencia del suelo, c y ϕ . Para que los resultados obtenidos sean compatibles con las propiedades del suelo al momento de la falla, es necesario tener criterio y experiencia para estimar algunos parámetros necesarios en el análisis, como peso unitario del suelo, presiones de poro, geometría original del talud y estructura del suelo, así como la sensibilidad del resultado frente esta elección. A su vez es necesario conocer las limitaciones y rangos de aplicabilidad para no incurrir en errores de consideración. También se presentará un caso real donde se hayan obtenido los parámetros de resistencia al corte del suelo mediante ensayos y análisis retrospectivos y una aplicación de los métodos expuestos.

Métodos de análisis retrospectivo

Tradicionalmente el análisis retrospectivo se ha realizado obteniendo un solo parámetro de resistencia del suelo y suponiendo conocido el otro. Una de las formas más sencillas de realizar este análisis es asumiendo un valor constante de la resistencia al corte, lo que supone un ángulo de fricción interna $\phi = 0^\circ$. Esta consideración, sin embargo, puede llevar a resultados poco conservadores si la falla se produce en condiciones drenadas (largo plazo).

Sólo si se conoce la geometría del deslizamiento es posible determinar ambos parámetros, si bien los resultados obtenidos no siempre son ajustados a la realidad, sobretodo cuando se produce una falla progresiva o marcadas discontinuidades en el talud. A continuación se presentan algunos métodos para obtener los parámetros de resistencia del suelo mediante análisis retrospectivo.

- **Métodos propuestos por Laurence D. Wesley and Viraja Leelaratnam**

- *Método 1*

El primer método corresponde a una combinación de los parámetros de corte del suelo, para un FS=1 tanto para una superficie específica de falla como para el talud intacto (talud de diseño).

Se realiza un análisis convencional del desplazamiento que se ha producido, con lo cual es posible obtener un rango de valores de c' y $\tan \phi'$ que cumplan con el criterio de falla, en que el factor de seguridad para la superficie de deslizamiento sea igual a la unidad. Este rango de valores se obtiene utilizando un software de análisis de estabilidad de taludes el cual entrega los valores de c' y ϕ' a partir de un centro y radio estimado de la superficie de falla.

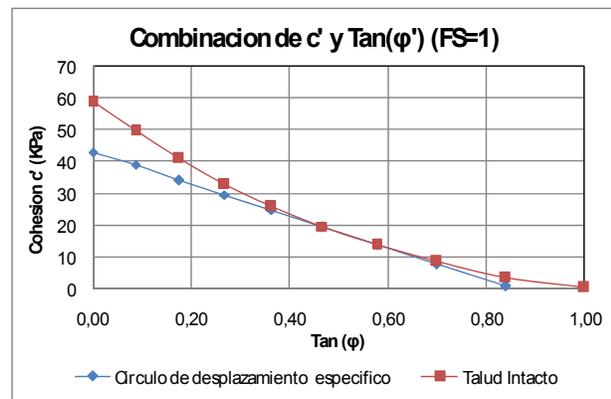


Figura 1 Combinaciones de c' y $\tan \phi'$ para un factor de seguridad de 1

Luego se repite el análisis nuevamente considerando el talud como intacto, esto

entrega un nuevo conjunto de combinaciones de c' y ϕ' que se aplican al talud intacto. Esta gama de valores se muestra en la Figura 1 curva (b).

El punto de intersección de las dos curvas, donde los dos conjuntos de valores coinciden, define el par c' , $\tan \phi'$ aplicados en terreno.

- *Método 2*

El segundo método consiste en obtener un gráfico F.S v/s c' o $\tan \phi'$; es recomendable utilizar $\tan \phi'$. Esto puede hacerse de dos maneras, en primer lugar, se toman las combinaciones de c' y $\tan \phi'$ obtenidos mediante el análisis retrospectivo del círculo de falla y utilizarlos para calcular un conjunto de factores de seguridad para el talud intacto. Si hacemos esto, encontramos que los factores de seguridad son menores a la unidad a excepción de un caso cuando el círculo de falla crítico corresponde al círculo de falla real.

Esto se ilustra gráficamente en la línea inferior de la Figura 2. En otras palabras, si los parámetros de resistencia al corte no son los que se aplican a la superficie de deslizamiento real entonces la falla habría tenido otra trayectoria siendo el F.S inferior.

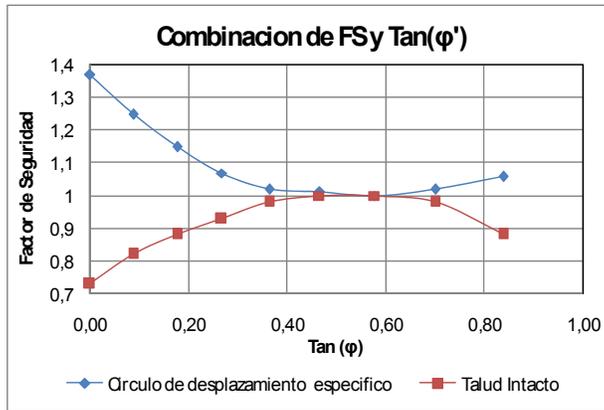


Figura 2 Gráfico de F.S versus $\tan \phi$ para dos diferentes supuestos iniciales

En segundo lugar, se toman las combinaciones de c' y ϕ' obtenidos del análisis retrospectivo del talud intacto y se utilizan para calcular los F.S para el círculo de falla real. Encontramos entonces que todos los factores de seguridad son mayores que la unidad a excepción de un caso cuando el círculo de falla crítico corresponde al círculo real. Esto queda ilustrado por la curva superior de la figura anterior. En otras palabras, la superficie de falla real es la superficie de deslizamiento en el que podría ocurrir la falla, ya que todas las otras superficies tienen factores de seguridad mayores a la unidad. Por lo tanto, el punto de intersección de los valores c' y $\tan \phi'$ es el que define los parámetros resistentes del suelo.

▪ **Duncan**

Aunque para cualquier talud dado existe un número infinito de pares de valores c' y ϕ' que produce un F.S igual a 1, también se producirá para cada par de valores una superficie de deslizamiento crítica. Cada conjunto de parámetros de resistencia al esfuerzo de corte produce un factor de seguridad de 1, pero la superficie de deslizamiento crítica es diferente. Para un talud homogéneo simple, la altura de la superficie de deslizamiento está relacionado con el parámetro adimensional, $\lambda_{c,\phi}$ que se define como:

$$\lambda_{c,\phi} = \frac{\gamma \cdot H \cdot \tan \phi}{c}$$

Donde H es la altura del talud, c y ϕ representan los parámetros de resistencia al corte. Los valores de λ , c y ϕ se muestran en la Figura 3 junto a los parámetros resistentes.

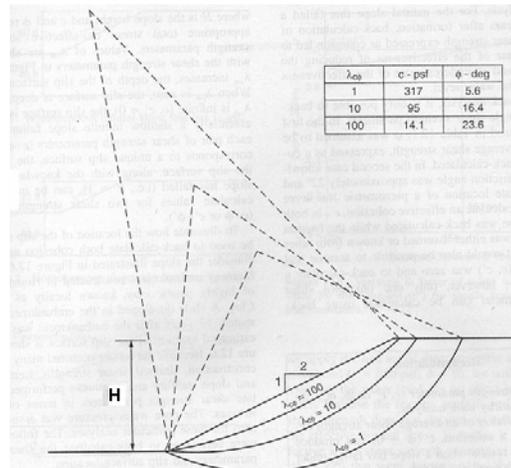


Figura 3 Valores de λ , c y ϕ en un talud (Duncan, 2005)

Así como $\lambda_{c,\phi}$ aumenta, la profundidad de las superficies de falla disminuye. Cuando $\lambda_{c,\phi}$ es cero, la superficie de falla es profunda, y cuando $\lambda_{c,\phi}$ es infinita la superficie de falla es poco profunda, es decir, una superficie de falla colineal con la superficie del talud.

En la Figura 4 se muestra la falla que ocurrió en un terraplén construido en Houston, Texas con una arcilla altamente plástica, conocido localmente como Beaumont Clay con el parámetro $\lambda_{c,\phi}$ alto.

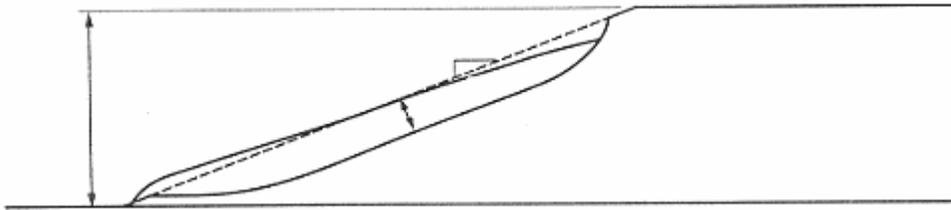


Figura 4 Falla del terraplén (Duncan, 2005)

Los pasos para determinar los parámetros de resistencia al corte para una superficie de falla son los siguientes:

1. Se asume una serie de valores del par c', ϕ' . Los pares de valores son escogidos de tal manera que representen un rango de $\lambda_{c,\phi}$, pares de valores que no necesariamente generan un F.S igual a 1.
2. Se determinan los círculos de falla críticos correspondientes al mínimo F.S calculado para cada par c' y ϕ' .
3. Los parámetros resistentes c_d' y ϕ_d' son determinados para cada par de valores de las siguientes ecuaciones asumiendo la cohesión, el ángulo de fricción y el FS considerado.

$$c_d' = c'/FS \quad \text{y} \quad \phi_d' = \arctan(\tan \phi'/FS)$$

La cohesión y el ángulo de fricción deben ser obtenidos para un FS = 1.

4. Se determina la profundidad para cada par de valores c' y ϕ' .
5. Los valores de c' y ϕ' obtenidos del paso 3 son graficados versus la profundidad de la superficie de falla del paso 4.
6. Se determina de los gráficos obtenidos el valor de c' y ϕ' para la profundidad observada dada por $\lambda_{c,\phi}$.

Estos valores obtenidos representan la cohesión y el ángulo de fricción para un FS = 1.

▪ **Taludes intactos**

También es posible obtener los parámetros de resistencia del suelo analizando taludes que no han fallado, lo que si bien disminuye la certeza de los parámetros encontrados, nos permite saber el rango en que se encuentran. Si el talud exhibe grietas de tracción incipientes en su coronación se puede utilizar un $1.1 < FS < 1.15$ para el análisis retrospectivo.

Si no se encuentran grietas el factor de seguridad debería ser mayor a 1.3, con lo que el análisis retrospectivo queda indeterminado. Sin embargo, para análisis conservadores se puede adoptar $FS=1.3$. Esto último tiene el problema que si bien se está dentro del lado de la seguridad, no se sabe por cuanto, con lo que se puede incurrir en costos innecesarios.

Otra alternativa es recolectar datos de un gran número de pendientes y alturas de taludes para una formación geológica o tipo de suelo en particular, que sea relativamente homogéneo, para estimar valores de c y ϕ .

Se trazan los puntos gráficamente en función de la pendiente del talud y su altura, como se muestra en la Figura 5. Luego se ajusta una curva que pase por sobre todos los puntos que representan taludes estables. Para determinar los parámetros de resistencia al corte se eligen dos o tres puntos (A, B, C de la Figura 5) que representan un solo par posible de c y ϕ . Esto último no es estrictamente necesario, pues se puede utilizar la curva ajustada para diseñar taludes, eligiendo combinaciones altura/pendiente que se encuentren bajo la curva mencionada.

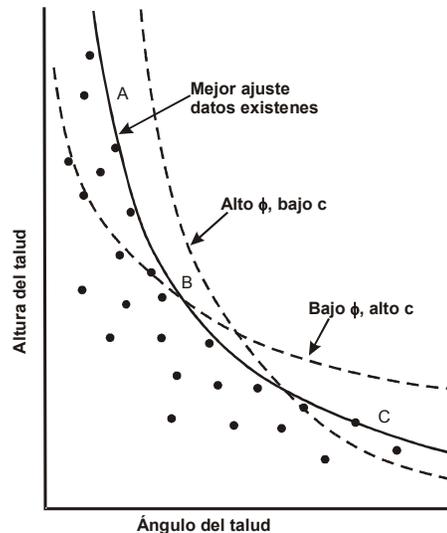


Figura 5 Curva ajustada para determinar c y ϕ (Wesley, 2001)

Caso real en suelo residual

▪ *Deslizamientos en el bypass Temuco (Ortigosa, 2004)*

○ *Antecedentes*

Durante la construcción del Bypass de Temuco se produjeron una serie de deslizamientos en los cortes del costado poniente de la carretera. El tipo de suelo presente corresponde a una cubierta superficial de origen volcánico constituida por un limo de consistencia alta, color café rojizo (trumao) con un espesor promedio de 5 a 9 [m], seguida por una roca muy alterada color amarillento que clasifica como limo MH, generalmente cercano a la línea A, y que exhibe una consistencia firme.

○ *Causas de los Deslizamientos*

a. Inicialmente la causa a la cual se postuló, se debe a la percolación de aguas lluvia a través del trumao, lo que habría generado el reblandecimiento del contacto trumao-roca alterada, e incluso la generación de napa por sobre dicho contacto con la consiguiente aparición de presiones de poros.

b. Otra de las causas se atribuye a la existencia de planos de clivaje lisos en la roca sana al pie de uno de los cortes, los cuales presentan una inclinación en el sentido de los deslizamientos observados (diaclasamiento conforme) producto de la meteorización de las diaclasas heredadas de la roca madre. Más aún, en la descripción de un sondaje ejecutado

en uno de los deslizamientos se reporta la existencia de planos jabonosos en la roca alterada.

○ *Aplicación de Back-Analysis*

Para la roca alterada los resultados de ensayos triaxiales y de compresión no confinada ejecutados por el proyecto definen una cohesión $c = 3$ [T/m²] y un ángulo de fricción $\phi = 32^\circ$ que se contradice con el par $c-\phi$ obtenido con los análisis de estabilidad retrospectivos de los deslizamientos según se ilustra en la Figura 6. Esto se explica debido a que los triaxiales, efectuados aplicando cargas verticales cuasi perpendiculares a los planos de clivaje, más que la resistencia en dichos planos, midieron los parámetros de la matriz de la roca alterada existente entre ellos. Estas, según inspecciones de terreno, presentaban consistencia firme.

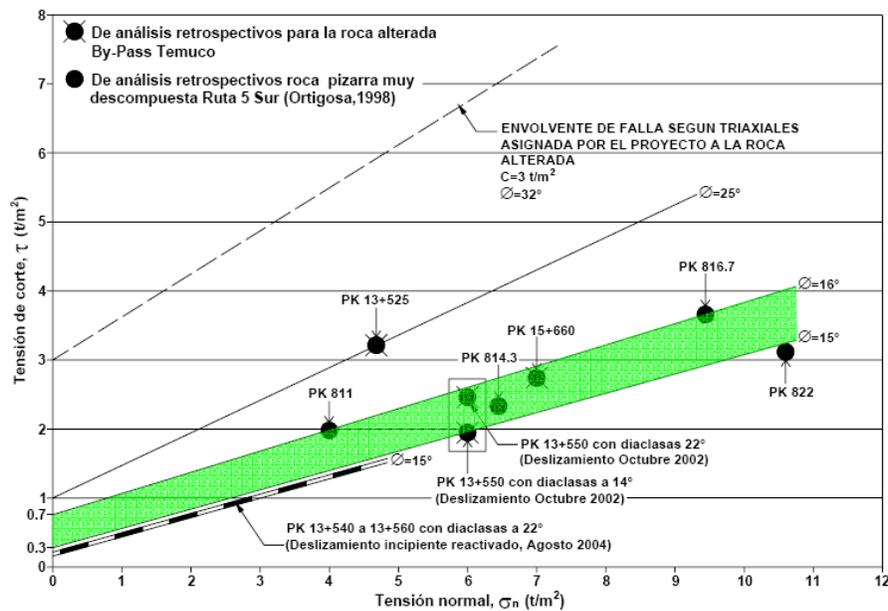


Figura 6 Resistencia al corte de Rocas Alteradas con Análisis Retrospectivos de Deslizamientos (Ortigosa, 2004)

○ *Resultados de Back-Analysis*

Los resultados de los análisis de estabilidad indican que el talud en limo trumao es estable tanto para condición no drenada como drenada, aún con una envolvente más desfavorable. En consecuencia es la falla de la roca alterada la que genera las grietas en el trumao. Así entonces, el análisis de estabilidad retrospectivo imponiendo un factor de seguridad $FS = 1.0$ para representar el corte en condición de falla, arroja una cohesión en las diaclasas en el rango 0.15 a 0.20 [T/m²] para $\phi = 15^\circ$, que es el ángulo de fricción más probable en las diaclasas de acuerdo a la Figura 6. El rango de cohesión obtenido cae por debajo del resto de los valores, lo que se explica porque en realidad el corte no ha fallado. En efecto, si se analiza su estabilidad con la cohesión mínima obtenida en los cortes que fallaron ($c_{min}=0.3$ [t/m²]) se obtiene $FS=1.06$ a 1.10, rango que es propio de un deslizamiento incipiente.

Influencia de la presión de poros en la estimación de los parámetros c y ϕ

En general, es muy difícil determinar la ubicación de la napa freática en el momento en que ocurre la falla en un talud. Generalmente se hacen estimaciones de acuerdo a taludes similares en la misma unidad geológica. En la Figura 7 se aprecian las grandes diferencias que se producen en la estimación de los parámetros c y ϕ para distintas ubicaciones del nivel freático. En ella se muestran, para tres ubicaciones distintas de la napa freática, la zona en la cual el par c y ϕ tanto para el talud intacto como para la superficie de falla son similares ($FS \approx 1$). El rango es bastante amplio, lo que indicaría la conveniencia de estimar uno de los dos parámetros por otra vía (Duncan, 2005).

Las condiciones extremas, sin napa por un lado y con la napa en la superficie por el otro, generan una franja de posibles valores c y ϕ para una situación intermedia (parcialmente saturado) como queda de manifiesto en la curva central de la Figura 7.

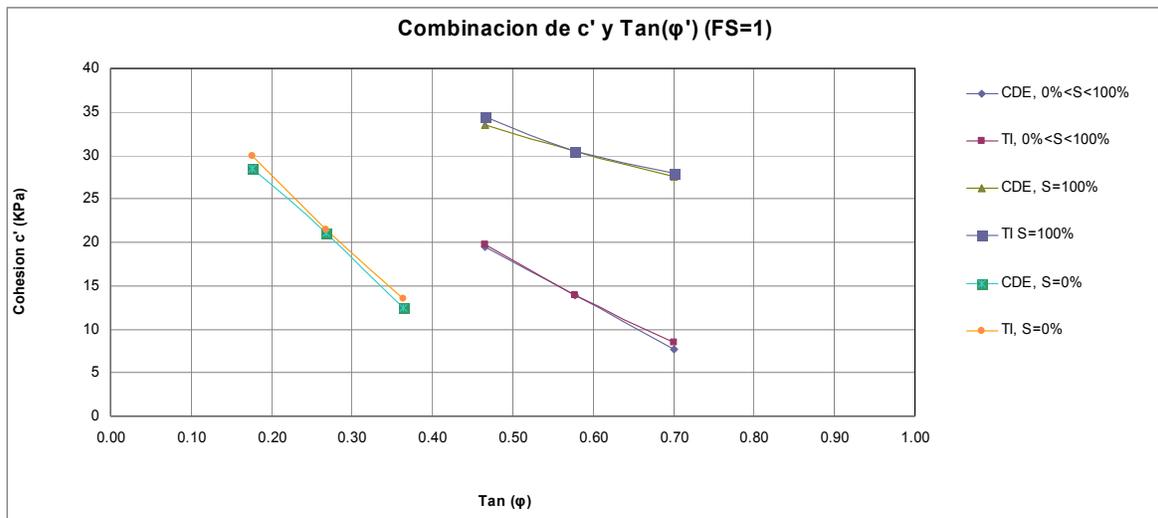


Figura 7 Combinación c , ϕ para distintos grados de saturación y talud intacto (TI) y círculo de desplazamiento específico (CDE)

De esta misma figura se puede apreciar el hecho que interpretaciones conservadoras en el diseño se traducen en estimaciones inseguras de los parámetros del suelo (Deschamps, 2006). Por ejemplo, al diseñar, se puede asumir conservadoramente que el suelo se encuentra totalmente saturado. Sin embargo, para este mismo supuesto y al realizar el análisis retrospectivo, se obtiene una mayor resistencia al corte que suponiendo una saturación parcial.

La Figura 8(a) muestra las líneas de flujo reales de un talud dado, mientras que la Figura 8(b) ilustra las líneas de flujo usadas por la mayoría de los programas computacionales. Para este caso específico la diferencia en la consideración de las líneas de flujo se traduce en una variación en el FS de 1.22 a 0.81, lo que confirma lo necesario de comprender el algoritmo operativo de ellos. Un análisis exhaustivo debería incorporar un parámetro de corrección de la presión de poros (r_u , aplicado como un corrector promedio).

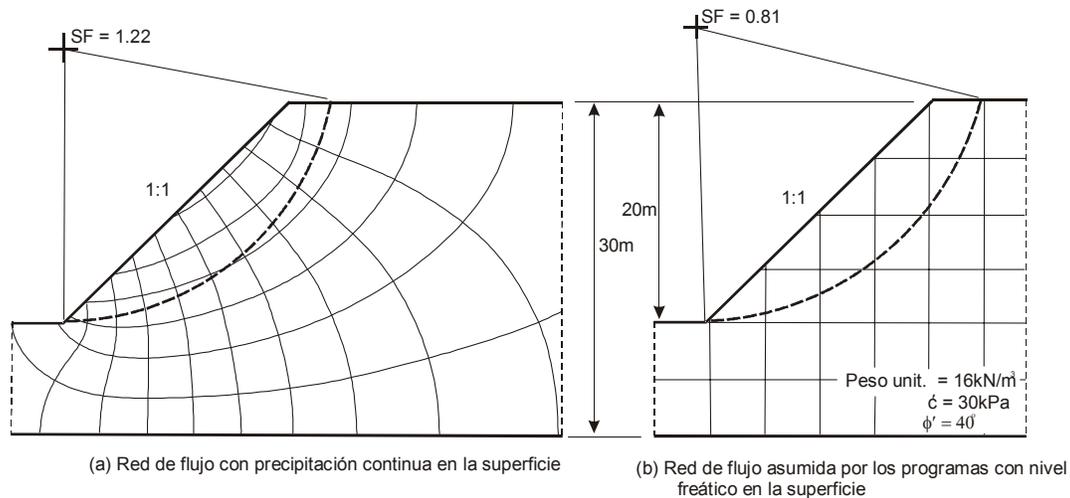


Figura 8 Redes de flujo en el talud (Wesley, 2001)

Limitaciones del análisis retrospectivo

Existe una serie de limitaciones o precauciones que se deben tener presentes al realizar un análisis de estabilidad retrospectivo. Entre ellas podemos destacar:

- Ubicación de la napa freática. Es necesario conocer las presiones de poro para determinar las tensiones efectivas y con ello la resistencia al corte del suelo. En ciertos casos se pueden estimar las presiones de poros conociendo taludes similares en una misma formación geológica o se puede asumir por ejemplo en la superficie (situación esperable durante una lluvia intensa), sin embargo, es muy difícil determinar la real ubicación del nivel freático al momento de la falla.
- Es esencial conocer la geometría del deslizamiento para determinar el correcto par c , ϕ . En algunos casos puede ser difícil la determinación del inicio o el reventón, así como también si el suelo no es muy homogéneo la superficie de falla puede alejarse del círculo asumido frecuentemente. También, especialmente en suelos altamente cohesivos, la presencia de una grieta de tracción puede alterar significativamente la resistencia obtenida del suelo.
- Estructura del suelo. Los suelos residuales presentan un comportamiento que se asemeja más al de una roca, debido a los planos de clivaje heredados de la roca madre. Por ello si bien es cierto, en algunos casos el suelo presenta parámetros de resistencia que permiten asegurar la estabilidad del talud, éstos fallan debido a la desfavorable inclinación de los planos de debilidad y a la poca resistencia del suelo en él.
- Prácticamente todos los deslizamientos tienen una componente 3D. Las condiciones de borde son raramente consideradas en el análisis retrospectivo.
- La falla progresiva suele acarrear errores en la interpretación de resultados. Debido a largas deformaciones producidas por cargas sostenidas, la resistencia del suelo deja de corresponder a un único par c , ϕ a lo largo de toda la falla. Este se puede encontrar entre la resistencia peak y la resistencia residual, diferente para distintas zonas del deslizamiento, por ello con el análisis retrospectivo sólo se obtiene un promedio de los parámetros de

resistencia del suelo movilizado, los que tienden a ser poco conservadores para su uso en el diseño.

Conclusiones

Al utilizar los parámetros de resistencia al corte del suelo c y ϕ obtenidos de ensayos de laboratorio se pueden originar incertidumbres en el análisis de la estabilidad de taludes. Esto debido a que las propiedades *in situ* del suelo pueden variar de las obtenidas en las muestras, debido entre otros a la manipulación de éstas y a la anisotropía del suelo. El análisis retrospectivo de taludes es una herramienta poderosa para estimar la resistencia al corte en terreno o movilizada directamente de taludes que han fallado.

Gran parte de la teoría de fallas de taludes ha sido desarrollada para suelos sedimentarios (homogéneos), que poseen un comportamiento diferente a los suelos residuales. De los deslizamientos ocurridos en la zona de Temuco se confirma el efecto pernicioso que tienen en estos suelos los planos de clivaje heredados de la roca madre (estructuras relícticas) cuando se manifiestan con inclinación conforme y persistente.

Es necesario recopilar la mayor cantidad de antecedentes disponibles con la finalidad de estimar de la mejor forma posible los parámetros de Mohr-Coulomb. Dentro de las variables más difíciles de estimar es la presión de poros o la ubicación del nivel freático al momento de la falla. Como se mostró anteriormente, hay una gran dispersión en los resultados debido a distintos supuestos en la ubicación de la napa.

Referencias

- Chandler, R. J. (1977) "Back analysis techniques for slope stabilization works: A case record" *Geotechnique*, 27(4), 479-495
- Deschamps, R. and Yankey, G. (2006) "Limitations in the Back-Analysis of Strength from Failures" *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.* 132, 532-536
- Duncan, J. M. (2005) "Soil strength and slope stability" *John Wiley & Sons*
- Gilbert, R. B., Wright, S. G. and Liedtke, E. (1998) "Uncertainty in Back Analysis of Slopes: Kettleman Hills Case History" *J. Geotech. and Geoenviron. Engrg.* 124, 1167-1176
- Loganathan, N., de Silva, S. and Thurairajah, A. (1992) "Strength Correlation Factor for Residual Soils" *J. Geotech. Engrg.* 118, 593-610
- Ortigosa, P. (2004) "Análisis de deslizamientos en varios cortes viales" *V Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica*
- Tang, W. H., Stark, T. D. and Angulo, M. (1999) "Reliability in back analysis of slope failures" *Soils and foundations* 39(5), 73-80
- Wesley, L. D. and Lelaratnam, V. (2001) "Shear strength parameters from back-analysis of single slips" *Geotechnique* 51(4) 373 – 374
- Wesley, L. D. (2010) "Fundamentals of soil mechanics for sedimentary and residual soils" *John Wiley & Sons*