



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstrucion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

SANHUEZA PLAZA, C.; RODRÍGUEZ CIFUENTES, L.

Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales

Revista de la Construcción, vol. 12, núm. 1, abril, 2013, pp. 17-29
Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127628890003>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

*Comparative analysis of
slope stability methods
applied to natural slopes*

Análisis comparativo de métodos de cálculo de estabilidad de taludes finitos aplicados a laderas naturales



Autores

SANHUEZA PLAZA, C. Pontificia Universidad Católica de Chile
csanhuep@uc.cl
Santiago, Chile

RODRÍGUEZ CIFUENTES, L. Pontificia Universidad Católica de Chile
Santiago, Chile

Fecha de recepción 14/09/2012

Fecha de aceptación 07/01/2012

Resumen

El presente artículo corresponde a una investigación aplicada sobre un talud natural ubicado en la Quinta Región del país, donde uno de los objetivos fue comparar diferentes métodos de cálculo de estabilidad de taludes, bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas. Para este último caso, se consideraron dos de los sismos más importantes que se han producido en Chile, el terremoto de Valparaíso en 1985 ($Mw = 8,0$) y el del Maule en el año 2010 ($Mw = 8,8$). La comparación de los resultados ha sido llevada a cabo mediante la obten-

ción de los factores de seguridad de las superficies potenciales de falla, a través del empleo del software GeoSlope, considerando los casos más desfavorables y empleando los modelos propuestos por Fellenius, Bishop y Janbú (método de las dovelas). Como resultado, se ha podido observar la influencia del sismo sobre un talud finito, la cual depende tanto de la magnitud Richter del terremoto, como de los valores de los coeficientes de aceleración sísmica (horizontal y vertical).

Palabras clave: Taludes, Dovelas, Sismos.

Abstract

This article is about an applied research on a natural slope located in the fifth region of the country, where one of the objectives was to compare different methods of calculating slope stability under static and pseudostatic conditions. In the latter case, we considered two major earthquakes that have occurred in Chile, such as the 1985 Valparaiso earthquake and 2010 Maule earthquake, with magnitudes of $Mw = 8.0$ and $Mw = 8.8$, respectively. Comparison of the results was carried

out by obtaining safety factor of potential failure surfaces, through the use of software GeoSlope considering the worst case and using the models proposed by Fellenius, Bishop and Janbu (method of slices). As a result, it was possible to observe the influence of the earthquake on a finite slope, which depends on the Richter scale earthquake, and the values of the coefficients of seismic acceleration (horizontal and vertical).

Keywords: Slope, Slice, Earthquake.

1. Introducción

Este artículo nace como resultado de un estudio geotécnico llevado a cabo en un talud natural ubicado en la Quinta Región del país, el cual ha sido patrocinado por el Museo de la Moda.

El principal objetivo ha sido comparar los FS obtenidos para las superficies potenciales de falla (SPF), bajo condiciones estáticas y pseudoestáticas.

En general, la estabilidad del talud está determinada por factores geométricos, como su altura e inclinación; factores geológicos; hidrogeológicos; y geotécnicos. De esta manera, la combinación de los 4 factores anteriores puede determinar la condición de rotura del terreno en algún tipo de superficie, permitiendo el movimiento de la masa contenida en dicha superficie.

Bien es sabido que factores como los terremotos son causa importante de deslizamientos, especialmente, en las zonas costeras de Chile, como ocurre con el caso en estudio.

Por ello, el análisis de la estabilidad de una ladera o talud natural, reviste gran importancia al momento de considerar una futura construcción en su entorno. Conocidos son los casos, a nivel nacional e internacional, de desastres ocurridos y que involucran vidas humanas cuando no se han efectuado los análisis correspondientes, que dependiendo de sus resultados, permitirían tomar medidas correctivas o de estabilización de taludes.

2. Movimientos del terreno

La forma de clasificar los distintos movimientos de masas de tierra depende si se trata de suelos o rocas. Por otra parte, en estas clasificaciones se considera el mecanismo y tipo de rotura, conjuntamente con otros aspectos, tales como el contenido de agua en el terreno, la velocidad y magnitud del movimiento, entre otros.

Los tipos de movimientos se pueden clasificar en: deslizamientos, flujos y desprendimientos.

Los deslizamientos son movimientos relativos de masas de suelo o roca con respecto al sustrato, sobre una o varias superficies de rotura cuando se supera la resistencia al corte de estas superficies. La masa generalmente se desplaza en conjunto, comportándose como una unidad en su recorrido; la velocidad puede ser muy variable, pero suelen ser procesos rápidos y alcanzar grandes volúmenes.

Estos problemas de movimiento de masa de suelo son los más comunes, razón por la cual la presente investigación se centra en estudiar modelos de cálculo que se aplican a estos casos, y analizar la estabilidad mediante la comparación de los factores de seguridad obtenidos en cada uno.

Otros movimientos del terreno corresponden a los flujos, los cuales tienen la apariencia de un líquido viscoso y que pueden ser de carácter seco o húmedo. La diferencia entre ambos radica en la cantidad de agua presente en la masa de suelo, la clara definición de la superficie de rotura, el tipo de suelo y el factor desencadenante.

Los flujos pueden ser consecuencia de deslizamientos o ser inducidos por desprendimientos. Junto con los deslizamientos son los movimientos de masas más extendidos, al afectar a muy diversos tipos de materiales.

Finalmente, se encuentran los desprendimientos de materiales, que corresponden a caídas libres muy rápidas de bloques o masas rocosas desintegradas o descompuestas. Su superficie de rotura es en forma de cuña y bloques formados por diversas familias de discontinuidades. Dentro de los factores desencadenantes se encuentran: la erosión y pérdida de apoyo de los bloques previamente sueltos, el agua en las discontinuidades y grietas, y los movimientos sísmicos, entre otros.

Los diferentes tipos de movimientos del terreno antes clasificados y definidos, tienen su origen en factores naturales y/o humanos, por lo que la aparición de uno o más de ellos influirá decisivamente en la disminución o pérdida de la resistencia al corte de los taludes.

Dentro de los factores naturales se encuentran: el agua, el hielo, la nieve, la sismicidad, el vulcanismo, la cubierta vegetal y la subsidencia regional. Mientras que, dentro de los factores humanos, se pueden mencionar: las excavaciones, las voladuras y las sobrecargas.

Todos estos aspectos se deben tener en cuenta al momento de estudiar la estabilidad de un talud natural.

3. Superficie de rotura en un deslizamiento rotacional

Un deslizamiento rotacional es aquel en que la superficie de rotura es cóncava hacia arriba, por lo que el movimiento resultante se desarrolla en función de un eje de giro paralelo al plano de falla y transversal a la

dirección de avance del suelo. Durante su desarrollo es posible observar una serie de grietas concéntricas y cóncavas, ubicadas en la dirección del movimiento (Suarez, 2011).

En los deslizamientos el movimiento de la masa es el resultado de una falla de corte a lo largo de una o varias superficies. Se presenta en materiales con comportamiento elástico o semielástico. El tipo de superficie de deslizamiento por la cual se produce la falla depende, básicamente, del ángulo de inclinación del talud, de la cohesión y del ángulo de rozamiento interno del suelo.

En términos generales, se puede hablar de dos tipos de rotura: plana y circular. La rotura plana o, modelo de talud infinito, es aquella en la cual la SPF es paralela al talud y la longitud de este puede considerarse infinita con respecto al espesor de la masa que falla. En cambio, en la rotura circular o modelo de talud finito, la SPF corresponde al manto de un cilindro, quedando definida el tipo de círculo de falla por un radio y un centro. Este tipo de falla puede ser de talud (figura 1a), de pie (figura 1b) o profundo (figura 1c).

4. Métodos de análisis de estabilidad de taludes finitos

Los análisis de estabilidad en el caso de las laderas naturales tienen por objetivo estimar su nivel de seguridad y, según el resultado obtenido, implementar medidas correctivas o de estabilización adecuadas para evitar nuevos movimientos de masas.

Cuando se han producido movimientos que tienden a la falla, los análisis a posteriori (back-analysis) cobran importancia, puesto que se conoce el mecanismo,

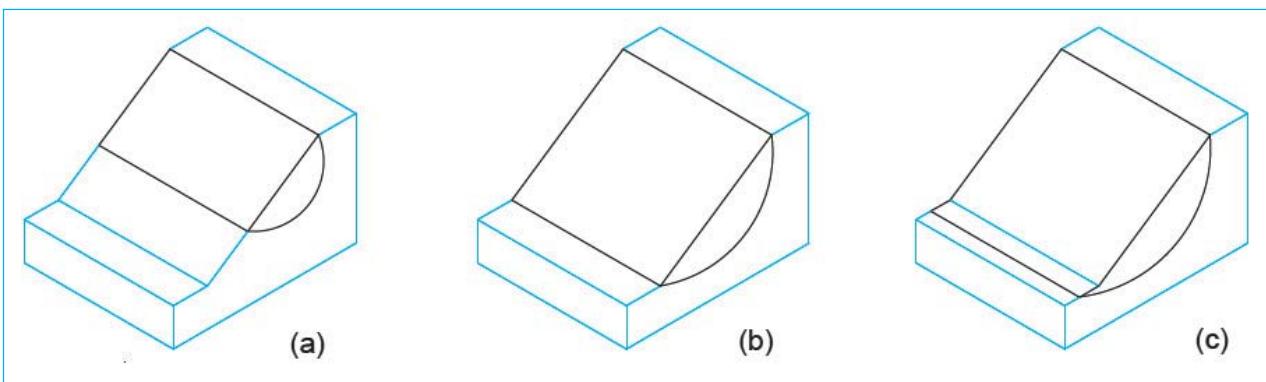
modelo y geometría de la inestabilidad. Es un análisis muy útil para la caracterización geomecánica de los materiales involucrados, para el estudio de los factores influyentes en la rotura y para conocer el comportamiento mecánico de los materiales del talud; los resultados obtenidos pueden ser extrapolados a otros taludes de similares características. Estos análisis consisten en determinar, a partir de los datos de terreno necesarios (geometría, tipos de materiales, modelo de rotura y presiones hidrostáticas, entre otros), los parámetros resistentes del terreno, generalmente pares de valores c y ϕ , que cumplan con la condición de equilibrio estricto del talud ($FS = 1$) a lo largo de la superficie de rotura, para las condiciones reales en que esta tuvo lugar.

Los métodos de análisis de estabilidad se basan en un planteamiento físico-matemático en el que intervienen las fuerzas estabilizadoras y desestabilizadoras, que actúan sobre el talud y que determinan su comportamiento y condiciones de estabilidad. Se pueden agrupar en dos: *métodos determinísticos*, dentro de los cuales están los *métodos de equilibrio límite* y los *tenso-deformacionales*; y los *métodos probabilísticos*.

Los más utilizados son los métodos de equilibrio límite, los cuales analizan el equilibrio de una masa potencialmente inestable, y consisten en comparar las fuerzas tendentes al movimiento con las fuerzas resistentes que se oponen al mismo a lo largo de una determinada superficie de rotura. Se basan en la selección de una superficie teórica de rotura en el talud; el criterio de rotura de Mohr-Coulomb; y la definición de un factor de seguridad.

Existe una subdivisión para los métodos de equilibrio límite en función de la exactitud de los resultados, donde es posible encontrar el grupo de los *métodos*

Figura 1. Tipos de SPF en deslizamientos rotacionales (a) Círculo de talud (b) Círculo de pie (c) Círculo profundo



exactos y el de los *no exactos*. En el primer caso, las leyes de la estática entregan una solución exacta dada la geometría sencilla que tiene la masa de suelo que falla, por lo que allí se encuadran los cálculos realizados para roturas del tipo plano y las por cuñas. Por otro lado, en el segundo grupo, las soluciones de la estática no son suficientes y el problema se vuelve hiperestático, debiendo recurrir entonces a una hipótesis inicial o a alguna simplificación para resolverlo. En este tipo de casos se incluyen las roturas circulares que corresponden a las consideradas en la presente investigación (IGME, 1987).

Dentro de los métodos no exactos se encuentran aquellos que consideran completa la masa de suelo que desliza, como un todo, y son conocidos como *métodos de estabilidad global de la masa de terreno*; y, aquellos que dividen la masa deslizante en fracciones más pequeñas para simplificar el análisis, los cuales se denominan *métodos de las dovelas*.

El método de las dovelas se clasifica en *métodos precisos* (teorías de Morgenstern - Price, Spencer y Bishop Riguroso) y en *métodos aproximados* (Janbú, Fellenius y Bishop Simplificado). Para la presente investigación, se utilizó el método de las dovelas, considerando las hipótesis de Janbú, Fellenius y Bishop Simplificado.

4.1. Teorías de equilibrio límite: método de las dovelas

Los problemas de estabilidad de taludes son estáticamente indeterminados, y para su resolución es preciso considerar una serie de hipótesis de partida diferentes según los métodos. Con dichas condiciones, se establecen las ecuaciones de equilibrio entre las fuerzas que inducen el deslizamiento y las resistentes. Los análisis proporcionan el valor del FS del talud para la superficie analizada, referido al equilibrio estricto o límite entre las fuerzas que actúan.

Una vez evaluado el FS de la superficie supuesta, es necesario analizar otras superficies de rotura, cinemáticamente posibles, hasta encontrar aquella que tenga el menor FS, la cual se admite como SPF del talud y dicho FS como el correspondiente al talud en cuestión.

En general, este tipo de método considera las siguientes hipótesis:

- El FS asociado a un determinado talud, es constante para toda la superficie de falla,
- La resistencia al corte del suelo estudiado satisface el criterio de Mohr - Coulomb,

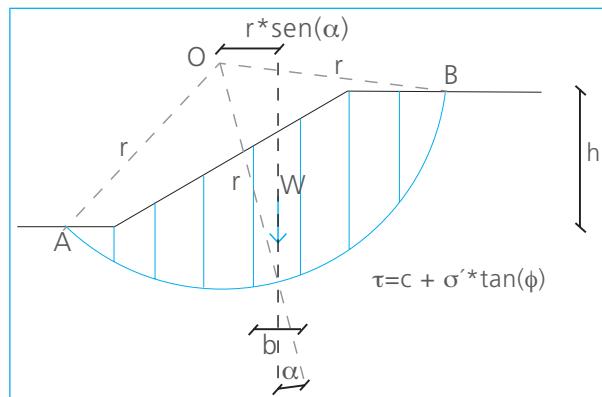
- Al momento de la falla la resistencia al corte del suelo se desarrolla con una magnitud constante en toda la superficie de rotura.

En cuanto a los Métodos de las Dovelas, estos son usados en aquellos casos en que la superficie de rotura del terreno es del tipo circular. De esta manera, el problema se aborda bidimensionalmente, tomando una sección transversal representativa del talud y dividiéndola en franjas del mismo tamaño. A cada dovela se le analiza su nivel de estabilidad, lo que permite concluir acerca de la seguridad global del talud.

4.2. Método ordinario o de Fellenius

En la figura 2 se muestra un talud con una superficie potencial de falla definida con el arco AB. La masa de suelo que se encuentra dentro de esta superficie de rotura es dividida en varias dovelas. El talud considerado debe ser una sección transversal representativa del talud real, el que será estudiado por cada metro lineal.

Figura 2. Esquema del análisis de estabilidad de taludes por el método de Fellenius



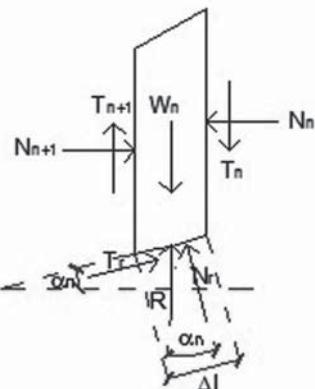
Las fuerzas que actúan sobre el talud, se pueden apreciar en la figura 3, donde se toma la n^{ma} dovela como ejemplo:

Donde,

- | | |
|---------------------|-------------------------------------------------------------|
| W | : Resultante peso dovela |
| R | : Fuerza que actúa como reacción al peso de la dovela |
| N_n y $N_{(n+1)}$ | : Fuerzas normales que actúan en cada lado de la dovela |
| T_n y $T_{(n+1)}$ | : Fuerzas tangenciales que actúan en cada lado de la dovela |

N_r : Componente normal de la reacción R
 T_r : Componente tangencial de la reacción R

Figura 3. Esquema de las fuerzas que actúan en la η^{ma} dovela, de acuerdo al método de Fellenius



Como las fuerzas N_n , $N_{(n+1)}$, T_n y $T_{(n+1)}$ son complejas de determinar, es posible tomar como consideración que las resultantes de N_n y T_n son iguales en magnitud a las resultantes de $N_{(n+1)}$ y $T_{(n+1)}$, y que sus líneas de acción coinciden.

Entonces, por la consideración de equilibrio tomada (ec.1):

$$N_r = W_n * \cos(\alpha_n)$$

Además, la resistencia al corte que ofrece el suelo, se escribe como (ec.2):

$$T_r = \tau * (\Delta l) = \frac{\tau * (\Delta l)}{FS} = \frac{1}{FS} * [c + \sigma' * \tan(\phi)] * \Delta l$$

Donde el esfuerzo normal, σ' , considerado en la ecuación anterior, es igual a (ec.3):

$$\frac{N_r}{\Delta l} = \frac{W_n * \cos(\alpha_n)}{\Delta l}$$

Dentro de las características del método de Fellenius, está el hecho de que este satisface el equilibrio de momentos, por lo que al considerar esta condición, se tiene que el momento producto de las fuerzas movilizadas sobre el centro O del círculo de falla, es igual al momento que resulta del actuar de las fuerzas resistentes sobre O. Entonces (ec.4):

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n * \sin(\alpha_n) = \sum_{n=1}^{n=p} \frac{1}{FS} * \left[c + \frac{W_n * \cos(\alpha_n)}{\Delta l} * \tan(\phi) \right] * \Delta l * r$$

De la ecuación anterior (ec.5):

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c * \Delta l + W_n * \cos(\alpha_n) * \tan(\phi)]}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n * \sin(\alpha_n)}$$

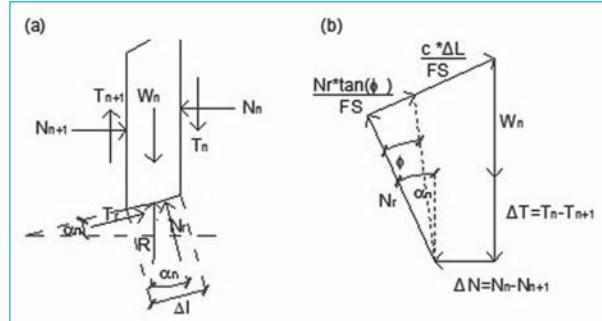
Para encontrar el FS del círculo de rotura crítico, es decir, el mínimo FS del talud, se deben realizar varios intentos reubicando el centro del círculo de falla.

4.3. Método de Bishop simplificado

El método propuesto por Bishop en 1955 analiza la estabilidad de un talud con SPF del tipo circular, tomando en cuenta el efecto de las fuerzas entre dovelas.

Al tratarse de un Método de Dovelos, la masa de suelo deslizante debe ser dividida en η fajas verticales (figura 4a), de manera de estudiar las fuerzas (figura 4b) y momentos involucrados en cada una de las rebanadas definidas y determinar así el FS asociado al caso.

Figura 4. Análisis de Estabilidad de Taludes por el Método de Bishop. (a) Esquema de las fuerzas que actúan en la η^{ma} dovela. (b) Diagrama de fuerzas en equilibrio de la η^{ma} dovela.



De las figuras 4a y 4b, es posible conseguir las siguientes ecuaciones (ec.6, ec.7):

$$T_r = N_r * \tan(\phi) + c * \Delta l = N_r * \left[\frac{\tan(\phi)}{FS} \right] + \frac{c * \Delta l}{FS}$$

$$N_r = \frac{W_n + \Delta T - \left[\frac{c * \Delta l}{FS} \right] * \sin(\alpha_n)}{\cos(\alpha_n) + \frac{\tan(\phi) * \sin(\alpha_n)}{FS}}$$

Una vez obtenidos los diagramas de cuerpo libre para cada una de las dovelas, es posible desarrollar las

ecuaciones de equilibrio de fuerzas y de momentos, obteniendo la expresión que permite determinar el FS de cada SPF analizada. De esta manera (ec.8):

$$\sum_{n=1}^{n=p} W_n * r * \sin(\alpha_n) = \sum_{n=1}^{n=p} T_r * r$$

Donde (ec.9),

$$T_r = \frac{1}{FS} * [c + \sigma' * \tan(\phi)] * \Delta l = \frac{1}{FS} * [c * \Delta l + N_r * \tan(\phi)]$$

Al analizar el equilibrio de fuerzas verticales de cada dovela, es posible obtener el valor de las fuerzas N, para así reemplazarlas en la ecuación 9 y obtener lo siguiente (ec.10):

$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c * b + W_n * \tan(\phi) + \Delta T * \tan(\phi)] * \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} [W_n * \sin(\alpha_n)]}$$

Donde (ec.11),

$$m_{\alpha(n)} = \cos(\alpha_n) + \frac{\tan(\phi) * \sin(\alpha_n)}{FS}$$

Este método considera dentro de sus hipótesis fundamentales, el hecho de que las fuerzas de contacto entre dos dovelas sí se toman en cuenta, pero no resultan influyentes, puesto que se encuentran equilibradas. Para aspectos de cálculo, estas fuerzas se consideran igual a cero, con lo que la ecuación 3.10 se puede simplificar (ec.12):

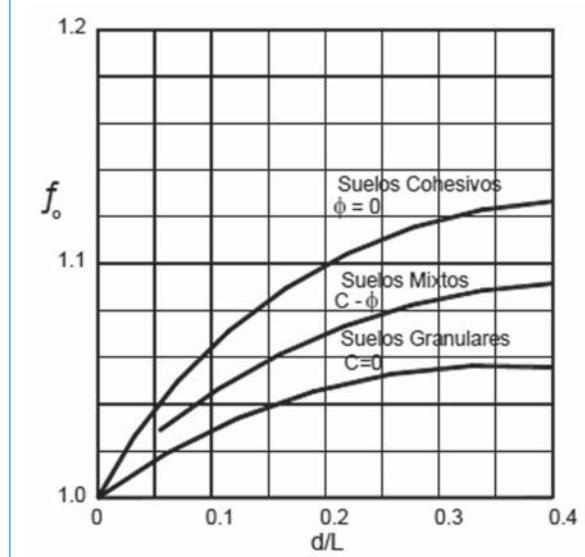
$$FS = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} [c * b + W_n * \tan(\phi)] * \frac{1}{m_{\alpha(n)}}}{\sum_{n=1}^{n=p} [W_n * \sin(\alpha_n)]}$$

Es posible notar que el valor del FS no aparece de manera explícita, dado que se presenta a ambos lados de la ecuación, por lo que se debe realizar un proceso iterativo para poder encontrarlo.

4.4. Método de Janbú

La principal consideración de este método es que las fuerzas entre dovelas son solo horizontales, no tomando en cuenta las fuerzas cortantes. A diferencia de los métodos anteriores, en este caso la SPF no debe ser obligatoriamente circular. Esto se refleja en la aplicación de un factor de corrección f_0 , el que depende netamente del nivel de curvatura que presente la superficie de rotura (figura 5).

Figura 5. Diagrama del factor f_0 utilizado en el método de Janbú (Suárez, 2011)



Para determinar la estabilidad de un talud, Janbú considera el cálculo de un FS, el cual satisface el equilibrio de esfuerzos (ec.13):

$$FS = \frac{f_0 * \sum_{n=1}^{n=p} [c * b + W * \tan(\phi)] * \frac{1}{\cos(\alpha) * m * a}}{\sum_{n=1}^{n=p} W * \tan(\alpha)}$$

4.5. Uso de software en los análisis de estabilidad de taludes finitos

A partir de la década del 60, la aparición de herramientas computacionales ha permitido manejar los cálculos iterativos de los distintos métodos de análisis de estabilidad de taludes.

Inicialmente, el método de equilibrio límite fue bien aceptado, dado que podía entregar soluciones por medio de cálculos hechos en forma manual. Sin embargo, las nuevas tecnologías permitieron facilitar los análisis, pudiendo incluso llegar a resultados más precisos al realizar un mayor número de iteraciones o al dividir la masa deslizante en dovelas más pequeñas. Esto llevó a la aparición de formulaciones matemáticas más rigurosas como las desarrolladas por Morgenstern - Price (1965) y por Spencer (1967).

Dentro de los programas más utilizados se encuentra el GeoSlope, el cual fue diseñado especialmente para el análisis de estabilidad de taludes. Se basa, princi-

palmente, en el uso del método de equilibrio límite y permite modelar suelos homogéneos y estratificados, con superficies geométricas complejas y con presencia de nivel freático.

El software permite analizar la estabilidad del talud bajo diferentes modelos, tales como los propuestos por Fellenius, Bishop, Janbú, Spencer y Morgenstern - Price, entre otros.

El comportamiento de los materiales es modelado bajo el criterio de Hoek y Brown, para el caso de rocas; mientras que, en el caso de suelos, se puede considerar el criterio de Mohr - Coulomb, el de roturas bilineales, el de tipo anisotrópico, de condiciones no drenadas o alguna función específicas que indique la relación entre esfuerzos normales y de corte.

Las condiciones sísmicas son consideradas a través de un análisis pseudoestático, en el que se introducen las aceleraciones máximas del sismo, mediante los coeficientes verticales y horizontales de este.

De esta manera, una vez efectuados los cálculos, el programa entrega las distintas superficies de rotura analizadas, la superficie de falla más desfavorable, la distribución de las dovelas consideradas dentro de la masa deslizante y los diagramas de cuerpo libre para cada una de las dovelas dentro de la superficie de falla estudiada, entre otros resultados.

5. Aplicación de los métodos de cálculo a un caso real

El caso de estudio considera una ladera natural emplazada en la zona costera de la V Región de Valparaíso, Chile.

Dada la presencia de la Cordillera de la Costa, el sector costero de la región de Valparaíso emerge sobre gran cantidad de cerros, por lo que los fenómenos de inestabilidad de taludes resultan ser algo frecuente y, por ende, muy considerado para proyectos relacionados con la ingeniería y la construcción.

5.1. Antecedentes geológicos y sismológicos de la zona de estudio

Los suelos de Valparaíso se componen, principalmente, de arenas finas, limos y algo de arcilla, que corresponden a deposiciones eólicas. Estos sedimentos pueden clasificarse, según su posición estratigráfica, su naturaleza y características físicas, en dos grupos: duna nueva y duna antigua. La primera de ellas tiene carácter de activa, se presenta con colores claros y

sus partículas están sueltas; mientras que la segunda, se encuentra mayormente estabilizada (Sanhueza y Villavicencio, 2012).

Los sedimentos descritos son parte del campo de dunas que cubre el Gneiss de transición y la formación de Horcón, las que se extienden hasta Ritoque por el oeste del camino a Quintero. Estos depósitos de sedimentos corresponden al período Cuaternario.

El suelo de esta región, que en general es arena de playa no consolidada, se emplaza en un basamento de rocas graníticas ubicado a más de 100 m de profundidad.

En cuanto al comportamiento sismológico de la V Región, este se ve condicionado al fenómeno de subducción que se produce entre las placas de Nazca y Sudamericana.

Durante el siglo XX, Valparaíso ha presentado una importante actividad sísmica, pudiendo identificarse cuatro eventos de gran magnitud (tabla 1).

Tabla 1. Sismos con epicentro en la Región de Valparaíso (Gahona, 1996)

Fecha	Zona epicentro	Magnitud (mw)
16 de agosto de 1906	Valparaíso	8,2
28 de marzo de 1965	La Ligua	7,4
8 de julio de 1971	Papudo	7,5
3 de marzo de 1985	Algarrobo	8,0

5.2. Antecedentes geotécnicos

La investigación geotécnica desarrollada para obtener los antecedentes del sector en estudio, se ha basado en una campaña de trabajos en terreno que ha considerado visitas técnicas para la recopilación de antecedentes, inspecciones del sitio para definir los trabajos a desarrollar, exploración del terreno por métodos directos (calicatas) e indirectos (ensayo de penetración) y ejecución de ensayos en terreno y de laboratorio, para la obtención de parámetros del suelo.

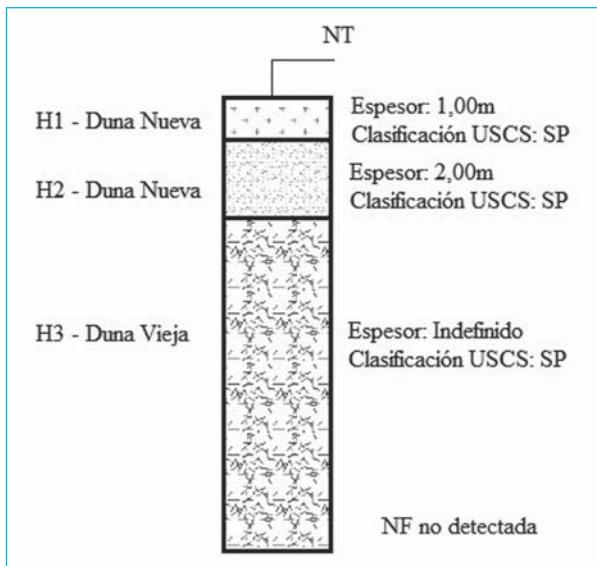
(a) Descripción de la campaña geotécnica:

En la ladera en investigación, se llevaron a cabo 5 calicatas (C_i) de distintas profundidades, con el objeto de

obtener los perfiles estratigráficos del terreno, extraer muestras representativas de suelo y ejecutar ensayos en terreno, de penetración PANDA y de densidad in situ (DIS) en el fondo de estas.

La estratigrafía tipo del sector se ha desarrollado en función de la inspección visual de las calizatas, considerando los antecedentes bibliográficos con los que se cuenta, la cual se muestra en la figura 6.

Figura 6. Estratigrafía tipo del sector en estudio



Una vez obtenidas e identificadas las muestras, estas han sido ensayadas en laboratorio, obteniendo sus parámetros físicos y de resistencia: granulometría (Gr),

límites de Atterberg (L.A.), densidad relativa (D.R.) y corte directo (C.D.).

(b) Resultados de los ensayos:

Las tablas 2 y 3 resumen los principales resultados obtenidos de los ensayos, para cada una de las calizatas ejecutadas.

5.3. Hipótesis para la modelación del caso en estudio

Una vez conocidos los antecedentes del terreno en estudio, se ha procedido a analizar la situación de la ladera mediante el uso del software GeoSlope 2007, con el objetivo de obtener la estabilidad del talud.

Para ello, se han establecido las siguientes hipótesis:

- Para la ladera del terreno se ha considerado uno de los perfiles topográficos más representativos.
- Para la modelación del terreno se han considerado los tres estratos de suelo presentados en la estratigrafía tipo y su espesor medio.
- Los parámetros del suelo asignados a cada uno de los estratos del suelo han sido obtenidos a partir de los antecedentes geotécnicos recopilados, de los resultados de la campaña geotécnica y de otras investigaciones de los autores (Sanhueza y Villavicencio, 2012), los cuales se resumen en la tabla 4:
- Se ha asumido para los suelos el criterio de rotura de Mohr - Coulomb.
- Los análisis estáticos y pseudoestáticos se han efectuado considerando las hipótesis de los modelos planteados por Fellenius, Bishop y Janbú.

Tabla 2. Resultados campaña geotécnica parámetros físicos

Muestra	Clasificación USCS	Densidad Máxima $\gamma_{d_{\max}} (g/cm^3)$	Densidad Mínima $\gamma_{d_{\min}} (g/cm^3)$	Densidad Seca $\gamma_d (g/cm^3)$	Humedad (%)	Densidad Relativa (%)
C1	SP	1,80	1,53	1,71	3,0	70
C2	SP	1,75	1,48	1,66	2,4	70
C3	SP	1,71	1,45	1,68	1,7	77
C4	SP	1,77	1,42	1,67	3,5	56
C5	SP	1,77	1,48	1,64	1,6	60

- Para la condición pseudoestática se han tomado como base los datos del terremoto de Valparaíso (1985; Mw = 8,0) y del Maule (2010; Mw = 8,8).
- Los valores de la aceleración máxima horizontal y vertical considerados para cada sismo, han sido los medidos en Viña del Mar y se detallan en la tabla 5:

Tabla 3. Resultados campaña geotécnica parámetros de resistencia

Muestra	Tipo de ensayo	Ángulo de fricción $\phi'(^{\circ})$	Cohesión $c(kPa)$
C2	Corte directo, CD	34	0,0

Tabla 4. Parámetros geotécnicos de los suelos del perfil tipo

Estrato	Espesor (m)	Parámetros del suelo		
		Densidad $\gamma(kN/m^3)$	Cohesión $c(kPa)$	Ángulo de fricción $\phi'(^{\circ})$
H1 – Duna Nueva (SP)	1,00	15,9	11	32
H2 – Duna Nueva (SP)	2,00	17,3	0	37
H3 – Duna Vieja (SP)	Indefinido	22,0	150	33

Tabla 5. Aceleraciones máximas horizontales y verticales para los sismos estudiados

Sismo	Aceleración máxima horizontal (kh)	Aceleración máxima vertical (kv)
Valparaíso (1985) (Cruz et al., 1988)	0,356g	0,171g
Maule (2010) (Boroschek, 2010)	0,334g	0,186g

5.4. Análisis de estabilidad del talud

(a) Caso Estático:

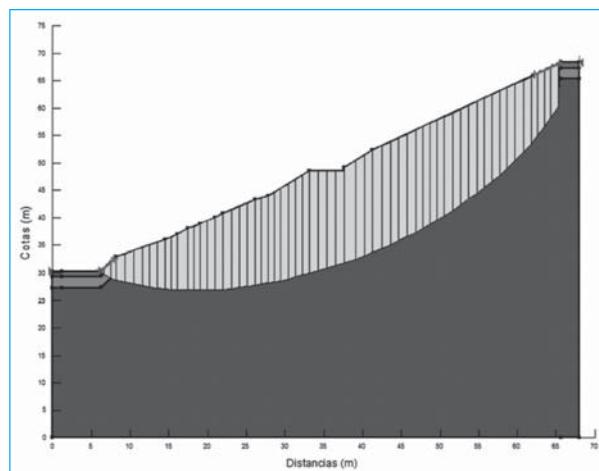
Una vez modelado el perfil geométrico del talud e introducidos los datos correspondientes a los suelos y condiciones geotécnicas, se llevan a cabo una serie de iteraciones de cálculo con el objeto de obtener la SPF más desfavorable, considerando las hipótesis mencionadas anteriormente y aquellas propuestas por los distintos criterios de cálculo (Fellenius, Bishop y Janbú). De esta manera, el programa entrega para cada círculo de deslizamiento el FS, los cuales se resumen en la tabla 6.

Tabla 6. FS Estáticos (FS_E), obtenidos por los modelos de Fellenius, Bishop y Janbú. (GEO - SLOPE, 2007)

Modelo	FS_E
Fellenius	2,695
Bishop	2,942
Janbú	2,622

La figura 7 muestra el modelo de análisis para la condición estática más desfavorable, observándose en color verde la SPF.

Figura 7. Superficie de Rotura más desfavorable para el caso estático. (GEO – SLOPE, 2007)



El modelo propuesto por Janbú, en base al equilibrio de fuerzas, es el que ha arrojado el menor FS_E .

(b) Caso Pseudoestático:

Para estos análisis se han considerado dos escenarios: el sismo de Valparaíso del año 1985 y el terremoto del Maule en el año 2010.

De esta manera, y considerando las aceleraciones horizontales y verticales mostradas en la tabla 5, se tienen los siguientes resultados (tabla 7):

Tabla 7. Factores de Seguridad Pseudoestáticos (FS_D), obtenidos por los modelos de Fellenius, Bishop y Janbú. (GEO - SLOPE, 2007)

Modelo	FS_D Valparaíso 1985	FS_D Maule 2010
Fellenius	1,657	1,700
Bishop	1,684	1,718
Janbú	1,528	1,572

De esta manera, los valores de los FS más desfavorables que han sido obtenidos, para los casos estáticos y pseudoestáticos, se detallan en la tabla 8:

Tabla 8. FS obtenidos por los modelos de Fellenius, Bishop y Janbú. (GEO - SLOPE, 2007)

Modelo	FS_E	FS_D Valparaíso 1985	FS_D Maule 2010
Fellenius	2,695	1,657	1,700
Bishop	2,942	1,684	1,718
Janbú	2,622	1,528	1,572

6. Análisis de resultados

En la tabla 8 se han presentado los resultados obtenidos para la ladera en estudio, en la cual se han considerado las hipótesis de los modelos de Fellenius, Bishop y Janbú, para condiciones estáticas y pseudoestáticas.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se ha podido observar que para todos los análisis, el modelo propuesto por Janbú, el cual plantea equilibrio de fuerzas, ha sido aquel que ha proporcionado los menores FS.

Cabe destacar que, para todos los casos estudiados, el talud es estable puesto que cumple con FS muy por sobre la unidad ($FS > 1,000$), lo que refleja que la ladera no debería sufrir desplazamientos bajo las condiciones de cálculo consideradas.

Por otro lado, de la tabla 8 se observa que las hipótesis del modelo planteado por Bishop resulta ser el más conservador de todos, al proporcionar los mayores FS. Esto se puede explicar debido a que es uno de los métodos que más simplificaciones considera en el cálculo.

Dado que los tres modelos considerados han entregado distintos valores del FS para la condición estática, se ha realizado una comparación entre ellos, la que se resume en la tabla 9.

Tabla 9. Variación porcentual del FS entre los distintos métodos de análisis considerados para el caso estático

Modelos comparados	Variación Porcentual FS_E
Fellenius / Bishop	D+ 9%
Bishop / Janbú	D- 11%
Janbú / Fellenius	D- 3%

De lo anterior, se puede establecer que, Fellenius y Janbú son aquellos que presentan una menor variación entre sus resultados, mientras que Bishop y Janbú la mayor, lo que se puede explicar porque, si bien se basan en hipótesis distintas (Janbú es el único que considera el equilibrio de fuerzas), Fellenius y Bishop consideran menos simplificaciones de cálculo a la hora de abordar el problema.

La segunda condición analizada ha sido la pseudoestática, para la cual se han tomado como referencia los datos de los sismos de 1985 y 2010 (Valparaíso y Maule, respectivamente), los cuales corresponden a dos de los terremotos más importantes que han ocurrido en Chile en las últimas décadas.

Observando los resultados mostrados en la tabla 8, se puede apreciar que para el caso más desfavorable de los 3 modelos estudiados (Janbú), la variación entre la condición estática obtenida por dicho método y cada uno de los análisis pseudoestáticos del mismo, corresponde a aproximadamente un 70%. De esta manera, se puede deducir que (ec.14):

$$FS_{ESTÁTICO} = 1,70 * FS_{PSEUDOESTÁTICO}$$

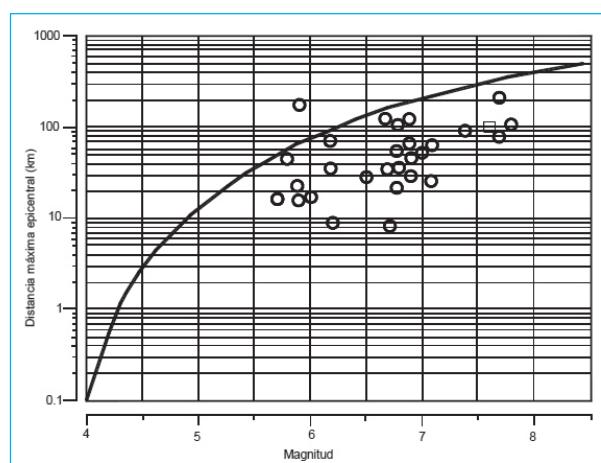
Al evaluar la variación porcentual que existe, bajo el modelo de Janbú para la condición pseudoestática entre los sismos de 1985 y 2010, es posible observar que presenta un FS con una diferencia del orden del 3%, lo que permite deducir que, para las condiciones estudiadas, el terremoto de Valparaíso resulta ser más riesgoso que el de Maule. Esta situación también guarda relación con el epicentro de cada sismo.

En el caso del terremoto de Valparaíso, el epicentro ha sido situado en la misma zona y región que el terreno en estudio, por lo que la distancia recorrida por las ondas del sismo ha sido, aproximadamente, de 60 kilómetros. Esto conlleva a que se desarrollen mayores valores de aceleraciones sísmicas, que se traducen en coeficientes de aceleración sísmicos altos y, por ende, un FS menor.

Mientras que, en el caso de Maule, donde el epicentro ha sido ubicado alrededor de 600 kilómetros al sur de la zona del caso de estudio, implica que las ondas sísmicas han debido recorrer un gran trayecto para llegar allí y, por ende, se ven debilitadas.

Lo anterior se ve avalado por Keefer (1984), quien ha postulado que existe una relación entre la magnitud del movimiento y la distancia al epicentro, que permite trazar un límite a partir del cual no son de esperar grandes deslizamientos (sobre la línea), lo que resulta acorde a los resultados obtenidos para el caso de estudio (figura 8).

Figura 8. Relación entre la magnitud del sismo y la distancia al epicentro, propuesta por Keefer en 1984. (Suárez, 2011)



Este postulado, resulta ser una manera rápida y sencilla de evaluar el comportamiento que tendrá un talud ante el desarrollo de un sismo, que complementa el análisis de estabilidad tradicional que involucra el cálculo del FS para cada caso.

El hecho de que la ladera estudiada haya presentado tan altos niveles de estabilidad, con FS que superan el valor 2.0 para el caso estático y 1.5 en el pseudoestático, se debe principalmente a dos motivos.

Por una parte, los tres estratos de suelo encontrados en la zona de emplazamiento presentan muy buenas características mecánicas, con valores de densidad que superan las $1,50\text{t/m}^3$, ángulos de fricción mayores a 30° y una cohesión que llega a 15t/m^2 en la duna vieja. Por otra parte, la inexistencia de nivel freático, ya que el agua reduce la resistencia al corte y aumenta las probabilidades de deslizamientos.

En base a lo anteriormente expuesto, es posible cuantificar los efectos que puede tener sobre el FS la aplicación de distintas metodologías de análisis, donde la variación registrada es de un 10%.

7. Conclusiones

Los movimientos del terreno dependen de la resistencia al corte que presente el suelo en cuestión, por lo tanto, los parámetros del suelo (densidad, cohesión y ángulo de fricción) que definen dicho valor, resultan ser los que determinan el comportamiento que tendrá la ladera. La presencia de nivel freático es también un factor de vital importancia, esto en concordancia con los postulados de Terzaghi en relación con las tensiones efectivas.

Las metodologías de cálculo utilizadas para analizar la estabilidad de un talud, basadas en el método de las dovelas, sigue siendo el de mayor uso, incrementándose aún más con la incorporación de herramientas computacionales. Por ello, en esta investigación se ha empleado el software GeoSlope, el cual se basa en los 3 parámetros del suelo (densidad, cohesión y ángulo de fricción). Sin embargo, se obvian otros de gran importancia como el módulo de deformación.

La determinación del FS para el caso de estudio se ha realizado tanto para condiciones estática como pseudoestáticas, considerando los eventos sísmicos de Valparaíso de 1985 y del Maule de 2010.

De los resultados obtenidos en el caso estático, se ha podido concluir que el método menos conservador resulta ser el propuesto por Janbú, en el cual se cumple

el equilibrio de fuerzas, a diferencia de Bishop y Fellenius, quienes se basan en el equilibrio de momentos. Lo anterior se ve reforzado con las simplificaciones que cada método realiza.

Considerando lo anterior, al comparar los resultados de ambas situaciones se ha podido determinar que ante la presencia de un sismo, el FS disminuye en aproximadamente un 70%.

Por otro lado, se ha determinado que el menor FS y, por ende, la situación menos segura, se logra para el terremoto de Valparaíso, el cual ha tenido la menor magnitud. Esto tiene relación con la distancia entre la zona de estudio y el epicentro, pues esta es menor para el sismo de 1985 que para el de 2010.

Se concluye que el efecto de un sismo sobre un talud finito depende tanto de la magnitud Richter del terremoto, como de los valores de los coeficientes

de aceleración sísmica (horizontal y vertical), los que dependen de la distancia entre el punto evaluado y el epicentro.

La aceleración sísmica ha tomado aún más importancia luego del terremoto de 2010, pues, tal y como se pudo comprobar en la presente investigación, este valor representa el efecto de un sismo sobre una zona en particular en función del tipo de suelo que allí se encuentre. En otras palabras, ante una determinada magnitud Richter no todos los suelos reaccionan del mismo modo, por lo tanto, evaluar y clasificar los tipos de suelos considerando su respuesta ante movimientos telúricos, más que sus capacidades mecánicas, resulta adecuado para zonas de alta actividad sísmica como Chile.

Finalmente, la ladera es estable tanto para una condición estática como pseudoestática, lo cual también se debe a las buenas características mecánicas que tiene el suelo del talud.

Referencias Bibliográficas

- Boroschek, R., Soto, P., León, R. (2010). Registros del Terremoto del Maule Mw = 8.8 27 de febrero de 2010 (Informe Renadic 10/05 Rev. 2).
- Cruz, E., Hidalgo, P., Luders, C., Riddell, R., Rodríguez, F., Troncoso, J., Vásquez, P. (1988). Lecciones del Sismo del 3 de marzo de 1985. Santiago, Chile: Eds. Luders, C., Vásquez, J.
- Gahona, P. (1996). Sismidad Regional. En Estimación Preliminar de la Vulnerabilidad Sísmica de los Hospitales Carlos Van Buren y Dr. Gustavo Fricke. (Capítulo 2).
- GEO - SLOPE International Ltd. (2007). GeoStudio (Versión 7.17) [Software] Disponible en GEO - SLOPE International: <http://www.geo-slope.com/downloads/2007.aspx>.
- Highland, L., Bobrowsky, P. (2008). Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes. Reston, Virginia, EE.UU.: Sistema Geológico de los EUA.
- Instituto Geológico y Minero de España, IGME. (1987). Manual de Taludes. Madrid: Autor.
- Instituto Nacional de Normalización, NCh 433.Of96 "Diseño Sísmico de Edificios".
- López, G. (s.f.). Introducción al Uso del Programa SLOPE/W 2007.
- Sanhueza, C., Villavicencio, G. (2010). Estimación de Parámetros Resistentes a Partir del Ensayo de Penetración PANDA y su Aplicación en el Cálculo de la Capacidad de Soporte y Asentamientos del Suelo de Fundación (1º parte). Revista de la Construcción, 9-1, 120 - 131.
- Sanhueza, C. y Villavicencio, G. (2012). Influencia de la cohesión aparente generada por raíces sobre la estabilidad de un talud natural en las dunas de Reñaca. Revista de la Construcción, 11-1, 16 - 31.
- Suarez Díaz, J. (2011). Deslizamientos. Análisis Geotécnico.