



Revista de la Construcción

ISSN: 0717-7925

revistadelaconstruccion@uc.cl

Pontificia Universidad Católica de Chile
Chile

Rodas, R.; Rousé, P.

Análisis Comparativo de Métodos para la Medición del Ángulo de Reposo de Suelos Granulares

Revista de la Construcción, vol. 9, núm. 1, agosto, 2010, pp. 98-106

Pontificia Universidad Católica de Chile

Santiago, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127619214011>

- ▶ 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

*A Comparative Analysis of
Methods to Measure the
Angle of Repose of
Granular Soils*

Análisis Comparativo de Métodos para la Medición del Ángulo de Reposo de Suelos Granulares



Autores

RODAS, R. - ROUSÉ, P.

Facultad de Ingeniería
Universidad Diego Portales
email: pascale.rouse@mail_udp.cl

Fecha de recepción 11/06/2009

Fecha de aceptación 27/05/2010

Resumen

Se denomina ángulo de reposo al ángulo máximo con que un montículo de suelo se mantiene estable sin que se produzca una falla por deslizamiento. Este ángulo juega un rol fundamental en la estimación de valores máximos de inclinación de masas de suelo –como taludes o muros de tierra– lo que impacta directamente tanto en la seguridad como en los costos de los proyectos. Sin embargo, a pesar de su importancia, no existe en Chile una metodología consolidada para obtener del ángulo de reposo de los suelos. En la literatura, por otra parte, se han propuesto distintos métodos para medirlo; incluso en el año 2000, la ASTM publicó una norma específica para los Estados Unidos. En este artículo se compara los

valores de los ángulos de reposo medidas mediante tres métodos propuestos en la literatura con los valores que se adquieren al seguir la práctica nacional, con el objeto de cuantificar las diferencias y analizar el impacto de estas en los diseños. Los resultados muestran que los valores más bajos –para todas las arenas ensayadas– corresponden a los obtenidos con la práctica nacional, la que entrega valores 35% más bajos, en promedio, que el método ASTM. Una aplicación a estabilidad de taludes muestra que las diferencias en los ángulos de reposo calculados se traducen, por ejemplo, en factores de seguridad que difieren hasta en 82%, y en importantes diferencias en los volúmenes de suelo a excavar.

Palabras clave: Ángulo de reposo, arena, estabilidad de taludes.

Abstract

The angle of repose is the maximum angle that allows a heap of soil to remain stable without sliding failure. This angle plays a fundamental role in estimating the maximum steepness of soil masses –such as slopes or soil walls– which directly impacts both on safety and cost of projects. However, despite its importance, Chile lacks a common and accepted methodology to measure the angle of repose of soils. In addition, in the literature, several methods have been proposed; even, in 2000, ASTM published a specific Standard for the United States. In this paper we compare the values of

angles of repose measured through three methods proposed in literature with the values obtained by the Chilean practice, so that differences may be sized and the impact thereof on designs may be analyzed. Results show that –for all sands tested– the lowest values correspond to Chilean practice, which are in average 35% below the value provided by ASTM. An application to slope stability shows that the differences in the angles of repose measured translate, for example, in factors of safety differing as much as 82%, and in significant differences in volumes of soil to excavate.

Key words: Angle of repose, sand, slope stability.

1. Introducción

Dos tipos de falla pueden presentarse en un montículo de suelo suelto: (i) falla superficial (ii) falla por desplazamiento de cuña (Figura 1). La primera corresponde a una delgada capa deslizándose por la zona superior del material, la cual está condicionada por la inclinación que existe. El segundo tipo de falla se caracteriza por desplazamiento basal de una cuña, lo que puede analizarse como si la cuña fuese un muro contenido el material detrás de ella (Chik & Vallejo, 2005). Los principales factores que influyen el desplazamiento de la cuña son la rugosidad de la base, y la densidad del montículo de arena.

Se denomina ángulo de reposo al ángulo máximo con que un montículo de suelo se mantiene estable sin que se produzca una falla por deslizamiento. Esta es una propiedad del suelo que está determinada por la fricción, cohesión y forma de las partículas. Cuando material granular es vertido lentamente sobre una superficie horizontal, este fluye formando un montículo en que la superficie libre va fallando intermitentemente hasta que el proceso se detiene y se forma una pendiente estable. Así, el ángulo de reposo corresponde al ángulo formado entre la superficie inclinada del montículo y la base y se obtiene por medición directa o midiendo el diámetro y altura del montículo de arena.

En la práctica, el ángulo de reposo juega un rol fundamental en la estimación de valores máximos de inclinación de masas de suelo, que aseguren que no habrá deslizamiento de material. Este elemento de seguridad es fundamental por ejemplo en el diseño y construcción de carreteras que requieren excavación de suelos (como en la carretera La Serena-Vicuña, IV Región), o en el diseño de obras hidráulicas como los taludes laterales de enrocados, o en la construcción y operación de rellenos sanitarios, y en cálculos de empujes de tierra, entre otros. Por otro lado, es evidente que a menor ángulo de inclinación del suelo, mayor será el costo del proyecto, ya sea por la cantidad

de excavaciones a hacer en el caso de carreteras; o por la cantidad de material a usar en, por ejemplo, el caso de un talud en un relleno sanitario. En síntesis, el ángulo de reposo de un suelo resulta ser un valor de suma importancia en muchos proyectos de ingeniería, ya que de él dependen riesgos y costos de los proyectos.

Sin embargo, a pesar del variado uso e importancia del ángulo de reposo, no existe en Chile ni una norma ni una metodología consolidada para obtener esta propiedad de los suelos. La práctica de laboratorio más común consiste en llenar un cono con material granular lo más suelto posible, levantarla verticalmente y medir el ángulo así formado en la base del montículo. Pero no existen especificaciones precisas para realizar este ensayo con respecto a elementos tan importantes como las dimensiones del cono, la velocidad de levante del cono o la superficie de ensayo. En terreno, por otra parte, la usanza es de voltear el material desde un camión y medir la pendiente natural así formada.

En la literatura, por otra parte, se han propuesto distintos métodos para medir el ángulo de reposo; Cornforth (1973) sugirió que el ángulo de reposo puede medirse a través de la remoción de parte de la base de un montículo de arena. Miura *et al.* (1997) desarrollaron un método que consiste en vaciar arena a través de un embudo dentro de un anillo de cobre. En el año 2000, en un intento de sistematizar la manera de obtener el ángulo de reposo en Estados Unidos, la ASTM publicó la norma ASTM Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders (Designation: 1444 - 00) que consiste en vaciar arena a través de un embudo de dimensiones determinadas, en una superficie lisa y desde una altura dada. Posteriormente, Santamarina & Cho (2001) propusieron calcular el ángulo de reposo inclinando un cilindro transparente con suelo sumergido en agua o suelo seco –dependiendo de ciertas condiciones– y volverlo a su posición vertical.

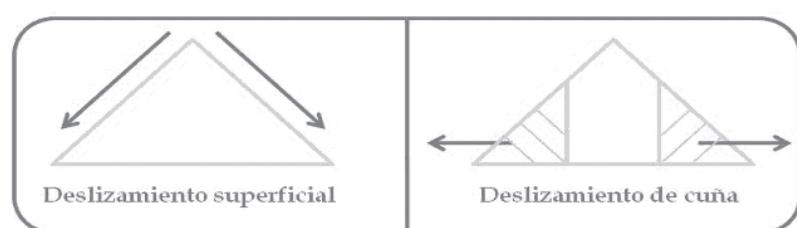


Figura 1
Tipos de fallas relacionadas con el ángulo de reposo (Chik & Vallejo, 2005)

Dada la importancia del ángulo de reposo en proyectos de ingeniería, resultaría sumamente útil saber cuál es la diferencia en los valores obtenidos mediante los distintos métodos disponibles en la literatura y compararlo con la práctica general en Chile. Esto permitiría extraer lecciones tanto positivas (¿qué diferencias se obtienen en los ángulos de reposo y cómo se traducen a la práctica?), como normativas (¿qué método podría o debería implementarse en Chile?). Lo que este artículo hace es, precisamente, mostrar este tipo de comparaciones: en este estudio se compara el valor del ángulo de reposo de seis arenas distintas utilizando los siguientes métodos: ASTM C1444, el método propuesto por Cornforth (1973), el método desarrollado por Santamarina & Cho (2001), y la práctica nacional consistente en llenar un cono con arena y levantarla verticalmente. Los resultados muestran que los ángulos de reposo obtenidos con los métodos ASTM y Cornforth son similares y son los mayores, seguidos del procedimiento propuesto por Santamarina & Cho (2001); los valores más bajos –para todas las arenas ensayadas– corresponden a los obtenidos con la práctica nacional, la que entrega valores 35% más bajos, en promedio, que el método ASTM. Además, como una manera de tener una mejor sensación de que quieren decir estas diferencias en la práctica, se presenta una

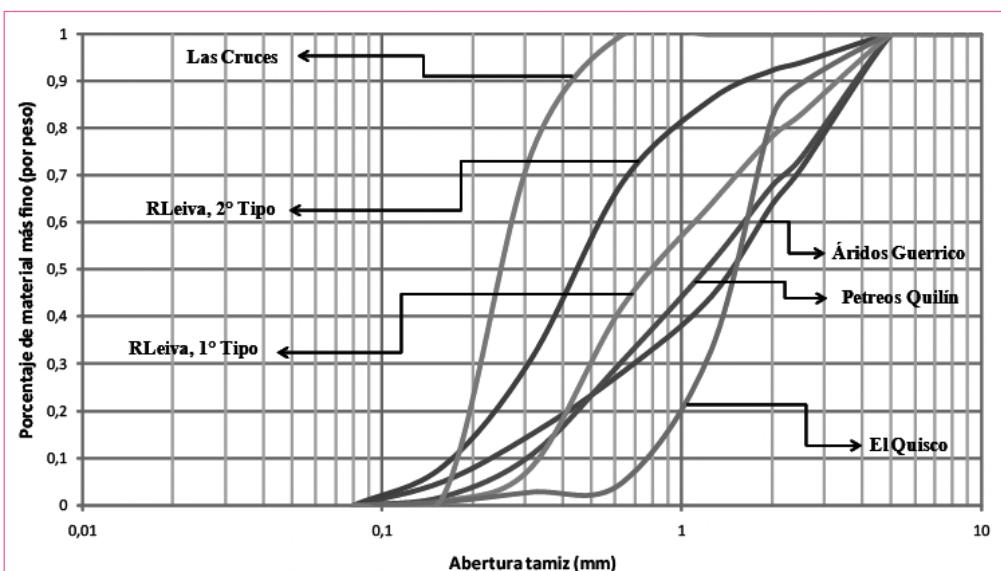
aplicación de estabilidad de taludes que muestra que las diferencias en los ángulos de reposo calculados se traducen, por ejemplo, en factores de seguridad que difieren hasta en 82%, y en importantes diferencias en los volúmenes de suelo a excavar.

Cabe hacer notar que, si bien varios autores han investigado cuáles son los factores que influyen en el valor del ángulo de reposo (ϕ_{rep}) para un mismo ensayo, tales como cantidad de material y rugosidad de la superficie de ensayo (e.g. Miura *et al.* 1997, Chik & Vallejo 2005) hasta ahora se desconoce cómo varía el valor de ϕ_{rep} entre ensayos. Una excepción es Rousé *et al.* (2008) que reportaron una diferencia de 0.1° entre la norma ASTM C1444 y el método de Cornforth (1973) para la arena Badger Sand.

2. Arenas ensayadas

Seis arenas de distinto origen geológico fueron usadas para este estudio. Estas son: Las Cruces y El Quisco (arenas de playa), Pétreos Quilín (de planta) y RLeiva 2° Tipo, RLeiva 1° Tipo y Áridos Guerrico (arenas de río). Las granulometrías de las seis arenas se muestran en la Figura 2; cabe mencionar que solo se utilizó la fracción de arena que pasa la malla

Figura 2
Granulometría de las arenas utilizadas en los ensayos



Nº4 (4.76 mm) y queda retenida en la malla Nº200 (0.074 mm). La Tabla 1 muestra los diámetros por el que pasa el 10%, 30%, 50% y 60% del peso de las muestras (D_{10} , D_{30} , D_{50} y D_{60} , respectivamente), el coeficiente de curvatura (C_c) y el coeficiente de uniformidad (C_u), además de la clasificación USCS. De las seis arenas ensayadas, cinco clasifican como SP (arena pobremente graduada) y Áridos Guerrico es la única SW (arena bien graduada).

3. Métodos utilizados

En esta sección se describen los cuatro métodos utilizados para este estudio. Dado que la rugosidad de la superficie de ensayo influye en los resultados de ángulo de reposo (Miura *et al.* 1997, Chik & Vallejo 2005), para todos los ensayos se utilizó una superficie común lisa de papel (como lo sugiere la norma ASTM) exceptuando el ensayo de Santamarina & Cho (2001) que se llevó a cabo dentro de un cilindro. Una descripción más detallada del procedimiento de cada ensayo se encuentra en Rodas (2008).

ASTM Standard Test Method for Measuring the Angle of Repose of Free-Flowing Mold Powders (Designation: 1444 - 00)

Este ensayo consiste en vaciar arena en la superficie de papel a través de un embudo de dimensiones específicas desde una altura de 1.5 pulgadas (o 3.81 cm). Para esta investigación el diámetro interno de la salida del embudo fue de 0,9 cm (0,35 pulgadas), valor que se encuentra entre las medidas mínima y máxima sugeridas por la norma, a saber, 0,64 cm (0,25 pulgadas) y 0,97 cm (0,38 pulgadas), respectivamente. Luego de posicionar el embudo a

la altura establecida, se tapó la salida inferior y se llenó el embudo con una muestra de arena previamente homogeneizada. A continuación se removió el tapón y se añadió arena continuamente de manera de mantener un flujo constante de material hasta que el punto de descarga del embudo fue tapado por el peak del montículo de arena formado. Se midieron cuatro diámetros en la base del montículo los cuales se promediaron, registrándose este valor como D_A . Este procedimiento se repitió dos veces más de manera de obtener tres diámetros parciales (D_1 , D_2 , y D_3) y calcular el ángulo de reposo mediante la Ecuación 1:

$$\phi_{rep} = \tan^{-1} [2H / (D_A - d)] \quad (1)$$

Donde:

- H corresponde a la altura entre la superficie de papel y el punto de descarga del embudo (3,81 cm).
- D_A promedio entre D_1 , D_2 y D_3 .
- d diámetro interno de la salida del embudo (0,9 cm).

Cornforth (1973)

Este método consiste en remover parte de la base de un montículo de arena y medir el nuevo ángulo formado después del deslizamiento de las partículas. Para que exista repetibilidad en la cantidad de arena removida entre los ensayos, en la base de papel se dibujaron 6 círculos concéntricos de diámetros 4 cm, 8 cm, 12 cm, 16 cm, 20 cm y 24 cm y 33 líneas paralelas separadas cada 1 cm. Además se utilizó una poruña con una capacidad aproximada de 190 mL. Luego de homogeneizar una muestra de

Tabla 1
Valores característicos de las arenas

Arena	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{50} (mm)	D_{60} (mm)	C_c	C_u	Clasificación U.S.C.S
Las Cruces	0,18	0,22	0,26	0,28	0,96	1,60	SP
El Quisco	0,75	1,19	1,51	1,66	1,14	2,23	SP
RLeiva, 2º Tipo	0,17	0,31	0,48	0,56	0,98	3,27	SP
RLeiva, 1º Tipo	0,33	0,52	0,86	1,14	0,71	3,43	SP
Petreos Quilín	0,30	0,62	1,22	1,65	0,78	5,45	SP
Áridos Guerrico	0,24	0,70	1,48	1,85	1,13	7,85	SW

aproximadamente 2 kg, se depositaron 4 poruñas de arena en orientaciones diferentes sobre el centro de los círculos, se removió entre 1 y 2 cm de arena de la base del montículo de forma paralela a las líneas guías y se midió el ángulo de inclinación formado en la cara removida del montículo registrándose así un ángulo parcial. Este procedimiento se repitió diez veces, obteniéndose el ángulo de reposo de cada arena como el promedio de las diez mediciones parciales.

Método desarrollado por Santamarina & Cho (2001)

Santamarina & Cho (2001) proponen dos métodos para calcular el ángulo de reposo de un material granular. El primero consiste en llenar un cilindro transparente con un litro de agua y suelo. Este cilindro se inclina en aproximadamente 60° y luego se vuelve a su posición original para medir el ángulo de reposo correspondiente a la pendiente formada por el material. En el caso de que exista segregación de las partículas de suelo en presencia de agua, los autores recomiendan realizar este ensayo en seco. En este estudio se realizaron ambos métodos. Las arenas con mayor cantidad de partículas más pequeñas presentaron una evidente segregación en presencia de agua, por lo que en este artículo solo se presentan los resultados obtenidos con el método en seco donde se utilizó una muestra homogeneizada de aproximadamente 300 mL de suelo. El ángulo de reposo se obtuvo midiendo la altura mayor y menor de arena con respecto a la base de apoyo. Para cada muestra se inclinó el cilindro seis veces de modo de obtener seis valores, los que fueron promedeados para obtener un ángulo de reposo parcial. Este procedimiento se repitió con tres muestras distintas para cada arena, siendo el ángulo de reposo que se reporta el promedio de los tres ángulos parciales obtenidos.

Práctica nacional para cálculo del ángulo de reposo

En terreno, la práctica nacional consiste en vaciar el material granular desde un camión y medir la pendiente del talud así formado. En laboratorio se estila llenar un cono con arena, levantarla verticalmente y medir directamente el ángulo formado entre la pendiente de la superficie libre del montículo así formado y la horizontal, o medir la altura máxima del montículo y el diámetro de la base. Es importante recalcar que no existe una normativa que especifique

cómo realizar este ensayo en cuanto a dimensiones y forma del cono, velocidad de levante del cono, o la rugosidad de la superficie donde se realice el ensayo; estos quedan sujetos a los requerimientos propios del cliente.

Para este estudio se probaron distintas dimensiones de cono. En primera instancia se utilizó el cono truncado recto de 30 cm de altura y diámetros basales de 20 cm y 10 cm especificados en la Norma Chilena NCh 1019 Of 74 Construcción - Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams, el cual resultó en segregación de las partículas de arena más finas haciendo impracticable la medición del ángulo de reposo. Se optó entonces por un cono de 10 cm de altura y diámetros de 14.4 cm y 2.6 cm, el que permitió que la arena fluyera regularmente al levantarla, no hubiese segregación del material y la cantidad de arena utilizada sea similar a los ensayos anteriormente mencionados.

Se ubicó el cono con la base de diámetro mayor sobre la superficie lisa de papel, se llenó con arena por la abertura de menor diámetro hasta sobrepasar el borde con cuidado de no compactar lo depositado debido a algún golpe, de manera que el material se encuentre en un estado lo más suelto posible dentro del cono. Luego se enrasó el material sobrante, se sacó el cono de manera vertical y se midió el ángulo de inclinación en la base del montículo formado por la arena con una precisión de $0,1^\circ$ en cuatro orientaciones diametralmente opuestas, las que se promediaron dando un resultado parcial. Este procedimiento se repitió seis veces, siendo el ángulo de reposo el promedio de los seis resultados parciales.

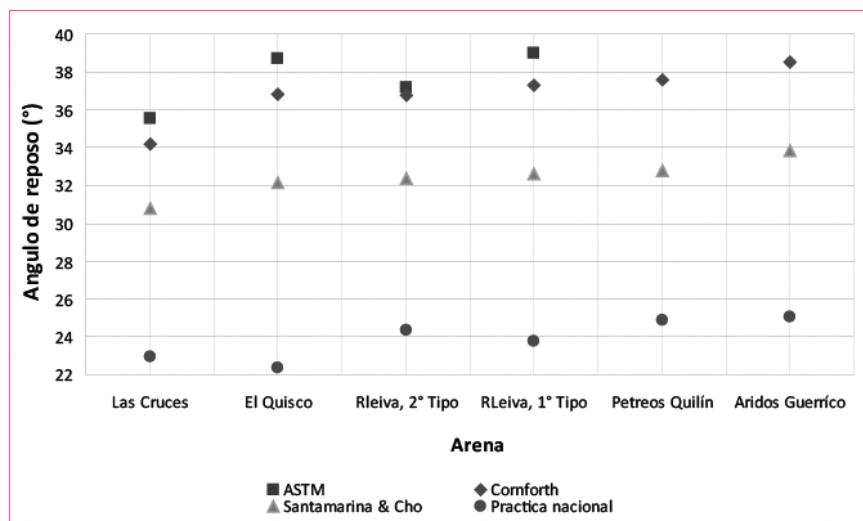
4. Resultados

Los valores de los ángulos de reposo obtenidos en este estudio se muestran en la Figura 3. Es importante mencionar que no se pudo reportar valores del ensayo ASTM para las arenas "Pétreos Quilín" y "Áridos Guerrico" debido a que existió una trabazón de partículas en la salida del embudo que impidió el flujo de arena y la formación del montículo con la altura requerida.

En la Figura 3 se puede observar que Áridos Guerrico, la única arena SW (arena bien graduada) según la clasificación USCS y la que tiene el mayor valor del coeficiente de uniformidad, Cu, es la que presenta un

Figura 3

Valor del ángulo de reposo según método de ensayo



mayor ángulo de reposo en cada uno de los métodos. Del mismo modo la arena Las Cruces, que tiene el menor valor de Cu y el tamaño de partículas más pequeño, presenta el menor valor del ángulo de reposo en todos los métodos excepto en la práctica nacional.

Los ángulos de reposo obtenidos con los diferentes métodos para las seis arenas conforman un panorama muy consistente: Primero, en todos los casos se tiene que los ϕ_{rep} obtenidos con el método ASTM y el propuesto por Cornforth (1973) son similares; esto concuerda con lo obtenido por Rousé *et al.* (2008) para el caso de Badger Sand. La mayor diferencia entre estos dos métodos es de 1.8° para la arena El Quisco y la menor diferencia de 0.4° corresponde a RLeiva 2° Tipo.

En segundo lugar, el método de Santamarina & Cho generó valores por debajo de ASTM en todos los casos, pero las magnitudes de las diferencias fueron bastante similares; la mayor diferencia es de 6.6° , equivalente a un 17,0%, para la arena El Quisco, mientras que la menor diferencia es de 4.7° , equivalente a un 13,3%, para la arena Las Cruces.

Por último, los menores valores de los ángulos de reposo corresponden a los obtenidos a través de la práctica nacional, con diferencias que son importantes. La mayor diferencia entre el ángulo calculado según la práctica Chilena y el método ASTM es de 16.3° , equi-

valente a un 42,3%, para la arena El Quisco, mientras que la menor diferencia es de 12.8° , equivalente a un 35,3%, para la arena RLeiva 2° Tipo. Así, los ángulos de reposo obtenidos siguiendo la práctica nacional son, en promedio, un 25% menores que los obtenidos mediante el método propuesto por Santamarina & Cho y un 35% menores a los obtenidos mediante los métodos ASTM y Cornforth (1973).

5. Ejemplo de aplicación

Los resultados de este estudio muestran claramente que la metodología utilizada para medir el ángulo de reposo influye dramáticamente en el valor que se obtiene: hasta un 42% de diferencia en el ángulo de reposo pueden encontrarse entre la práctica nacional y el método ASTM. En la práctica, estas diferencias pueden traducirse en importantes diferencias en el diseño o cálculo de estabilidad de taludes en excavaciones, laderas, terraplenes o presas de tierra. De manera de mostrar la influencia que tiene la diferencia en los ángulos de reposo calculados y por ende la metodología utilizada para obtenerlos, en esta sección se presentará un ejemplo de análisis de estabilidad de taludes.

La estabilidad de un talud homogéneo construido con una arena limpia depende de la fricción existente

entre sus partículas. El objetivo de un análisis de estabilidad de taludes es encontrar el talud óptimo, en el sentido de que sea lo más económico posible en cuanto a cantidad de material extraído, al mismo tiempo que cumpla con los requerimientos de seguridad de modo que no se generen deslizamientos. El ejemplo que se detalla fue simulado mediante el software Geoslope considerando como el ángulo de fricción interna del suelo los valores del ángulo de reposo obtenidos con cada método para la arena RLeiva 1° Tipo¹. La Figura 4 muestra la geometría del problema estudiado: El talud tiene un ángulo de inclinación de 30°, el peso específico del suelo es de 18 KN/m³, la cohesión es 0 y la línea punteada corresponde al nivel de la napa freática. La grilla superior izquierda corresponde a los centros de las posibles circunferencias de falla y las líneas horizontales en la parte inferior de la figura indican los radios posibles de estas circunferencias para cada centro. Los valores obtenidos para el factor de seguridad (FS) de acuerdo al método Bishop para cada procedimiento para obtener el ángulo de reposo se muestran en la Tabla 2.

Los resultados muestran que los factores de seguridad calculados para los ángulos de reposo obtenidos mediante los métodos ASTM y Cornforth son mayores a 1.3, lo que define al talud como estable. El factor de seguridad relacionado al ángulo de reposo obtenido mediante el método propuesto por Santamarina & Cho es un 21% menor al relacionado con el método ASTM pero es mayor a 1.1, valor aceptable para taludes permanentes. Un factor de seguridad

de 1 para un talud corresponde a un estado de falla incipiente; el FS obtenido utilizando el ángulo de reposo medido con la práctica nacional es menor que 1 por lo que el talud se considera inestable y, por ende, debiese ser modificado.

Una forma alternativa de ver el problema es calcular el ángulo de inclinación del talud que asegure un factor de seguridad de Bishop de 1.3 y, por lo tanto, la estabilidad del talud. Obviamente, este ángulo de inclinación límite depende del ángulo de reposo, por lo que dependerá del método utilizado para medirlo. Si se utiliza el valor de ϕ_{rep} obtenido mediante la práctica nacional, el ángulo del talud debe ser igual a 18.8°. Utilizando el valor obtenido por Santamarina & Cho el ángulo del talud debe ser igual a 26.3° lo que implica que el volumen de material excavado es 185 m³ por metro lineal menor. El ángulo del talud relacionado con el ángulo de reposo obtenido con el método propuesto

Tabla 2
Factor de seguridad de Bishop según método para obtener el ángulo de reposo

Método	ϕ_{rep} (°)	FS (Bishop)
ASTM	39,0	1,42
Cornforth (1973)	37,3	1,34
Santamarina & Cho (2001)	32,6	1,12
Práctica nacional	23,8	0,78

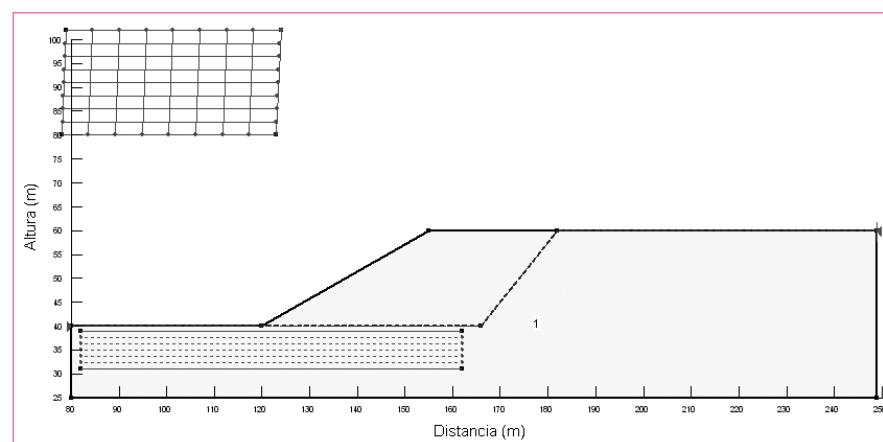


Figura 4
Análisis de estabilidad de taludes mediante software Geoslope

¹ El análisis se hizo para las seis arenas pero las lecciones cualitativas son las mismas en todos los casos, por lo que se optó por presentar solo un caso.

por Cornforth debe ser de 30.5° de manera de obtener un $FS=1.3$. Así, el volumen de material excavado sería de 250 m³ por metro lineal menor que el de la práctica nacional. Finalmente considerando el valor obtenido con la norma ASTM, el talud debiese tener un ángulo de 32°, lo que se traduce en una reducción de volumen a excavar de 270 m³ por metro lineal con respecto a lo que se haría de seguirse la práctica nacional.

6. Conclusiones

En este artículo se compara los valores de los ángulos de reposo medidos mediante tres métodos propuestos en la literatura con los valores que se adquieren al seguir la práctica nacional, con el objeto de cuantificar las diferencias y analizar el impacto de estas en el diseño ingenieril (seguridad y costos). Para esto, se hicieron una serie de ensayos sobre seis arenas diferentes, lo que permitió obtener las siguientes conclusiones:

- Los valores del ángulo de reposo obtenidos mediante los métodos ASTM y Cornforth (1973) arrojan valores similares; la mayor diferencia es de 1.8° correspondiente a un 4.5% de diferencia. Esto concuerda con lo observado por Rousé *et al.* (2008).
- Los mayores valores del ángulo de reposo se obtienen a través de los métodos ASTM y Cornforth (1973), seguidos del procedimiento propuesto por Santamarina & Cho (2001) y los valores más bajos corresponden a los obtenidos mediante la práctica nacional.

Referencias

1. ASTM International. (2000). Standard test method for measuring the angle of repose of free-flowing mold powders. ASTM C 1444-00. Annual book of ASTM standards.
2. Chik, Z. & Vallejo, L.E. (2005). Characterization of the angle of repose of binary granular materials, Canadian Geotechnical Journal, 42 (2), págs. 683-692.
3. Cornforth, D. H. (1973). Prediction of drained strength of sands from relative density measurements. ASTM STP 523, págs. 281-303.
4. Instituto Nacional de Normalización. (1974). Construcción - Hormigón - Determinación de la docilidad - Método del asentamiento del cono de Abrams. NCh1019.Of74 . Santiago, Chile.
5. Miura, K., Maeda, K., & Toki, S. (1997). Method of measurement for the angle of repose of sands. Soils and Foundation, 37 (2), págs. 89-96.
6. Rodas Herrera, R. B. (2008). Comparación de métodos para el cálculo del ángulo de reposo. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil en Obras Civiles, Universidad Diego Portales, Santiago, Chile.
7. Rousé, P. C., Fannin, R. J., & Shuttle, D. A. (2008). Influence of roundness on the void ratio and strength of uniform sand. Géotechnique, 58 (3), págs. 227-231.
8. Santamarina, J. C., & Cho, G. C. (2001). Determination of critical state parameters in sandy soils-simple procedure. Geotechnical testing journal, 24 (2), págs. 185-192.

- La diferencia promedio en ϕ_{rep} entre la práctica nacional y Santamarina & Cho (2001) es de aproximadamente 25% mientras que entre la práctica nacional y los métodos ASTM y Cornforth es cercana al 35%.

Una aplicación de los valores encontrados al caso del diseño de un talud mostró que:

- Usar el método ASTM en vez de la práctica nacional para calcular el ángulo de reposo puede implicar que un talud pase de ser declarado inestable ($FS < 1.0$) a estable ($FS > 1.3$)
- Usar el método ASTM en vez de la práctica nacional para calcular el ángulo de reposo genera, en el ejemplo considerado, una diferencia de 270 m³ por metro lineal de material excavado. Si el costo de excavar material es proporcional al volumen de material excavado, esto implicaría un proyecto 45% más caro por este concepto.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el método utilizado para obtener el ángulo de reposo tiene una gran influencia en el valor de este. Y si bien el hecho de que la práctica nacional genere los menores valores puede implicar que los diseños sean más seguros, las magnitudes de las diferencias con los otros métodos parecen indicar que los proyectos podrían estar resultando más caros de lo necesario, debido a la subestimación de la resistencia del suelo. Se puede concluir que Chile necesita considerar seriamente el establecimiento de una norma para medir el ángulo de reposo de los suelos.