Estabilidad de Taludes: Conceptos Básicos, Parámetros de Diseño y Métodos de Cálculo

Autores: Ricardo Valiente Sanz, Salvador Sobrecases Martí, Aníbal Díaz Orrego.

RICARDO VALIENTE SANZ.
Ingeniero Civil[1].
Magíster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos[1]. Diploma de Estudios Avanzados en el Programa de Doctorado en "Análisis Avanzado en Ingeniería del Terreno y Estructuras"[1]. Profesor Departamento Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Valencia

SALVADOR SOBRECASES MARTÍ.
Ingeniero Civil[1] e Ingeniero Geólogo[1]. Magíster en Administración y Dirección de Empresas (MBA)[2]. Especialista en geotecnia en TYPSA Perú

ANÍBAL DÍAZ ORREGO.
Ingeniero Civil[3].
Magíster en Ingeniería Estructural Avanzada[3]. Director de la Escuela de Ingeniería Civil Ambiental de la Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo (Chiclayo-Perú)

[1]Universidad Politécnica de Valencia, España
[2]Universidad Internacional de la Rioja, España
[3]Universidad Nacional Politécnica de Bielorrusia

ABSTRACT
En el presente artículo se lleva a cabo una introducción a los principales conceptos que engloban el estudio de estabilidad de un talud, clasificando los tipos de inestabilidades en función de su morfología, exponiendo los criterios necesarios para caracterizar geotécnicamente los materiales de manera adecuada y explicando las principales metodologías de cálculo.

Palabras claves
Deslizamiento, Inestabilidad, Talud, Resistencia, Equilibrio Límite, Pseudo-Estático, Modelo Numérico, Rebanadas.

Introducción

Bajo el nombre genérico de talud denominamos a la superficie inclinada, con respecto a la horizontal, que adoptan permanentemente o provisionalmente las estructuras de tierra. Estos pueden ser artificiales, cuando están construidos por el hombre en sus obras de ingeniería (terraplén o desmonte), o naturales (laderas). Asimismo, pueden ser de suelos, rocas o mixtos, variando a su vez la metodología de estudio.

Los proyectos de ingeniería civil (fundamentalmente obras lineales) requieren el diseño de taludes tanto en corte de terreno como en terraplén, bajo las condiciones de seguridad adecuadas.

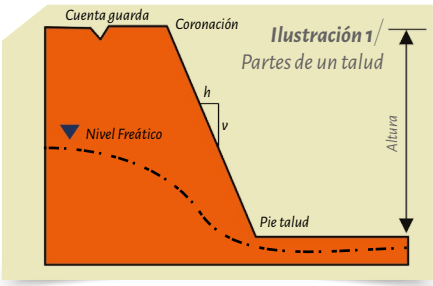


Ilustración 1/ *Partes de un talud*

En el estudio de la estabilidad de los taludes se abordan fenómenos de estado último o de rotura de masas de suelo. Los agentes externos responsables de la inestabilidad son una fuerza de masa, el peso y, eventualmente, los efectos de filtración, a los cuales hay que añadir otros factores como las sobrecargas (estáticas/dinámicas).

Tipología de inestabilidades

Al estudiar los fenómenos de inestabilidades de taludes, es necesario identificar y caracterizar los distintos tipos de comportamiento, y clasificarlos adecuadamente. Un análisis preciso del tipo de rotura permite optimizar las medidas de contención y estabilización de taludes y laderas, ya que atiende al mecanismo actuante, la velocidad y las dimensiones. Por el contrario, una incorrecta definición del mecanismo de rotura puede dar lugar a soluciones incorrectas o ineficaces, y en algunos casos contraproducentes.

La clasificación clásica mayormente aceptada por la comunidad internacional viene recogida por Varnes (1988), basada en el mecanismo de rotura y propagación del movimiento. De acuerdo a criterios morfológicos, se diferencian los siguientes tipos de movimientos:

Ilustración 2/ *Clasificación movimientos terreno Varnes (1978)*

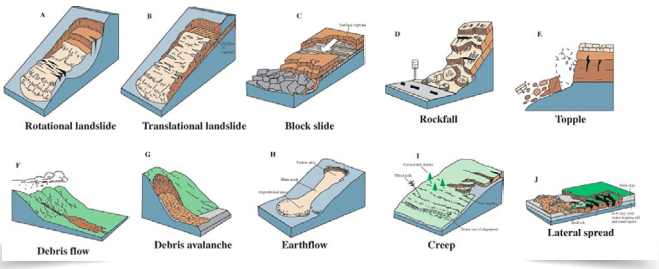


Ilustración 3/ Corriente de derrubios, "erosión producida por corrientes de agua" (arriba). Derrumbe de rocas (abajo). Carretera longitudinal de la sierra. Tramo Izcuchaca – Mayocc.

Ilustración 4/ Carretera Chiclayo-Chota, deslizamiento traslacional derrubios ladera

Parámetros resistentes

Cuando se estudian los suelos y los macizos rocosos en el apartado de la caracterización geotécnica de los mismos, una de las propiedades más importantes, en lo que respecta a la estabilidad de taludes, es su resistencia. En mecánica de suelos, el criterio de rotura generalmente empleado es el de Mohr-Coulomb, el cual permite definir la tensión tangencial o de corte que se alcanza en un plano en función de la tensión efectiva sobre el mismo y los parámetros resistentes del suelo.

$$\tau = c' + \sigma' . \, tg\varphi' = c' + (\sigma - u_w) . \, tg\varphi'$$

Donde c' es la cohesión del terreno, σ' el esfuerzo efectivo, σ el esfuerzo normal total, u_w la presión intersticial del agua y φ' el ángulo de rozamiento interno del terreno.

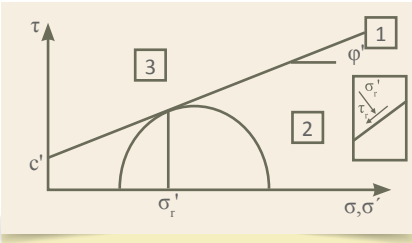


Figura 5/ *Criterio de rotura de Mohr-Coulomb*

- *Zona 1, representa el estado de rotura.*
- *Zona 2, combinación (∫',|) que cuenta con un margen de seguridad para una determinada tensión efectiva normal; la tensión tangencial es inferior a la máxima movilizable.*
- *Zona 3, punto imposible, pues está ubicado por encima de la envolvente de falla de rotura, lo cual es incompatible con la resistencia del suelo.*

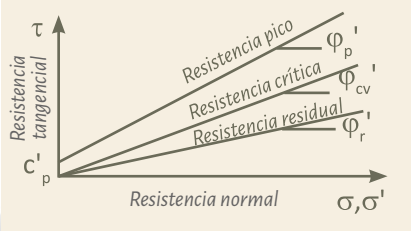


Figura 6/ *Gráfico esfuerzo normal vs esfuerzo tangencial*

Figura 7/ *Gráficos tensión deformación ensayos corte*

Cabe prestar especial atención a la adopción de los parámetros de cálculo. En principio, parece razonable adoptar el valor de pico, pues únicamente cuando este se supera se llega a resistencias menores (principio aplicable a cimentaciones). Sin embargo, en casos que implican roturas de grandes dimensiones (como los deslizamientos de taludes), al aplicar las cargas, las tensiones no aumentan al mismo ritmo en los distintos puntos de la zona de posible rotura. En estas situaciones, puede ocurrir que en algunos puntos se alcance la resistencia de pico cuando en el resto aún se está en régimen prerotura. Si se sigue aumentando la carga, la tensión en estos puntos comienza a descender y se descarga en los adyacentes. Al final, cuando se produce la rotura general, hay puntos que llegan a la resistencia de pico (los últimos en romper), mientras que en otros la resistencia ya ha descendido notablemente; la resistencia media será un valor intermedio entre la de pico y la crítica. El caso más extremo es la reactivación de un deslizamiento, ya que al haberse producido movimientos fuertes en muchos puntos del mismo, la resistencia del suelo es la residual.

Generalmente, con valores asociados a resistencias de pico, se obtienen factores de seguridad mayores; sin embargo, en laderas que han presentado episodios de movimientos (con deformaciones importantes) y que han podido alcanzar valores residuales, los factores de seguridad obtenidos son menores.

Análisis de la seguridad

Para determinar la estabilidad de una masa de suelo se debe determinar su coeficiente de seguridad al deslizamiento, comparando los esfuerzos que tienden a producir el deslizamiento con aquellos que tienden a evitarlo.

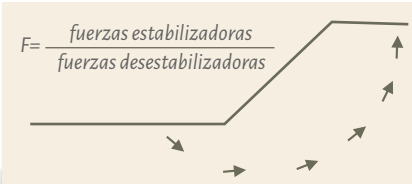


Figura 8/ *Esquema estabilidad talud*

En el cálculo de estructuras, el análisis de la seguridad se realiza mediante el método de los coeficientes de seguridad parciales, mayorando las acciones y minorando las resistencias. El proyecto geotécnico puede seguir también dicha vía; de hecho, cada vez son más las normativas que recogen dicha consideración. En Europa, el Eurocódigo 7, contempla el método de los coeficientes parciales para el proyecto geotécnico, del mismo modo que, en Estados Unidos, la LRFD (*Load and Resistance Factor Desing*) AASHTO enfoca los cálculos de ingeniería bajo este punto de vista.

El factor de seguridad global o único engloba la imprecisión tanto en las acciones como en las resistencias, los modelos de cálculo y la incertidumbre del error humano.

La fuerza desestabilizadora más importante será el peso de la masa deslizante, a la cual se le suman otras fuerzas, como las sobrecargas de estructuras o el empuje del agua en las grietas. La principal fuerza estabilizadora será la resistencia de corte del terreno en la superficie de deslizamiento.

Actualmente, existen varias normativas nacionales e internacionales ampliamente aceptadas en Perú, en las que se regula el coeficiente de seguridad a emplear. La elección de dicho coeficiente debe realizarse considerando la temporalidad de la obra (provisional o definitiva) y la situación de cálculo (estática o sísmica). En la siguiente tabla puede consultarse una recopilación de los factores según las diferentes normativas.

Tabla 1/
Coeficientes de seguridad a emplear en el análisis de estabilidad de taludes

NORMATIVA	TALUD TEMPORAL		TALUD PERMANENTE	
	ESTÁTICA	SÍSMICA	ESTÁTICA	SÍSMICA
AASHTO LRFD	*1,33-1,53*	*1,1*	*1,33-1,53*	*1,1*
NAVFAC-DM7	*1,3-1,25*	*1,2-1,15*	*1,5*	*1,2-1,15*
FHWA-NHI-11-032	*-*	*1,1*	*-*	*1,1*
CE.020	*-*	*-*	*1,5*	*1,25*

La AASHTO, en situación estática, determina que si no existen cargas estructurales próximas al talud, o los reconocimientos geotécnicos realizados son confiables, debe emplearse un factor de seguridad de 1,33; en caso contrario, se emplea el de 1,53.

Metodos de cálculo estabilidad taludes

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos: métodos de cálculo con modelos numéricos o métodos de equilibrio límite.

Cálculos con métodos de equilibrio límite

Los modelos de equilibrio límite se basan en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. Su principal limitación es que suponen que la resistencia al corte del terreno se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte, sin tener en cuenta el estado tensional ni la cuantía de las deformaciones. La movilización del terreno da lugar a una modificación de sus características resistentes y este tipo de modelos no pueden tener en cuenta este factor. La ventaja es que permiten modelar geometrías complejas de manera rápida y fiable, y reproducen de manera bastante fiel la superficie de rotura más probable. Su aplicación está muy extendida porque, pese a su gran rapidez y sencillez, están ampliamente contrastados por la práctica, y se conocen sus límites y grados de confianza.

Los métodos de equilibrio límite consisten en dividir la masa de terreno potencialmente inestable en rebanadas verticales, calcular el equilibrio de cada una de ellas y analizar el equilibrio global, para obtener un factor de Seguridad (F) que se define como la relación entre fuerzas/momentos resistentes y fuerzas/momentos desequilibrantes. Una vez calculado el valor de FS para una determinada curva de rotura potencial, se repite el proceso para otra distinta, y así sucesivamente hasta obtener un valor mínimo de FS (curva deslizamiento pésima).

La forma en la que se resuelven las ecuaciones constituyen los modelos habitualmente empleados (Bishop, Spencer, Janbu, etc.), los cuales son casos particulares del método general de equilibrio límite. El factor de seguridad se define como el factor por el cual debe reducirse la resistencia cortante del suelo para llevar a la masa potencialmente inestable a un equilibrio límite a lo largo de una superficie de deslizamiento previamente seleccionada.

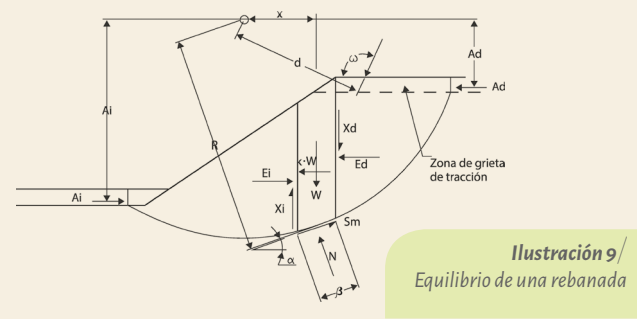


Ilustración 9/
Equilibrio de una rebanada

En la ilustración anterior se muestran las fuerzas actuantes en el sistema de ecuaciones planteado. La nomenclatura empleada se explica como sigue:

W: Peso total de la rebanada. En el caso de existir fuerzas sísmicas se introduce un componente horizontal desestabilizador igual a "k" veces el peso
N: Fuerza normal en la base de la rebanada
S: Fuerza cortante movilizada en la base de la rebanada
E: Fuerzas horizontales movilizadas entre rebanadas.
D: Fuerza externa aplicada
X: Fuerzas verticales movilizadas entre rebanadas
A: Empuje de agua externo

Para la resolución del problema se cuenta con el sumatorio de fuerzas y el sumatorio de momentos. Estos, junto con el criterio de rotura de Mohr Coulomb, no son suficientes para que el sistema de ecuaciones quede resuelto, dado que mientras que el número de ecuaciones disponible es "n", el número de incógnitas es "6n-1".

Para que el sistema quede determinado, los modelos (Bishop, Janbu, Spencer, etc.) deben hacer una serie de hipótesis

respecto a las direcciones, magnitudes y/o puntos de aplicación de algunas de las fuerzas presentes.

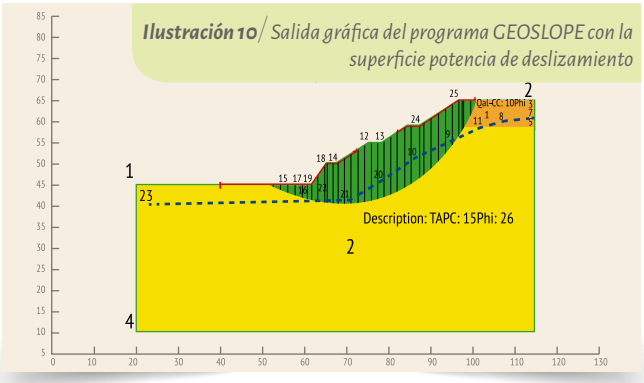


***Ilustración 10**/ Salida gráfica del programa GEOSLOPE con la superficie potencia de deslizamiento*

Cálculos con modelos numéricos

En algún caso particular, puede ser interesante cuantificar las deformaciones producidas en el talud. Por ejemplo, si existe un edificio muy próximo a la coronación del talud, puede ser necesario estudiar las deformaciones inducidas en la cimentación del edificio. En esos casos los modelos de equilibrio límite únicamente garantizan la estabilidad del talud, pero no permiten resolver el problema del efecto de la excavación en el edificio. De ser así, puede ser recomendable acudir a modelos de diferencias finitas o elementos finitos más complejos, que estudian el estado tensional de los elementos y sus deformaciones.

Este tipo de métodos requiere una discretización previa del problema mediante una malla. En primer lugar, se modela la sección tipo de estudio: se establecen los parámetros de las diferentes unidades geotécnicas (c, ϕ, E,υ), y se definen las condiciones iniciales del estado tensional del terreno y la presencia de nivel freático. Posteriormente, se simula la secuencia constructiva.

Los métodos numéricos aplican el método "phi-reduction", con una reducción de la resistencia de todos los materiales, aplicando un factor de seguridad F hasta alcanzar un valor en el cual el proceso no es convergente.

$$C_{calculo} = \frac{C}{F}\,;\ tg\phi_{calculo} = \frac{tg\phi}{F}$$

Existen experiencias que comparan el cálculo mediante elementos finitos con los métodos de rebanadas, que concluyen que existe una buena concordancia de resultados.

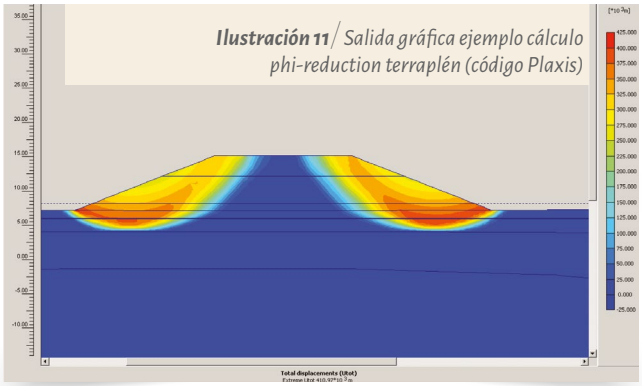
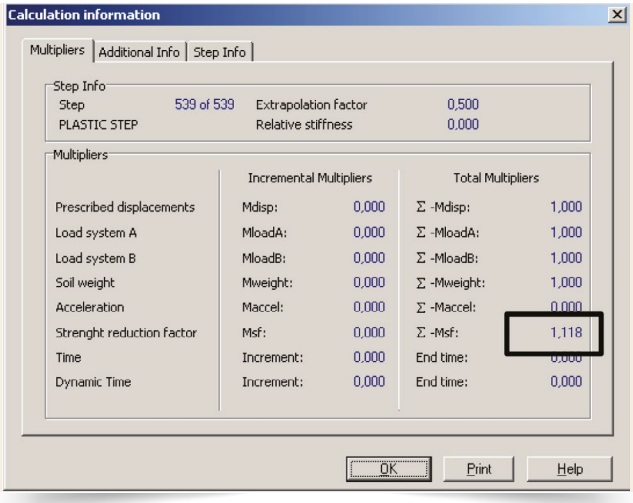


***Ilustración 11**/ Salida gráfica ejemplo cálculo phi-reduction terraplén (código Plaxis)*



Análisis de estabilidad de taludes bajo acción sísmica

Los efectos de un sismo en un talud pueden modelarse empleando aceleraciones horizontales y constantes. Terzaghi, en 1959, fue el primero en aplicar un modelo pseudo-estático para realizar un estudio de estabilidad de taludes durante un evento sísmico. En estos modelos, se representan los efectos del sismo mediante aceleraciones pseudoestáticas, las cuales producen fuerzas de inercia situadas en el centro de gravedad de cada dovela. De acuerdo a la última actualización de la norma ***E030. Diseño sismorresistente***, Perú se divide en cuatro zonas sísmicas:

***Ilustración 12**/ Zonificación sísmica Perú (E030).*

En la siguiente tabla se indica el factor asignado a cada zona (o PGA, ***peak ground aceleration***) para un período de retorno T=500 años.

***Tabla 2**/ Factor de zona Perú (E030)*

Zona	*4*	*3*	*2*	*1*
PGA	*0,45*	*0,35*	*0,25*	*0,10*

Según la citada normativa, se clasifican los suelos tomando en cuenta las propiedades mecánicas del suelo, el espesor del estrato, el período fundamental de vibración y la velocidad de propagación de las ondas de corte. Los tipos de perfiles de suelos son cuatro:

Tabla 3/ *Clasificación de suelos de acuerdo a la amplificación sísmica (E030).*

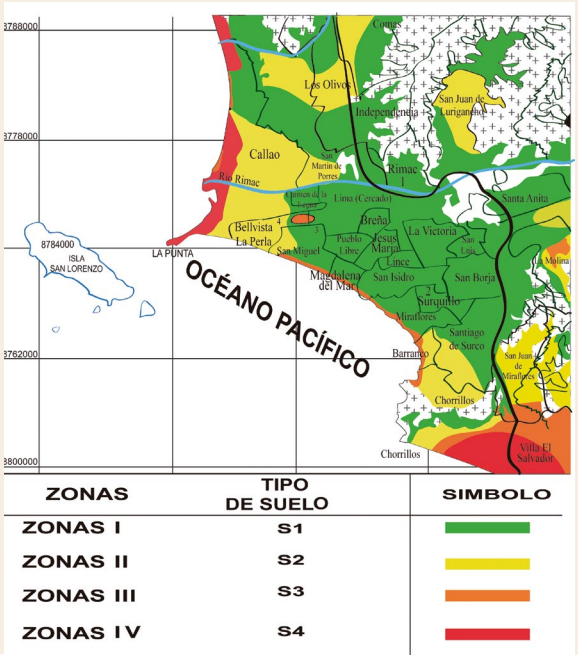
	S0: Roca Dura	S1: Roca o suelos muy rígidos	S2: Suelos Intermedios	S3: Suelos Blandos
Zona 4	0.80	1.00	1.05	1.10
Zona 3	0.80	1.00	1.15	1.20
Zona 2	0.80	1.00	1.20	1.40
Zona 1	0.80	1.00	1.60	2.00

Tabla 4/ *Clasificación de suelos de acuerdo al periodo fundamental de vibracion sísmica Tp (s) (E030).*

	S0: Roca Dura	S1: Roca o suelos muy rígidos	S2: Suelos Intermedios	S3: Suelos Blandos
Tp (s)	0.30	0.40	0.60	1.00

En la siguiente ilustración, se muestra la zonificación propuesta por el CISMID (Centro Peruano-Japonés de Investigación Sísmica y Mitigación de Desastres), según tipos de suelo, para la ciudad de Lima, sobre la base de ensayos microtremor.

***Ilustración 13**/ Zonificación propuesta por el CISMID (2004). S4 se corresponde con suelos excepcionalmente flexibles y/o con condiciones geológicas desfavorables que requieren de un estudio específico (E030).*



La aceleración máxima horizontal de diseño (A_{max-d}) se determina de la siguiente forma:

$$A_{max-d} = PGA \times S$$

En el caso de considerar métodos pseudo-estáticos para el diseño de los taludes, la AASHTO y la FHWA sugieren reducir el anterior valor a la mitad.

Conclusiones y comentarios

En el estudio de la estabilidad de taludes se abordan fenómenos de estado último o de rotura de masas de suelo, siendo el agente externo responsable de la inestabilidad una fuerza de masa como el peso y los efectos de filtración, a los cuales se añaden otros factores como las sobrecargas. Para poder abordar los mecanismos de rotura, es de especial importancia conocer la cinemática de los movimientos.

En el estudio de estabilidad, precisamos conocer con la máxima precisión los parámetros resistentes (c'-φ') de cada uno de los niveles afectados, los cuales dependerán de los movimientos experimentados por el subsuelo.

Frente a las incertidumbres tanto de las cargas aplicadas, como de los parámetros resistentes del terreno, aplicaremos el correspondiente factor de seguridad frente al deslizamiento. Las normativas más utilizadas en Perú en las cuales se determina el factor de seguridad a emplear son la CE.020, AASHTO LRFD, NAVFAC-DM7 y FHWA-NHI-11-032.

Para los cálculos de estabilidad de taludes podemos emplear modelos de equilibrio límite o modelos numéricos. Los modelos de equilibrio límite se basan en las leyes de la estática para determinar el estado de equilibrio de una masa de terreno potencialmente inestable. Para ello, se supone que la resistencia al corte del terreno se moviliza total y simultáneamente a lo largo de la superficie de corte, sin tener en cuenta el estado tensional ni las deformaciones (estos se encuentran fuertemente sancionados por la práctica). En ocasiones, puede ser interesante cuantificar estas deformaciones, en cuyo caso se recomienda acudir a modelos numéricos que permiten estudiar el estado tensional de los elementos y sus deformaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- **Ágreda, A. P. (2005).** *Estabilidad de Taludes.* Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- **American Association of State Highway and Transportation Officials. (2014).** *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.* Washington.
- **Centro Peruano Japonés de Investigsaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres. (2013).** *Estudio de Microzonificación Sísmica y Vulnerabilidad en la Ciudad de Lima.* Lima.
- **Federal Highway Administration. (2011).** *LRFD Seismic Analysis and Design of Transportation Geotechnical Features and Structural Foundations (FHWA-NHI-11-032).* Washington.
- **Ministerio de Vivienda, Contrucción y Saneamiento de Perú. (2012).** *CE.020. Estabilización de suelos y taludes.* Lima.
- **Ministerio de Vivienda, Contrucción y Saneamiento de Perú. (2016).** *Norma E.030. Diseño sismorresistente.* Lima.
- **Naval Facilities Engineering Command. (1986).** *Soil Mechanics DESIGN MANUAL 7.01.* Virginia.
- **Smith, I. (2014).** *Smith's Elements of Soil Mechanics.*
- **Suárez, J. (2009).** *Deslizamientos. Análisis geotécnico VOL. 1.* Madrid: U.I.S. Escuela de filosofía.
- **Varnes, D. J. (1978).** *Slope movement types and processes.* Washington.