

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN TALUD CRÍTICO DE LA COSTA
VERDE EN EL DISTRITO DE SAN MIGUEL**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachillera en Ciencias
con mención en Ingeniería Civil**

AUTORA:

Melani Betsabe Lavado Mejía

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de Bachiller en Ciencias
con mención en Ingeniería Civil**

AUTOR:

Renato Fabrizio Alcántara León

David Antonio Garagorri Linares

Walter Elías Lizárraga Callata

Juan Angel Ramos Dedios

ASESOR:

Carmen Eleana Ortiz Salas

Lima, diciembre, 2021

RESUMEN

El presente trabajo se trata del análisis pseudoestático en un talud crítico de la Costa Verde ubicado en San Miguel cuyos resultados están acompañados de recomendaciones de metodologías de mejoramiento de la estabilidad.

En ese sentido, en primer lugar, se ha hecho una revisión de los antecedentes históricos de la Costa Verde para tener una contextualización de su estado a través de los años, seguido a ello se han estudiado los principales tipos de falla y sucesos de desprendimiento de los últimos años. También, se ha estudiado diferentes estudios geotécnicos para poder sintetizar las diferentes caracterizaciones realizadas a la resistencia al corte de los materiales presente en los taludes. Finalmente, se han estudiado diferentes métodos de mejoramiento aplicados.

En un segundo lugar, se ha definido un caso de estudio de talud crítico ubicado en el distrito de San Miguel, al cual se le ha determinado topografía y parámetros geotécnicos a partir de diferentes investigaciones. Con estos datos, el talud es analizado para obtener las superficies críticas de deslizamiento y sus factores de seguridad. Después de ello, con los resultados obtenido se han comentado sobre las propuestas de mejoramiento de sistema de banquetas y un sistema de mallas ancladas que pueden ser aplicables para aumentar la estabilidad en la sección. Finalmente, se presenta las principales conclusiones y recomendaciones del presente trabajo.

Índice

1	CAPÍTULO I. GENERALIDADES	1
1.1	Introducción	1
1.2	Justificación	1
1.3	Alcance	2
1.4	Objetivos	2
1.5	Metodología	3
2	CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	5
2.1	Antecedentes históricos de la Costa Verde.....	5
2.2	Hechos recientes de fallas en los acantilados de la Costa Verde	6
2.3	Principales tipos de Falla en la Costa Verde.....	7
2.4	Estudios de análisis de estabilidad de la Costa verde.....	9
2.5	Métodos de mejoramiento a la estabilidad.....	10
2.6	Análisis de estabilidad de taludes ante sismos.....	14
3	CAPÍTULO III. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN: CASO DE ESTUDIO	24
3.1	Descripción del caso de estudio	24
3.2	Condiciones del sitio.....	25
3.3	Parámetros geotécnicos.....	29
4	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD.....	31
4.1	Modelo de la sección.....	31
4.2	Calibración de los parámetros de resistencia	31
4.3	Coefficiente sísmico	34
4.4	Escenarios de análisis.....	36
4.5	Análisis para las condiciones actuales	37
4.6	Mejoramiento de la sección	40
4.7	Comentarios de resultados	43
5	CONCLUSIONES	44
6	RECOMENDACIONES	45
7	BIBLIOGRAFÍA	48

Lista de Figuras

Figura 1.1: Desprendimiento en los acantilados de la Costa Verde (El Comercio, 2019).....	2
Figura 2.1: Mapa de Susceptibilidad por movimientos de masa (Villacorta, 2015).....	6
Figura 2.2: Derrumbe ocurrido en la Costa Verde, distrito de Barranco (INGEMMET, 2020).	8
Figura 2.3: Fotografía de un talud del acantilado en el distrito de San Miguel. Fuente propia	11
Figura 2.4: Superficie de falla circular dividida en dovelas. Tomado de Duncan et al, 2014	17
Figura 2.5: Superficie de falla para método de Spencer y dovela con fuerzas actuantes. Tomado de Duncan et al, 2014	18
Figura 2.6: Equilibrio de una dovela en el Análisis Pseudo-estático. Obtenido del FHWA 2011.....	19
Figura 3.1: Descripción del tramo de estudio con la sección de análisis	25
Figura 3.2: Ubicación del tramo crítico de evaluación. Obtenido de Google Maps	26
Figura 3.3: Sismos ocurridos en el Perú desde 1973 hasta el 2017, base de datos USGS. Obtenido del CISMID 2017.....	28
Figura 3.4: Espectro de peligro uniforme para Lima (IGP 2014)	29
Figura 4.1: Modelo de la sección ingresada en el software Slide2	31
Figura 4.2. Flujo de calibración de los parámetros de resistencia. Adaptado de Aguilar et Pretell (2016)	32
Figura 4.3: Conglomerado de Lima en la Costa Verde.....	33
Figura 4.4: Sección del talud para los análisis en las condiciones actuales	37
Figura 4.5: Superficie de falla circular para condiciones estáticas	38
Figura 4.6: Superficie de falla no circular para condiciones estáticas	38
Figura 4.7: Superficie de falla circular para condiciones pseudoestáticas	39
Figura 4.8: Superficie de falla no circular para condiciones pseudoestáticas	39
Figura 4.9: Sistema de mallas metálicas ancladas. Obtenido de Alva (2020)	41
Figura 4.10: Corte de perfil a un talud con el sistema de mallas ancladas. Obtenido de Alva (2020)..	42

Lista de Tablas

Tabla 2.1: Métodos para el cálculo del coeficiente sísmico en el análisis pseudoestático.....	21
Tabla 2.2 Clasificación de clase de suelos según el NEHRP.....	23
Tabla 3.1: Estudios geotécnicos realizados en los taludes de la Costa Verde	30
Tabla 3.2: Parámetros geotécnicos de la sección.....	30
Tabla 4.1: Parámetros geotécnicos calibrados de la sección.....	33
Tabla 4.2: Análisis de la relación de aceleraciones pico del suelo	36
Tabla 4.3: Factores de Seguridad mínimos según diferentes Guías de Diseño internacionales	37
Tabla 4.4: Resultados de los análisis de estabilidad	40



CAPÍTULO I. GENERALIDADES

1.1 Introducción

Los acantilados de la Costa Verde han tenido un gran cambio a lo largo de los últimos años, ya que se ha desarrollado infraestructura sobre y alrededor de estos, además de la importancia que han tomado tanto por la presencia de vías arteriales del sistema de transporte como la Av. Costanera, así como los atractivos turísticos y residenciales que tiene la zona. Estos cambios han generado, asimismo, la alteración de las condiciones de carga a la que los taludes naturales de los acantilados están expuestos.

Es por esto, que esta investigación busca analizar la estabilidad la sección crítica de un talud de los acantilados en el distrito de San Miguel mediante la utilización del software (Slide) para condiciones pseudoestáticas. Además, se busca utilizar métodos de estabilización para taludes naturales, evaluar su posible utilización y generar comentarios u recomendaciones para el caso en evaluación, como para el comportamiento en general de taludes naturales en la Costa Verde.

1.2 Justificación

Actualmente, la costa verde es una zona de suma importancia para la ciudad de Lima. En esta se encuentra la Av. Costanera, con un flujo de vehículos de más de 1000 vehículos por hora en el momento de máximo flujo vehicular (Rey et Gonzales. 2016), haciéndola una de las más importantes de la ciudad. Además, existen grandes y nuevas edificaciones cimentadas sobre o cerca a los acantilados de la zona, incrementando la carga presente en estos, por lo que se requiere de un análisis exhaustivo y constante. Por otro lado, cuenta con numerosas zonas recreativas y turísticas, por lo que posee una relevancia cultural y urbanística para la ciudad y los distritos en los que se encuentra.

Como se puede visualizar en la Figura 1.1 hubo un desprendimiento en el 2019, que generó el cierre de la Av. Costanera, además de poner en peligro las estructuras que se encontraban en la parte superior del talud (El Comercio, 2019). Este acontecimiento es una muestra de la necesidad de la actualización de los análisis realizados previamente, debido al cambio de las condiciones a las que el talud está sometido. Los problemas se dan por las técnicas que se usaron previamente y la poca precisión (Cañari et. Alva), y además del constante cambio de las condiciones de carga a la que los taludes se encuentran sometidos. Además, ciertos sectores de los acantilados son considerados como zona crítica de muy alto peligro respecto a los posibles derrumbes y deslizamientos debido a sismos o a la presencia de diferentes actividades antrópicas que afecten la estabilidad de la estructura como el riego de jardines (INGEMMET, 2019).

El análisis de estabilidad de los acantilados es un problema que está lejos de estar totalmente solucionado, y el propósito de esta investigación es el de poder aportar al estudio de un tramo del acantilado, estudiar sus condiciones de estabilidad y brindar recomendaciones para evitar los problemas mencionados previamente.



Figura 1.1: Desprendimiento en los acantilados de la Costa Verde (El Comercio, 2019).

1.3 Alcance

Esta investigación realizará el análisis pseudoestático de un tramo crítico de los acantilados de la Costa Verde ubicado en el distrito de San Miguel. Se recopilarán las investigaciones más relevantes de los parámetros de resistencia de los acantilados para su empleo en el presente trabajo. Asimismo, se utilizarán softwares de computación para el análisis de estabilidad pseudoestático y la literatura técnica vigente para determinar los métodos de equilibrio límite y el criterio del coeficiente sísmico a emplear. Finalmente, se propondrán alternativas de mejoramiento de la estabilidad y serán analizados para condiciones sísmicas para verificar que garanticen un funcionamiento correcto del acantilado y cumplan su función.

1.4 Objetivos

Objetivos principal

Analizar bajo el método pseudoestático a una sección crítica de los acantilados de la Costa Verde en el distrito de San Miguel y establecer una propuesta de mejoramiento de estabilidad.

Objetivos secundarios

- Revisar la literatura técnica vigente del análisis de estabilidad del método pseudoestático con casos aplicados en la Costa Verde para establecer una metodología de análisis y poder caracterizar los parámetros de resistencia del material característico de los taludes.

- Hacer una revisión visual y a partir de mapas de peligros a diferentes tramos de los acantilados de la Costa Verde y determinar una zona muy crítica para analizar.
- Estudiar la condición de estabilidad y determinar los factores de seguridad para condiciones de sismo de la sección crítica elegida del talud de la costa verde en San Miguel.
- Investigar las diferentes medidas de mejoramiento de taludes para proponer un diseño de mejoramiento en la sección crítica y establecer recomendaciones para mejorar las condiciones de estabilidad de los taludes de la Costa Verde.

1.5 Metodología

En primer lugar, las actividades a realizar se enfocarán en la revisión de los antecedentes históricos de los principales problemas geotécnicos ocurridos en los acantilados costa verde. Esto permitirá tener una visión global sobre los principales modos de falla y las causas asociadas a estos derrumbes. Seguido a ello se investigará sobre las secciones críticas analizadas de diferentes tramos de la Costa Verde para definir los parámetros geotécnicos a emplear y establecer una metodología de análisis.

Después, se investigará sobre las propuestas de mejoras a la estabilidad de taludes y se tendrá como referencia a la Normativa Peruana CE.020. Asimismo, se revisará las medidas adoptadas en diferentes tramos de la costa verde. Estas serán investigadas en términos técnicos y económicos para determinar su aplicabilidad en la costa verde.

Finalmente, se estudiará la teoría relacionada a la resistencia al corte y las consideraciones a tomar en cuenta de este parámetro en el análisis de estabilidad de taludes. Después, se hará una revisión del estado del arte sobre los procedimientos de análisis de estabilidad pseudo-estática para taludes naturales, esto permitirá describir sobre los métodos de cálculo y software de análisis a emplear para el trabajo. Cabe mencionar que esta revisión tendrá un enfoque en los estudios realizados a secciones críticas de la costa verde.

Una vez culminado el capítulo de la revisión de la literatura, se procede al desarrollo del caso de estudio. Para ello, en primer lugar, se debe determinar el tramo de estudio ubicado en el distrito de San Miguel y las secciones críticas a evaluar. En él, se debe determinar la topografía, las características geológicas e hidrológicas y el estudio de peligro sísmico para determinar el PGA. Después se realizará el modelo geotécnico de las secciones con estudios de suelos realizados anteriormente en zonas aledañas y se

realizará el análisis de estabilidad para diferentes casos de estudio. Seguido a ello, a partir de los resultados obtenidos se determinará la necesidad de realizar un método de estabilización, el cual será evaluado por el análisis de estabilidad. Finalmente, se darán comentarios, recomendaciones y conclusiones del tema realizado.



CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes históricos de la Costa Verde

Los existentes problemas de inestabilidad de la Costa Verde son ampliamente conocidos, pues a lo largo de los años han ocurrido diversos fenómenos de desprendimientos y derrumbes que han afectado a la infraestructura de la vía Costa Verde poniendo riesgo vidas de personas que transitan por allí. El tema es más relevante aún al tener en cuenta la alta sismicidad de Lima, lo cual aumenta las probabilidades de los riesgos geotécnicos. Es por ello, que desde hace años los acantilados de la Costa Verde se vienen analizando y estableciendo propuestas de mejora.

Si bien el conglomerado de Lima es el material predominante de los acantilados, el cual tiene una muy buena resistencia al corte debido a su composición química y granulometría. Sin embargo, según uno de los primeros estudios técnicos realizados a los acantilados de la Costa Verde de Carrillo (1979), debido a factores como la aceleración sísmica en Lima, la presencia de inter-estratos finos o materiales sueltos, la infiltración de agua e incremento de la presión de agua debido a construcciones aledañas, se han originado varios casos de inestabilidad.

Desde los años 80s, las municipalidades y el gobierno central comenzaron a realizar obras de infraestructura vial en la Costa Verde, mejoramiento del saneamiento para el manejo de aguas servidas al mar y obras recreativas. En 1995, se empezó el estudio Plan Maestro de Desarrollo de la Costa Verde para la realización de planes para la recuperación del espacio urbano y la construcción de estructuras (IMP, 1995). Debido a estos proyectos, se han generado obras de estabilidad de los taludes como la colocación de material de enrocado como contrafuerte al pie de los acantilados y, la ejecución de cortes a los taludes para tener inclinaciones menores (Geology of Lima, 1997).

Además, estos proyectos generaron atención de la ingeniería para estudiar la estabilidad de los acantilados y proponer proyectos de mejoramiento. Es por ello que, diferentes autores e instituciones han realizado informes de análisis, tesis de investigación, caracterización de los materiales, evaluación de peligro, entre otros más. De ellas destacan el foro técnico desarrollado por la CISMID-FIC-UNI (1996) cuyo nombre fue “La Costa Verde: diagnóstico, propuestas y soluciones” y que planteo diferentes medidas de estabilización de taludes y análisis de estabilidad.

Luego está la tesis “Análisis de Estabilidad de Taludes de la Costa Verde” de Cañari (2001) que reúne un conjunto de trabajos realizados sobre la estabilidad de los acantilados, en este trabajo resalta la campaña geotécnica y de laboratorio realizada, los análisis de los taludes por estabilidad y caída de rocas y, la generación de un mapa de zonificación en términos de riesgo de los acantilados de la Costa Verde desde la bajada Bertolotto en San Miguel hasta la Bajada Armendáriz en Miraflores. Esta zonificación fue creada a partir de los resultados de factor de

seguridad de los análisis de estabilidad de equilibrio límite, la evaluación de caída de rocas y la cercanía con estructuras. Finalmente, también propone diferentes métodos de mejoramiento de la estabilidad de los taludes incluyendo en algunos parámetros de diseño.

Como estudios más recientes se tiene al boletín publicado por Villacorta et al. (2015) para el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico INGEMMET, donde se estudió los principales peligros geológicos del área de Lima Metropolitana. En él. se catalogó a la Costa Verde como una de las zonas más críticas de las 107 identificadas, cuyos peligros consisten en caída de rocas, derrumbes y procesos de erosión. Además, el estudio también realizó un análisis de susceptibilidad a movimientos de masa de la Costa Verde (Ver Figura 2.1). En dicha figura se puede observar que varios tramos de la Costa Verde presentan una susceptibilidad muy alta.

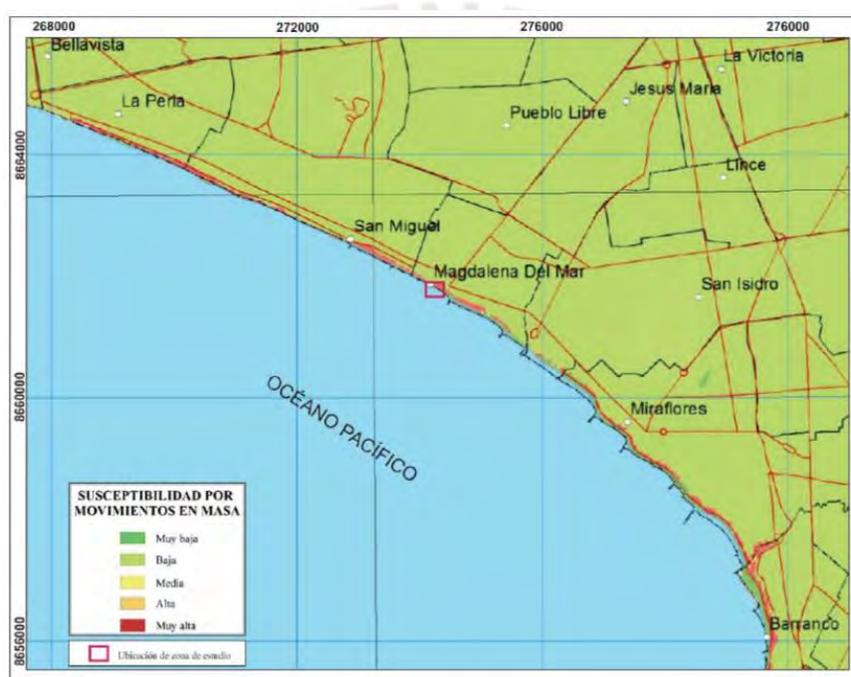


Figura 2.1: Mapa de Susceptibilidad por movimientos de masa (Villacorta, 2015)

2.2 Hechos recientes de fallas en los acantilados de la Costa Verde

A partir de lo explicado en el anterior acápite, se puede concluir que existen altas probabilidades de falla en varios tramos de los acantilados de la Costa Verde cuyos detonantes principales son los movimientos de sismo, las precipitaciones y procesos de infiltración en el talud. En las siguientes líneas se comentan 3 hechos de movimientos ocurridos de los últimos 3 años que han sido estudiados con una evaluación de peligro geológico por el INGEMMET. Los dos primeros sucesos ocurrieron bajo condiciones estáticas y el último reúne un conjunto de caídas y derrumbes generadas debido a una condición de sismo.

El Informe Técnico A6930 del INGEMMET (2019) realizó una evaluación al malecón Castagnola ubicado en el distrito de Magdalena del Mar que tuvo un suceso de derrumbe y caída

de material, en la Figura 1.1 se puede observar el hecho. Como contenido del informe se tiene a un estudio de los factores condiciones que principalmente fue debido al tipo de suelo de desmonte de dicho sector y un mal sistema de riego que saturó a los suelos. Asimismo, se clasificó a la zona como crítica con muy alto peligro de ocurrencia de caída de rocas y derrumbe. Y, finalmente, se brindaron recomendaciones para reducir la vulnerabilidad de la zona y evitar la generación de nuevas ocurrencias en el futuro.

Por su parte, el Informe Técnico A7020 del INGEMMET (2020) se generó para la evaluación técnica de los peligros geológicos asociados al movimiento de masa de tipo derrumbe ocurrido en el Malecón Pedro de Osma en el distrito de Barranco. En el informe se describen que los factores condicionantes de la falla fueron principalmente la fuerte pendiente del terreno, el tipo de depósito coluvial conformado por intercalaciones de suelos material grueso (grava) y suelos finos (limo-arcilla) y la presencia de hasta tres familias de discontinuidades. Finalmente, también se brindan propuestas de solución de mejoramiento de taludes para minimizar las ocurrencias en dicho sector.

El hecho más reciente de falla en los acantilados de la Costa Verde fue en junio del presente año originado por el sismo de Mala de una magnitud de 6.0. Este suceso desencadenó la caída de material de naturaleza aluvial y antropógeno de relleno en diferentes sectores de los acantilados en los distritos de Barranco, Chorrillos y Miraflores. Según el Informe Técnico (2021), que estudió los peligros geológicos ocasionados por el sismo, determinó que los factores condicionantes que originaron los derrumbes son principalmente la fuerte pendiente, la cobertura de suelos antropógenos de relleno conformado por cultivos y desmonte de construcción y el material detrítico aluvial compuesto por conglomerados poco a medianamente consolidados.

De estos tres últimos hechos de fallas en los acantilados se ve que los factores condicionantes de falla que tienen en común son las fuertes pendientes del acantilado, la presencia de material antropogénico de relleno o de material de tipo suelto como capas intermedias en la matriz del suelo y cobertura de suelo vegetal ausente.

2.3 Principales tipos de Falla en la Costa Verde

En la Costa Verde se tienen como principales peligros geológicos al movimiento de masas de tipo caídas (derrumbes) y a los procesos de erosión de laderas que genera caída de suelos superficiales. Como se ha comentado anteriormente, estas fallas tienen como factores condicionantes a la geometría del terreno, la pendiente, el tipo de roca o suelo, drenaje superficial-subterráneo y la cobertura vegetal. Y como factores detonantes a los eventos de precipitaciones pluviales periódicas y los movimientos sísmicos (INGEMMET, 2019). A continuación, se comentan los tipos de fallas comunes en la Costa Verde.

2.3.1 Caídas (Derrumbes)

Este evento se refiere a la caída de uno o varios bloques de suelo o roca de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie de falla ocurra un desplazamiento cortante apreciable (INGEMMET, 2019). Una vez el material es desprendido, cae desplazándose y puede efectuar golpes, rebotes y rodamiento en su trayecto (Varnes, 1978). Estos bloques, dependiendo de factores como su peso y altura, pueden llegar a alcanzar grandes velocidades y fuerzas de impacto.

Según el mecanismo principal de falla y el material involucrado, las caídas pueden ser subdivididas en tres tipos principales: aludes, caída de rocas y derrumbes. Este último se trata de desprendimiento de masa de suelo, roca o ambas a lo largo de superficies irregulares de arranque como una sola unidad. Su ocurrencia se da principalmente en laderas de montaña, paredes verticales en acantilados y en taludes de corte de fuerte pendiente casi verticales (INGEMMET, 2019). Este además consiste en uno de los tipos de falla más comunes en la Costa Verde, en el acápite 2.2 se describen hechos recientes con este mecanismo de falla. En la siguiente figura se muestra este tipo de falla ocurrido en una ladera de la costa verde ubicado en Barranco.



Figura 2.2: Derrumbe ocurrido en la Costa Verde, distrito de Barranco (INGEMMET, 2020).

2.3.2 Erosión de Laderas

Este tipo de evento si bien son de corta magnitud y se trata de un proceso erosivo de material superficial, en muchos casos son predecesoras de la ocurrencia de grandes eventos de movimientos de masa (INGEMMET, 2019). Estos procesos erosivos tienen como factores de causa a los vientos y a las precipitaciones. Para este último, con el impacto de las lluvias y la formación de escorrentías en el suelo se generan fuerzas tractivas que vencen la resistencia de las partículas del suelo dando pie a los procesos erosivos (Duque et al., 2016). Además, los procesos

erosivos de las laderas también pueden ser originadas a la escorrentía formada por el uso excesivo de aguas de riego, por lo que se debe tener un especial cuidado de esto para la Costa Verde.

2.4 Estudios de análisis de estabilidad de la Costa verde

Una investigación de análisis de estabilidad que destaca es la tesis de Cañari (2001) que además de realizar el cálculo para diferentes secciones desde San Miguel hasta Miraflores, ejecutó una campaña de exploración de campo con ensayos in-situ de corte directo a gran escala lo cual permitió caracterizar al conglomerado existente en los acantilados. Además, realizó diversos ensayos de laboratorio a muestras extraídas con ensayos de corte directo y compresión no confinada. Por ello, este trabajo es una buena guía para la caracterización de los parámetros de resistencia para los análisis de estabilidad.

Otro tema relevante de esta investigación es el estudio de la sismicidad y evaluación de peligro sísmico realizado. Pues el trabajo recomienda emplear un valor de coeficiente sísmico en un rango de 0.20 a 0.25 el análisis pseudoestático de obras proyectadas en el acantilado. Por lo que se puede tener como guía este rango de coeficientes sísmicos en el desarrollo de los análisis del presente trabajo.

Una investigación de tesis posterior de Pablo Urrutia (2008), introduce el tema de la evaluación dinámica mediante el método de elementos finitos en los taludes de la Costa Verde. Este tipo de análisis permitió someter a los taludes a eventos de sismo de Lima y conocer el comportamiento de los taludes durante y después del sismo en términos de deformaciones y estabilidad. De manera similar, en la tesis de Luis Raygada (2011), se realizó un análisis estático y pseudoestático a secciones críticas de taludes de la Costa Verde, y se complementa con análisis de deformaciones permanentes y un análisis dinámico por medio de elementos finitos. Estos dos trabajos permiten establecer conclusiones acerca del empleo del análisis pseudoestático y tener una metodología de análisis a los taludes.

Finalmente, una investigación a tener como referencia es la efectuada por Aguilar et Pretell (2016). Allí se analiza un talud del distrito de San Miguel por medio de una evaluación estática usando el enfoque de reducción de resistencia del software FLAC y se realiza un análisis dinámico para determinar las deformaciones sísmicas permanentes. Esta investigación aporta en el modelo geológico estratigráfico del talud de estudio, así como los parámetros a emplear al tratarse de una sección cercana a la de la investigación presente

2.5 Métodos de mejoramiento a la estabilidad

2.5.1 Introducción

La estabilización consiste en el proceso físico en la cual se mejoran las condiciones del suelo y se aumenta la estabilidad del talud. Según la Normativa peruana CE.020 llamada Estabilización de suelos y taludes (2012), la estabilización de taludes consiste en una solución geotécnica integral que se implementa en un talud para darle la capacidad de un equilibrio suficiente y sostenible ante condiciones estáticas y sísmicas. Esta normativa define 5 metodologías de estabilización y remediación del talud que consisten en caminos a seguir para brindar estabilidad al talud, estas son las siguientes:

- **Disminución de las presiones hidrostáticas:** para taludes saturados, las presiones hidrostáticas acumuladas disminuyen la resistencia al corte, lo cual perjudica la estabilidad. Por ello, esta metodología establece incorporar soluciones de drenaje superficial y drenaje profundo al talud.
- **Disminución de los esfuerzos cortantes solicitantes:** Esta metodología propone la disminución de la inclinación del talud a una pendiente específica. En ella se pueden proponer el uso de bermas de equilibrio, cortes en la cresta, relleno en la base, entre otras alternativas de configuración de la sección.
- **Introducción de fuerzas resistentes:** Consiste en incorporar fuerzas resistentes externas que se integren en el talud para apoyar a la condición de estabilidad. Estas pueden consistir en un sistema de anclajes.
- **Mejoría de las propiedades del depósito del talud:** Esta consiste en mejorar los parámetros geotécnicos del material del talud por medio de aditivos químicos, vegetación, entre otras medidas.
- **Incorporación de inhibidores o controladores de energía de caída:** Consisten en medidas como Apoyos externos estructurales o barreras de protección para los taludes que presenten bloques inestables, rocas muy fracturadas. Entre las barreras de protección destacan las mallas metálicas, los muros de impacto y las cercas de retención.

En cada proyecto se debe decidir cuál de estos caminos es el más apropiado para la mejoría del talud en base a sus particularidades. Dentro de cada metodología existen diferentes soluciones ingenieriles como se han descrito anteriormente que cumplen el mismo objetivo pero que varían en factores técnicos, económicos, de personal y maquinaria, entre otros. Para cada proyecto se debe evaluar cada solución para establecer comparaciones y concluir cuál es la elección más conveniente.

Como se ha podido apreciar en la sección 2.2, en la Costa Verde los tipos de fallas típicos se tratan de derrumbes y caídas de cantos rodados. Entonces las soluciones geotécnicas a emplear tienen que enfocarse en el tratamiento de estos peligros principalmente. Múltiples trabajos de investigación, tesis e informes técnicos han recomendado después de haber realizado el análisis de estabilidad propuestas de mejoramiento de estabilidad para reducir o eliminar los peligros. De todas las medidas de solución recomendadas, es importante dividir las en dos grandes grupos: el primero basado en medidas activas que actúan desde la causa del fenómeno y el segundo de medidas pasivas que reducen los efectos de los problemas sin eliminar la causa (Díaz, 2008).

A lo largo de la costa verde se observan diferentes medidas para la estabilidad y mitigación de los peligros, específicamente en el distrito de San Miguel se puede ver el uso de mallas metálicas colgadas, un sistema de contención al pie del talud con mallas, arboles sembrados al pie del talud y algunas zonas con vegetación. También hay trabajos de perfilado del talud para zonas de bajadas peatonales hacia la costa. En la Figura 2.3 se observa una sección crítica en el distrito de San Miguel donde se observan las medidas de mitigación mencionadas anteriormente y zonas donde los suelos aparentan estar en un estado de inminente caída. Asimismo, en la sección de Anexos de Fotografías se muestran fotos de los diversos taludes de los acantilados del distrito de San Miguel.



Figura 2.3: Fotografía de un talud del acantilado en el distrito de San Miguel. Fuente propia

Sin embargo, estas medidas no otorgan suficiente protección para los peligros geológicos de derrumbes en varios tramos que se encuentran en un estado de caída inminente y con pendientes casi verticales, clasificados como zonas críticas. A estas zonas se le deben realizar un trabajo de mejoramiento de talud, en las siguientes líneas se comenta algunas de las principales soluciones geotécnicas para la estabilización de taludes en la Costa Verde.

2.5.2 Método de corte de talud

Este método consiste en realizar trabajos de movimientos de tierras que generen cortes y relleno del talud de tal forma de darle una configuración que mejore la estabilidad global. Los trabajos pueden disminuir los ángulos de los perfiles del talud, reducir la altura, formar banquetas o algún tipo de escalamiento (Díaz, 2008). El principal limitante es el tema presupuestal que involucran estos trabajos ya que se requiere grande maquinaria.

Es recomendable el uso de este método para taludes que se encuentren muy empinados y escarpados, con partes salientes que estén en inminente caída o en peligro de desprenderse por su posición inestable.

2.5.3 Método de vegetación

La vegetación se trata de un método activo que mejora las condiciones del talud natural y batalla directamente con los procesos erosivos, falla común en la Costa Verde. Este método consiste en colocar una barrera física de vegetación delante de la superficie del talud que evita el desprendimiento del material y le brinda una aparente cohesión lo cual estabiliza el talud superficialmente.

Los acantilados de la Costa Verde presentan varios tramos con vegetación que protegen a los taludes de los procesos erosivos fluviales y eólicos. Sin embargo, en varios tramos existen dificultades para el crecimiento de vegetación por condiciones como la verticalidad excesiva y el tipo de material gravoso. Para ello, existen metodologías como la hidrosiembra que permite el plantado de la vegetación y se realiza por medio de rociamiento de una emulsión compuesta por aglutinante, nutrientes que permite la vegetación (Díaz, 2008). Así también existe un sistema de geomallas que permite crear un espesor de estrato orgánico para la vegetación en caso el terreno no sea apto para este método.

Cabe mencionar que, según Díaz (2008) se debe tener cuidado con el riego y emplear para esta metodología un riego de tipo por goteo y no por inundación, pues este último puede llegar a debilitar las propiedades resistentes al aumentar la presión de poros y aumentar su peso, incrementando así las fuerzas desestabilizantes.

2.5.4 Empleo de muros de gaviones

Los muros de gaviones consisten en un método fácil de construir para evitar que las caídas de cantos rodados y procesos erosivos de los taludes afecten a las zonas próximas. Este muro es un sistema de cajas de mallas de alambre rellenos con piedras de diferentes tamaños. Esta conformación lo vuelve un elemento flexible y actúa como una estructura monolítica que es construida en diferentes niveles y espesores (Cañari, 2001). Además, debido a las granulometrías de las piedras se tratan de material bien permeable sobre el cual es posible plantar vegetación.

2.5.5 Empleo de mallas metálicas ancladas

Las mallas metálicas consisten en un sistema de red metálicas de doble o triple torsión que son ancladas y se generan un tipo de pantallas a lo largo del talud que trabajan por equilibrio límite para soportar los empujes del terreno. Las mallas metálicas se pueden clasificar en dos grandes grupos según la densidad del anclado y su forma de colocación: mallas colgadas y mallas adosadas. Las primeras encauzan el movimiento del material que cae del talud haciendo que se acumule al pie del talud. Mientras que, las mallas adosadas van prácticamente pegadas al talud evitando que los materiales de las zonas inestables se muevan (Díaz, 2008).

A lo largo de los acantilados de la Costa Verde se observa principalmente el tipo de mallas colgadas cuyo anclaje se encuentra en la parte de la cresta de los taludes y al pie de los mismos. Además, este sistema de mallado requiere en la zona del pie del talud como complemento a muros de gaviones cunetas o bermas para almacenar el material caído. Este sistema resulta efectivo cuando se tratan de caída de rocas que es común en la Costa Verde, pues se observa en muchos tramos presencia de material rodado en el pie del talud. Por otro lado, el otro tipo de malla de tipo adosada ha sido empleada en los taludes de la costa verde próximos a la edificación del Museo Lugar de la Memoria en el distrito de San Isidro. Debido a la proximidad con la estructura y el paso de personas, se requirió de este diseño de enmallado, donde se crearon mallas hexagonales con de doble torsión de 8x10 formando paños de 3 metros de lados (Alva J., 2020).

2.6 Análisis de estabilidad de taludes ante sismos

2.6.1 Resistencia al corte

Criterio de rotura

Dentro de los parámetros mecánicos para el análisis de estabilidad, el que gobierna este cálculo es el de la resistencia al corte, la cual representa la resistencia por unidad de área del suelo ante la acción de fuerzas desestabilizantes las cuales causan una falla o un posible deslizamiento. (Braja M. Das, Khaled Sohan, 2014).

En cuanto a los criterios de falla, estos describen y definen diferentes parámetros geotécnicos del suelo, uno de ellos siendo la resistencia al corte del suelo evaluado. Existen distintos criterios de falla, siendo Mohr-Coulomb el más utilizado para caracterizar los suelos, sobre todo para suelos granulares.

El criterio de falla de Mohr Coulomb consta de una envolvente de falla en la cual se relaciona el esfuerzo normal con la resistencia al corte o el esfuerzo de corte. Para efectos prácticos, se puede utilizar una relación lineal, la cual se presenta a continuación

$$\tau_f = c + \sigma \tan(\phi)$$

Donde τ_f es resistencia al corte en el plano de la falla, c es cohesión, σ es el esfuerzo normal en el plano de falla y ϕ es el ángulo de fricción interna.

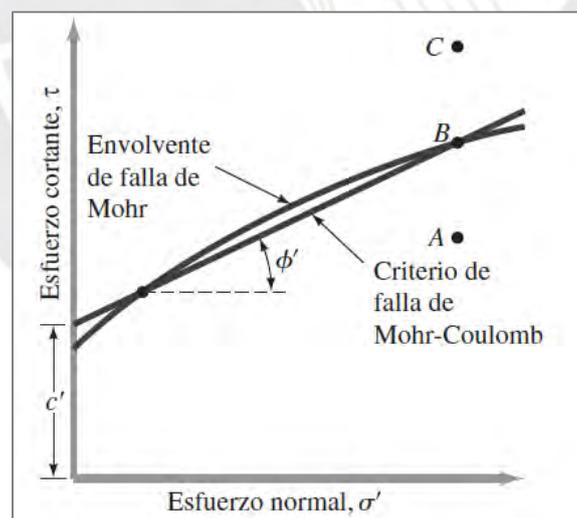


Figura: Criterio de rotura de Mohr – Coulomb (Das, 2014)

Consideraciones de la resistencia al corte

a) Condiciones de drenaje

Evaluar la condición en la que el suelo se encuentra respecto al drenaje determina la condición de parámetros geotécnicos a utilizar en el análisis, ya que condiciona el

comportamiento del suelo. El drenaje hace referencia a la permeabilidad del suelo y el tiempo en que el agua se transporta en el suelo, y comparándolo con las etapas de construcción y carga a las que finalmente el suelo será sometido (Das, 2014). Esta condición depende del tipo de suelo y su permeabilidad, las etapas de carga o construcción y las posibles formaciones geológicas con sus respectivas fisuras.

Existen dos estados, el suelo drenado o el no drenado. El primero hace referencia a una condición en la cual el agua contenida va a fluir fuera del suelo a la par con los procesos de carga al suelo. La segunda, denota una condición en la que el suelo no ha permitido que el agua contenida fluya a pesar de los cambios de carga o construcción aplicada. Asimismo, una vez generados los procesos de carga, se tiene una variación en la presión de poros que se va disipando en el tiempo. (Duncan et. Al, 2014).

b) *Métodos de esfuerzos efectivos*

Los esfuerzos efectivos hacen referencia a los esfuerzos en donde se incluye la presión de poros y se resta respecto a los esfuerzos totales, para una condición drenada. Para el análisis se requiere de parámetros de resistencia al corte efectivos, así como valores de la presión de poros y el peso unitario del suelo evaluado.

c) *Método de esfuerzos totales*

A diferencia de los esfuerzos efectivos, en este caso no ha ocurrido un proceso de disipación de presión de poros ya que se trata de un momento inmediato post construcción. El análisis con esfuerzos totales se suele usar para evaluaciones a corto plazo, dada la situación en la que se encuentran los parámetros geotécnicos. Para el análisis se requiere de parámetros de resistencia al corte totales y el peso unitario del suelo evaluado

d) *Análisis a corto y largo plazo*

Las estructuras de tierra se pueden analizar a corto y largo plazo, debido a las diferentes condiciones explicadas previamente, respecto a cargas, tiempo y presión de poros. Respecto a corto plazo, se tiene un análisis inmediato post construcción. Se evalúa las condiciones de drenaje (suelo drenado o no drenado) y se analiza el caso del tipo de esfuerzos (efectivos o totales). En cambio, para el análisis a largo plazo se tiene un equilibrio, por lo que se trata de una condición drenada y el análisis se daría en esfuerzos efectivos.

2.6.2 *Superficie de falla*

En el análisis de estabilidad de taludes, el principal objetivo es determinar el factor de seguridad de del talud promedio (FS), ya que se asume igual para todos los puntos a lo largo de la superficie de falla, y se define:

$$FS = \frac{S}{\tau} \quad (1)$$

Donde s es la resistencia al corte al suelo, y τ el esfuerzo cortante sobre la superficie de falla. El factor de seguridad representa el factor por el que la resistencia al corte debe ser dividida para ser equivalente al esfuerzo que soporta la falla, generando una relación directa entre ambos parámetros. Esta resistencia al corte puede expresarse con la fórmula de Mohr-Coulomb, en términos de esfuerzos efectivos:

$$\tau_f = \frac{c' + \sigma' \tan(\phi')}{FS} \quad (2)$$

Cabe notar que, si el valor de FS es mayor al entero, se estaría cumpliendo el equilibrio (Duncan et al, 2014). Además, generalmente según las normativas de diseño, se establece como mínimo aceptable un factor de seguridad mayores a 1 según la condición de análisis del diseño.

2.6.1 Procedimiento de las dovelas

Para el análisis de estabilidad de taludes, este procedimiento implica la división del suelo en dovelas verticales sobre la superficie de deslizamiento, para así evaluar la estabilidad de cada dovela por separado. El número de dovelas dependerá de la geometría y el perfil del suelo, el cual será determinado por el software a utilizar. Gracias a esta técnica, se tiene en cuenta los parámetros de: (i) no homogeneidad del suelo, (ii) la presión de poros y (iii) la variación del esfuerzo normal sobre la superficie de falla potencial.

El procedimiento parte de asumir el tipo de superficie de falla, la cual se puede asumir como: (i) circular de deslizamiento o (ii) arbitraria no circular. A continuación, se presenta las metodologías de desarrollo de los casos señalados, para así determinar los cálculos de equilibrio de dovelas y factor de seguridad global. Cabe mencionar que el procedimiento de las dovelas para superficies circulares no es empleado en el análisis de estabilidad debido a las características granulares del suelo, sin embargo, se presenta su fundamento teórico a continuación para la comprensión extensiva del procedimiento de las dovelas.

Procedimiento de dovelas: superficie circular

Inicialmente, se evalúa el equilibrio de momentos respecto al centro del círculo trazado por la falla y los momentos resistentes por esfuerzo cortante en la superficie de falla. En la Figura 2.4 se observa la superficie de falla con sus respectivos componentes de radio (r), las dovelas con su respectivo peso (W_i), brazo de palanca (a_i) entre el centro del círculo y el centro de la dovela, fuerza cortante en la superficie de falla (S_i) y su ángulo de inclinación (α_i).

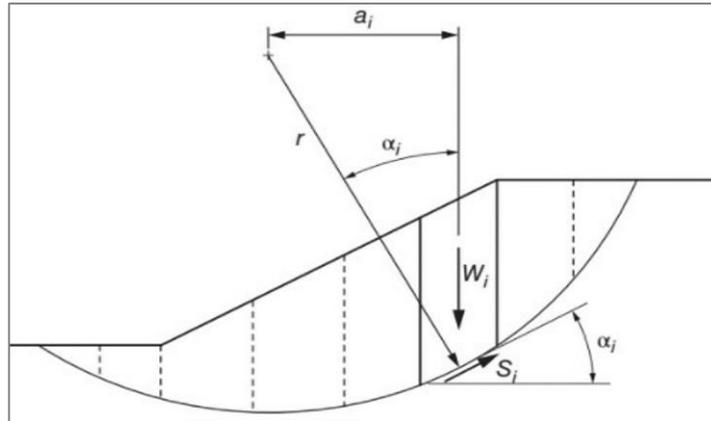


Figura 2.4: Superficie de falla circular dividida en dovelas. Tomado de Duncan et al, 2014

El momento de resistencia del tramo se produce por el esfuerzo cortante en la base de la dovela, y puede representarse en términos de factor de seguridad:

$$M_r = r \sum S_i = \sum \tau_i \Delta l_i = \sum \frac{s_i \Delta l_i}{F} \quad (3)$$

Donde τ representa el esfuerzo cortante y Δl el área de la base de la dovela por unidad de ancho. Así, es posible expresar el factor de seguridad en términos del momento, donde el total de esfuerzos, la resistencia al corte se expresa como $s = (c + \sigma \tan \phi) \Delta l_i$.

$$F = \sum \frac{(c + \sigma \tan \phi) \Delta l_i}{W \sin \alpha} \quad (4)$$

La ecuación presentada se resuelve mediante cálculos con asunciones adicionales y encontrar el factor de seguridad, ya que hallar el esfuerzo normal resulta estáticamente indeterminado.

Procedimiento de dovelas: superficie no circular

Con este método es posible trabajar formas más complejas de deslizamiento, siendo útil para estratos débiles o con presencia de otros materiales como geosintéticos. El método de dovelas y cálculos de ecuaciones de equilibrio continua vigente, a continuación se comentan dos métodos de cálculo para la solución de este procedimiento: (i) Método de Spencer y (ii) Método de Morgenstern & Price.

a) Método de Spencer

Se asume que las fuerzas entre dovelas son paralelas y la fuerza normal actúa en medio de la base de cada una de ellas. Con esto se resuelve el equilibrio general de fuerzas y momentos de cada dovela, como se observa en la figura #, y haciendo uso de las ecuaciones presentadas a continuación:

$$\sum Q_i = \sum (Z_i - Z_{i+1}) = 0 \quad (5)$$

$$\sum Q(x_b \cdot \text{sen}\theta - y_Q \cdot \text{cos}\theta) = 0 \quad (6)$$

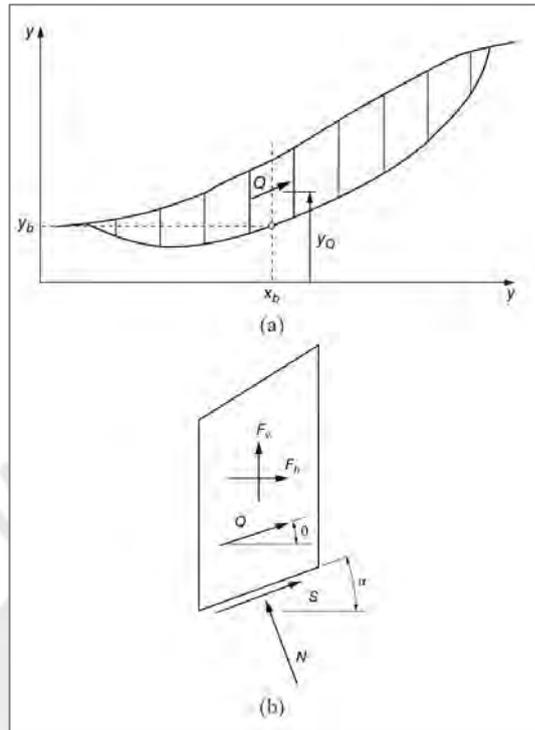


Figura 2.5: Superficie de falla para método de Spencer y dovela con fuerzas actuantes. Tomado de Duncan et al, 2014

La figura representa gráficamente la superficie de falla. Z representa las cargas laterales con ángulo de inclinación cuya resultante equivale a Q , mientras que, en la ecuación anterior de momentos, x_b y y_Q son las coordenadas hacia el centro de la dovela (Spencer, 1967). Bajo el sistema gráfico presentado en la figura anterior se expresa las siguientes ecuaciones, la cual permite determinar la distancia y_Q y el valor Q :

$$y_Q = y_B + \frac{M_0}{Q \cdot \text{cos}\theta} \quad (7)$$

$$F = \frac{-F_v \cdot \text{sen}\alpha - F_h \cdot \text{cos}\alpha - \left(\frac{c' \cdot \Delta L}{FS}\right) + (-F_v \cdot \text{cos}\alpha - F_h \cdot \text{sen}\alpha - u \cdot \Delta L) \cdot \left(\frac{\text{tan}\phi'}{FS}\right)}{\text{cos}(\alpha - \theta) + \left(\frac{\text{sen}(\alpha - \theta) \cdot \text{tan}\phi'}{FS}\right)} \quad (8)$$

Por último, al reemplazar las dos expresiones en el equilibrio, se determinan el factor de seguridad y la inclinación θ de las fuerzas entre dovelas.

b) Método de Morgenstern & Price

Para este método supone una relación entre fuerzas cortantes y normales de dovelas:

$$X = \lambda \cdot f(x) \cdot E \quad (9)$$

X y E representan las fuerzas verticales y horizontales respectivamente, λ es un factor de escala a calcular y $f(x)$ es una función prescrita para los valores a cada lado de la dovela; y nuevamente, las fuerzas normales se asumen a la mitad de la base. Los valores desconocidos son el factor de seguridad, parámetro de escala, fuerzas normales, fuerzas horizontales y sus ubicaciones (Morgenstern & Price, 1965).

El método es similar al procedimiento propuesto por Spencer, y la mayor diferencia radica en la flexibilidad al adicionar supuestos de inclinaciones entre fuerzas. Price asume un patrón en la inclinación de fuerzas laterales entre dovelas a través de $f(x)$ y un único parámetro de escala. Si la función $f(x)$ fuese constante, se obtendrían los mismos resultados que en el método de Spencer; y en general el patrón

2.6.2 Análisis Pseudo estático

Una manera para evaluar el efecto del sismo en la estabilidad del talud es por medio del análisis pseudo estático. Este método consiste en ingresar una fuerza horizontal en el centroide en cada dovela cuya magnitud es una fracción de la máxima aceleración del suelo PGA multiplicado por el peso de la dovela. En la Figura 2.6 se observa el equilibrio de fuerzas de la dovela en un análisis pseudoestático donde se muestra la fuerza horizontal. Cabe mencionar que, el análisis pseudoestático permite abarcar la evaluación de la estabilidad en sismos para suelos que no presentan una excesiva pérdida de su resistencia ante grandes deformaciones (Duncan, 2014).

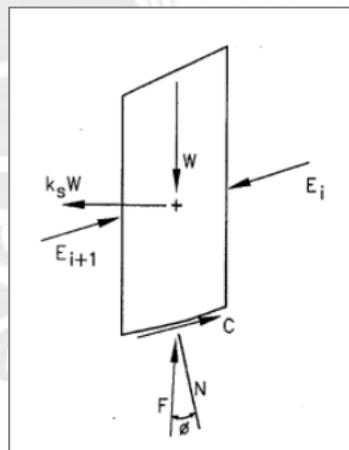


Figura 2.6: Equilibrio de una dovela en el Análisis Pseudo-estático. Obtenido del FHWA 2011

En el análisis pseudoestático se debe tener en cuenta que tipo de método de cálculo de equilibrio puede ser empleado de manera correcta según el cumplimiento de las condiciones de equilibrio. Por ejemplo, el Método Simplificado de Bishop no satisface completamente el equilibrio de las fuerzas horizontales de equilibrio. Por ello, su aplicación para análisis de métodos pseudoestático es cuestionable debido a que se añaden fuerzas horizontales del sismo en el cálculo. En cambio, los métodos de Spencer y Morgenstern & Price si son recomendables ya que

satisfacen todas las condiciones de equilibrio y no se restringen a un análisis de superficies de falla circulares.

Los procedimientos del análisis pseudoestático son comunes en la práctica de la ingeniería para realizar una evaluación preliminar del desempeño sísmico de estructuras de tierra o taludes naturales (Macedo 2017). Esto es debido a su simplicidad de cálculos y rapidez en la obtención de resultados a través del uso de software avanzados actuales. Sin embargo, para que este análisis simplificado tenga confiabilidad debe reflejar de manera correcta la demanda sísmica a través de la estimación del valor de la máxima aceleración del suelo y posterior a ello con el correcto empleo de un coeficiente sísmico.

El coeficiente sísmico puede estar desde un rango significativamente menor que el 50% del PGA, esto dependerá de la altura del talud, criterio del diseñador y los requerimientos de desempeño (FHWA 2011). Un concepto a introducir es el valor del PGA ajustado a la altura que depende del peligro sísmico e incrementa con la altura del talud. El coeficiente sísmico siempre es igual o menor que el PGA ajustado a la altura, por lo general en el orden del 50% de su valor. Por ello, el coeficiente nunca será mayor que el PGA del sitio y es típicamente igual o menor que el 50% del PGA del sitio (FHWA 2011).

La razón por la que el coeficiente sísmico puede ser menor que la aceleración promedio pico es que el sismo produce fuerzas de inercia de una naturaleza alternativa. Esta alternancia de fuerzas sucede en un corto período de tiempo y su dirección cambia muchas veces y, por ello, solo pequeños desplazamientos pueden ocurrir (FHWA, 2011). Estos criterios proveen la base para la selección de un apropiado coeficiente sísmico que será explicado a detalle más adelante bajo el método del FHWA.

Existe una diversidad de métodos para determinar el coeficiente sísmico a emplear en el análisis. Cada uno de ellos tiene asociado el tipo de aceleración del suelo empleado, la deformación tolerable y el factor de seguridad calculado mínimo. Los principales criterios para determinar el coeficiente sísmico han sido desarrollados por diversos autores como Seed (1979), Hynes-Griffin & Franklin (1984), Bray et al. (1998), entre otros más recientes como Bray & Travararou (2009) y el FHWA (2011). En la siguiente tabla se resumen los métodos sugeridos para desarrollar el enfoque de análisis pseudoestático.

Tabla 2.1: Métodos para el cálculo del coeficiente sísmico en el análisis pseudoestático

Referencia	Aceleración de referencia a_{ref}	Multiplicador de la aceleración a/a_{ref}	Factor de reducción de resistencia	Factor de Seguridad Mínimo	Deformación tolerable
Seed (1979)	0.75g (M~6,5)	0.133	0.85	0.85	Aprox. 1m
	0.75g (M~8,25)	0.167	0.85	0.85	Aprox. 1m
Hynes-Griffin and Franklin (1984)	PGA_{rock} (M<8.3)	0.5	0.8	1.0	1 m
Bray et al. (1998)	PGA_{rock}	0.75	Usar resistencias conservadoras	Usar resistencias conservadoras	1
Bray and Travararou (2009)	Aceleración espectral, S_a (5% amort. y a un período específico)	Depende de la altura del talud y la deformación	1.0	Varía	Varía

Nota. Elaboración propia, basado de Duncan et al., 2014.

La tabla anterior debe entenderse de la siguiente manera: Para una metodología de análisis empleada se debe usar la aceleración de referencia mostrada en la columna 2, el multiplicador de la aceleración en la columna 3, y el factor de reducción de la columna 4 para los parámetros de resistencia y debe resultar un factor de seguridad mayor o igual que la columna 5. Esto indicará que las deformaciones inducidas por el sismo no serán mayores que la columna 6 (Duncan).

Método de Bray and Travararou (2009)

El método de Bray & Travararou resulta de los más sofisticados y recientes para la estimación del coeficiente sísmico para análisis pseudoestático. Estos autores (2009) proponen una base racional para seleccionar el coeficiente requiriendo que este proporcione una evaluación sísmica que sea consistente con un análisis sísmico de desplazamientos del talud. Entonces se tiene la siguiente ecuación calibrada dependiente de un desplazamiento para evaluar el coeficiente sísmico:

$$k = \exp\left(\frac{-a + \sqrt{b}}{0.780}\right) \quad (10)$$

Donde

$$a = 3.353 - 0.538 \ln(Sa(1.5Ts)) \quad (11)$$

$$b = a^2 - 1.560(\ln(D_a) - a1 - 3.060\ln(Sa(1.5Ts))) \quad (12)$$

$$+ 0.225\ln(Sa(1.5Ts))^2 - a2Ts - a3Ts - 0.5550M$$

$$- \varepsilon)$$

En estas ecuaciones, las constantes a dependen del período inicial de la masa de suelo deslizando. D_a (en cm) se refiere al desplazamiento sísmico permisible que debe ser definido por el ingeniero junto con el porcentaje de deformación excedente ε . M es la magnitud de momento de diseño del evento sísmico. Sa es la aceleración espectral para un amortiguamiento del 5% al período de la masa de suelo deslizando.

Como se ha podido observar, el coeficiente usado en el enfoque pseudoestático es tomado como una fracción del máximo coeficiente sísmica debido a que la excedencia de la máxima resistencia sísmica en pequeños instantes solo llevará a una pequeña deformación sísmica acumulada. Notar que a pesar de ser el enfoque pseudoestático de estabilidad, se están tomando en cuenta las deformaciones para el coeficiente. (Bray and Travarasrou, 2009).

Método de FHWA (2011)

Según el manual del *Federal Highway Administration* de Estados Unidos para el Análisis sísmico en el Diseño de Estructuras Geotécnicas del Transporte, el coeficiente sísmico en el análisis pseudoestático puede ser determinado a través de dos factores. El primer factor se refiere a la máxima aceleración en el subsuelo debajo relleno o en la base del talud natural denominado PGA para un sitio determinado. Este es multiplicado por un segundo factor de sitio F_{pga} y representa el posible valor máximo del coeficiente sísmico k_{max} mostrado en la siguiente expresión:

$$k_{max} = F_{pga} * PGA \quad (13)$$

Para este método, PGA es el coeficiente de aceleración para un tipo de suelo Clase B y F_{pga} es un factor de sitio del PGA propuesto por AASHTO. En la Tabla 2.2 se muestra el sistema de clasificación de sitio *National Earthquake Hazards Reduction Program* NEHRP empleado en el siguiente método.

Debido a efectos de la propagación y dispersión de la onda sísmica, la aceleración pico promedio del suelo deslizando en todo el tamaño del talud será menor que el PGA ajustado al sitio k_{max} . Entonces a partir de estudios han desarrollado una reducción dependiente de la altura para obtener una aceleración pico promedio k_{av} ajustado a la altura según la siguiente expresión:

$$k_{av} = \alpha * k_{max} \quad (14)$$

Donde α es un factor de reducción de la altura del talud y k_{av} es la aceleración pico promedio en la masa de falla. El factor para taludes y terraplenes hasta una altura de 100 pies fundados en condiciones de suelos C, D y E, se expresa por lo siguiente:

$$\alpha = 1 + 0.01 * H * (0.5 * \beta - 1) \quad (15)$$

Donde H es la altura del talud en pies, si se trata de un suelo de clase A o B entonces la anterior ecuación es multiplicada por un factor de 1.2. β es una función de la forma de la respuesta espectral de la aceleración dada por la siguiente ecuación:

$$\beta = F_v S_1 / k_{max} \quad (16)$$

En ella F_v es un factor de sitio de AASHTO para aceleración espectral a 1 segundo y S_1 es la aceleración espectral a 1 segundo para el tipo de Suelo Clase B.

Finalmente, basado en análisis de desplazamientos sísmicos, se recomienda reducir en un 50% el coeficiente sísmico promedio dado en la ecuación (14). Esto aplica para taludes para una deformación permanente admisible de 1 o 2 pulgadas que deben resultar con un factor de seguridad mínimo de por lo menos 1.1 para cumplir la estabilidad sísmica requerida. La expresión final queda de la siguiente manera:

$$k_s = 0.5 \cdot \alpha \cdot F_{pga} \cdot PGA \quad (17)$$

Tabla 2.2 Clasificación de clase de suelos según el NEHRP

Clase de sitio	Perfil de suelo	Velocidad de onda de corte, \bar{V}_s (m/s)	Resistencia a la penetración estándar, \bar{N}
A	Roca Dura	$\bar{V}_s > 1500$	N/A
B	Roca	$750 < \bar{V}_s \leq 1500$	N/A
C	Suelo muy denso y roca blanda	$350 < \bar{V}_s \leq 750$	$\bar{N} > 50$
D	Suelo rígido	$180 < \bar{V}_s \leq 350$	$15 \leq \bar{N} \leq 50$
E	Suelo Blando	$\bar{V}_s \leq 180$	$\bar{N} \leq 15$

Nota. Elaboración propia, adaptado de FHWA, 2011.

CAPÍTULO III. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN: CASO DE ESTUDIO

3.1 Descripción del caso de estudio

Para la selección del tramo de estudio se siguieron tres criterios de evaluación. En primer lugar, se tiene como referencia a la zonificación de riesgos de los taludes de la Costa Verde de la tesis de Cañari (2001). En este trabajo se establecieron niveles de riesgos según las características del talud y para el tramo ubicado en la avenida Bertolotto hasta la avenida del Brasil se tiene un 15.6% de taludes con riesgo elevado. Este tipo de riesgo indica taludes caracterizados por presentar pendientes muy empinados de 45-85°, presencia de rocas caídas al pie del talud y estructuras muy cercanas que se verían afectadas. Entonces con el mapa de zonificación se obtuvo una primera delimitación de las zonas de mayor riesgo.

Seguido a esta primera delimitación, se complementó la selección del tramo de estudio a partir una visita a los taludes para verificar que las condiciones actuales siguen presentando los mismos riesgos. Entonces, en este tramo se han identificado diferentes tratamientos realizados para la mejoría de la estabilidad debido a la presencia de malecones y bajadas peatonales. Entre ellos destacan los métodos activos de cortes del talud y sistemas de banquetas, y métodos pasivos que consisten en un sistema de mallas de sostenimiento ante caídas de fragmentos de roca.

Por ello, esta visita sirvió para identificar qué zonas no presentan ningún tipo tratamiento y, concluir que los riesgos se han visto incrementados debido a la construcción de edificaciones cercanas al talud. A partir de esto, se concluyó que el tramo del talud ubicado en la avenida Bertolotto a la altura del Club de Tenis de San Miguel presenta mayores riesgos por la pendiente notablemente empinada en comparación con sus taludes próximos y la cercanía que tiene con edificaciones en la parte de la superficie del talud. Asimismo, al pie del talud se observan mayores desprendimientos de gravas lo cual puede desencadenar en una posterior falla. En la siguiente Figura 3.1 se puede observar el presente tramo en mención:



Figura 3.1: Descripción del tramo de estudio con la sección de análisis

3.2 Condiciones del sitio

3.2.1 Ubicación

Los acantilados en el distrito de San Miguel tienen una longitud aproximada de 2 kilómetros con alturas que varían desde los 35 hasta los 50 metros. Estos están limitados por el norte con el distrito de La Perla, lugar donde se da inicio a la Costa Verde, y por el sur con el distrito de Magdalena del Mar en el malecón Bertolotto.

Después de una visita de exploración en la extensión de los acantilados de San Miguel para elegir la zona de estudio, se decidió como tramo crítico a los taludes ubicados en la Avenida Bertolotto, limitado por el jirón Miguel Grau y Jirón Alfonso Ugarte. En la Figura 3.2 se muestra la ubicación en un mapa del tramo escogido en el cual se observan que existen estructuras bastante cercanas al borde del talud.



Figura 3.2: Ubicación del tramo crítico de evaluación. Obtenido de Google Maps

3.2.2 Topografía

Según la tesis de Cañari (2001), el tramo presenta taludes con una altura promedio alrededor de 40 metros con paredes que mantienen un ángulo entre los 70 y 80°. La distancia desde el pie del acantilado hasta el inicio de la vía es de aproximadamente de 7 metros. En la siguiente figura se muestra el tramo crítico de evaluación donde se observan taludes bastante verticales a lo largo de la altura del acantilado y una disminución de la pendiente en la zona superior.

Como se puede observar en la Figura 3.1, el tramo crítico escogido presenta una topografía similar en sus taludes por lo que se escogerá una única sección representativa para el análisis. Cabe mencionar que, si bien no se tiene como alcance realizar un levantamiento topográfico, el perfil empleado ha sido obtenido a partir de la investigación de Aguilar et Pretell (2016) realizado en un talud de la zona de estudio. En esta investigación se realizó un levantamiento a partir de equipos topográficos en diferentes estaciones de San Miguel para determinar la sección de corte más crítica.

3.2.3 Características climatológicas

La zona de la Costa Verde presenta un clima semiárido, en contacto constante con las brisas marinas. La ciudad Lima donde se encuentra la Costa Verde no presenta variaciones extremas de temperaturas. Para Lima Oeste, las temperaturas altas están alrededor del mes de febrero con un valor de 26.5°C y las temperaturas más bajas en los meses de agosto y setiembre con un valor de 14.6°C (Senamhi n/a)

Según el Guzmán (1997), a pesar de estar no presentar condiciones críticas de temperatura, la Costa Verde presenta nubosidad en meses de abril a noviembre y un elevado contenido de humedad en todos los meses del año. Y, los vientos ni las precipitaciones son de gran intensidad, ocurriendo esta última cuando la saturación de la humedad ha llegado a su máxima. Agosto es el mes con mayor precipitación con un valor bajo de 1.8 mm/mes (Senamhi n/a).

3.2.4 Características Geológicas

La ciudad de Lima está localizada en el cono de deyección aluvial originado por los procesos erosivos de los ríos Rímac, Chillón y Lurín (Geology of Lima, Perú 1997). Según el mapa geológico del cuadrángulo de Lima publicado por el INGEMET en su versión digital (1998), los acantilados de la costa verde están conformados por depósitos aluviales que pertenecen al pleistoceno del sistema cuaternario. Los depósitos aluviales consisten en suelos granulares de grano grueso que son clasificados como fanglomerado, el cual localmente es llamado Conglomerado de Lima, cuyos agregados que lo constituyen son predominantemente ígneos.

Esta planicie fluvio-aluvial de Lima ha experimentado una fuerte erosión durante los períodos Cuaternarios y reciente, lo cual ha generado el crecimiento y formación de los acantilados a lo largo de la costa que llegan a alcanzar alturas hasta de 70 metros. El Conglomerado de Lima es el material predominante de estos acantilados, el cual presenta una buena resistencia al corte debido a la matriz de cementación carbonata cálcica del suelo fino. Este factor permite la posibilidad de tener taludes desde los 50 hasta 90° tanto en excavaciones profundas como en los acantilados (Geology of Lima, Perú 1997).

Por otro lado, cabe mencionar que las playas existentes al pie del talud de los acantilados son el resultado de la deposición artificial de material detrítico transportado por el mar como consecuencia de los espigones construidos (INGEMMET 2019). Además, también es producto del vertimiento antropógeno de material de excavaciones de grandes proyectos de vías en la ciudad de Lima, por lo tanto, el tipo de suelo existente en la zona se trata de un relleno no controlado.

3.2.5 Riesgo sísmico y PGA de la zona

Condiciones sísmicas

El Perú es un país que presenta una alta actividad sísmica. Los movimientos sísmicos a lo largo de la costa peruana están causados principalmente por la convergencia de la Placa de Nazca hacia la estacionaria Placa de América del Sur. Según Stauder (1975), este movimiento continuo genera una gran cantidad de sismos a lo largo de la Placa de América del Sur y, además que la placa misma en su borde occidental se encuentre en compresión horizontal oeste-este dentro de una distancia aproximada de 700 km.

Según la base de datos de la *United States Geological Survey (USGS)*, en un registro de sismo con magnitud mayor a 5 desde el año 1973 al año 2017, se observa en la Figura 3.3 (CISMID 2017) que la zona de la costa sur entre Lima y la provincia de Tacna son las que presentan mayor cantidad de sismos. También se ve que la gran cantidad de ellos presentan una profundidad focal menor a 50 km. Además, se observa en el área frente a Lima y Callao un fenómeno llamado Silencio Sísmico, que significa una falta de eventos sísmicos de considerada magnitud en una zona donde se espera una actividad sísmica activa.

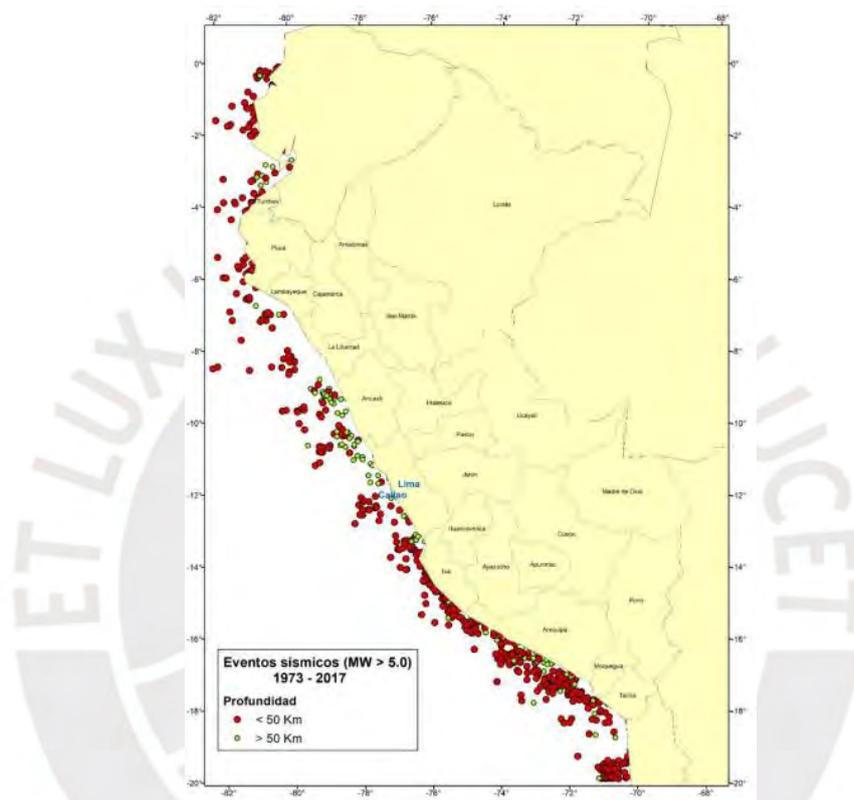


Figura 3.3: Sismos ocurridos en el Perú desde 1973 hasta el 2017, base de datos USGS. Obtenido del CISMID 2017

Debido a lo mencionado anteriormente, Lima presenta una actividad sísmica elevada que ha generado considerable daño a las propiedades y cobro de vidas humanas a lo largo de su historia. El cinturón de Fuego del Pacífico en Lima está caracterizado por sismos superficiales a lo largo de la costa de gran magnitud con mayor frecuencia que en otras zonas activas (Geology of Lima, 1998). Sin embargo, en las últimas décadas, ha habido una falta de eventos sísmicos de gran magnitud lo cual implica una acumulación de energía y un aumento de probabilidad de que ocurra un sismo de gran magnitud en las costas de Lima y Callao (CISMID 2017).

Determinación del Peak Ground Acceleration PGA

Según lo indicado en el Capítulo II de Peligro Sísmico de la NTE E.030 Diseño Sismorresistente (2018) para determinar el valor de la PGA, Lima se encuentra en la zona sísmica

4, lo cual para un indica un valor de aceleración máxima horizontal en roca de 0.45 con una probabilidad de excedencia de 10% en 50 años. Además, según el mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Lima (2016) por parte del CISMID clasifican al suelo del acantilado en la zona de estudio como Zona II. En la siguiente figura se observa el espectro de peligro uniforme para la ciudad de Lima, en ella se puede ubicar también que para un período de retorno se tiene un **PGA aproximadamente de 0.45g**.

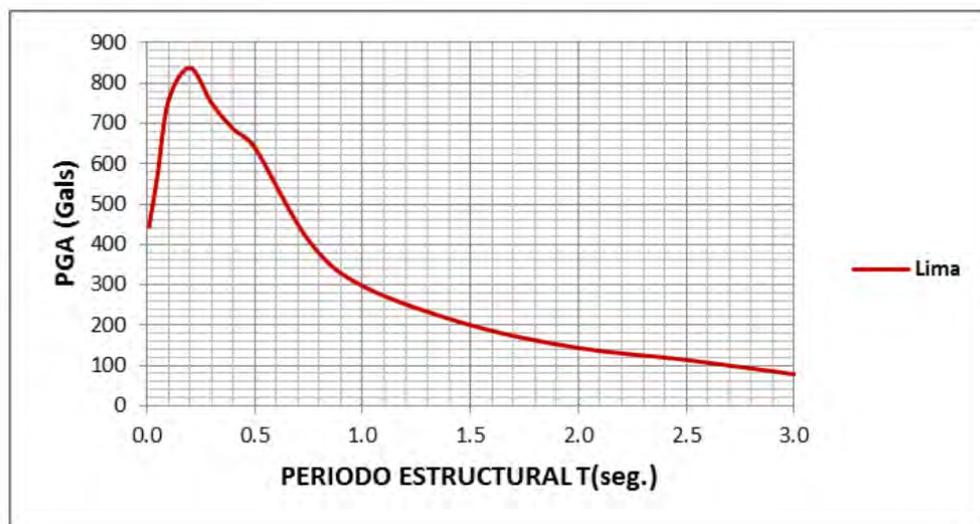


Figura 3.4: Espectro de peligro uniforme para Lima (IGP 2014)

3.3 Parámetros geotécnicos

El presente trabajo de investigación no presenta como alcance la realización de ensayos para la parametrización de los suelos presentes en la sección. Sin embargo, para el ingreso de los parámetros se ha realizado una extensiva revisión de la literatura técnica de estudios geotécnicos del acantilado para determinar su valor. En la Tabla 3.1 se muestra una recopilación de algunos ensayos geotécnicos realizados a los acantilados para su caracterización y posterior análisis de estabilidad.

Tabla 3.1: Estudios geotécnicos realizados en los taludes de la Costa Verde

Documento	Ubicación	Ensayo	Resultados
Tesis de Mariela Cañari Cañari y Alva Hurtado (2001)	Costa Verde - Miraflores	Corte directo a gran escala in-situ	Conglomerado: - c' : 0.55 kg/cm ² - ϕ' : 40°
Tesis de Javier Díaz (2006)	Costa Verde - Magdalena	Triaxiales CU y UU	Lentes Finos (Ensayo UU) - c' : 1.10 kg/cm ² - ϕ' : 0° Lentes Finos (Ensayo CU) - c' : 0.84 kg/cm ² - ϕ' : 22°
Campaña de exploración Larcomar. Jorge Alva Ingenieros (2009)	Costa Verde - Miraflores	Ensayos de corte directo a gran escala in-situ	Material al pie del talud: - c' : 10 kPa - ϕ' : 35° Material sobre el talud: - c' : 20 kPa - ϕ' : 40°
Evaluación dinámica de la Costa Verde en Lima – Conferencia (2016)	Costa Verde - San Miguel	Ensayos Corte Directo convencionales y de gran escala	Lentes finos: - c' : 5 kPa - ϕ' : 26° Conglomerado: - c' : 25 kPa - ϕ' : 44°

Nota: Elaboración Propia

A partir de los resultados de los ensayos mostrados en la Tabla 3.1, se define para el presente trabajo las resistencias al corte a partir de valores promedios de los materiales existentes en la sección (Conglomerado, Lentes Finos y relleno antropógeno). Esto se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3.2: Parámetros geotécnicos de la sección

Material	Parámetros de resistencia al corte
	Condiciones estáticas/pseudoestáticas
Conglomerado	- c' : 25 kPa - ϕ' : 44° - $\gamma = 21$ kN/m ³
Lentes Finos	- c' : 5 kPa - ϕ' : 26° - $\gamma = 17$ kN/m ³
Relleno	- c' : 0 kPa - ϕ' : 28° - $\gamma = 16$ kN/m ³

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD

4.1 Modelo de la sección

Como fue mencionado anteriormente, el talud de análisis se encuentra en una zona comprendida entre el jirón Miguel Grau y Jirón Alfonso Ugarte. En él se observa la presencia de dos taludes marcados y la presencia de estratos de suelo superficial antropógeno, así como de inter-estratos de material fino arenoso. Para la construcción de la topografía se usó de referencia la investigación de Aguilar et Pretell. Entonces, a partir de un documento de extensión DXF, esta sección recreada es ingresada al software de análisis Slide2.

Para el presente trabajo se ha considerado que, según Tumialán (2015), el nivel del agua subterránea se encuentra al nivel del mar debido al exceso de bombeo de las aguas de la ciudad de Lima. Esto significa que, para la sección del talud, el nivel freático NAF se encuentra por debajo del pie del talud. Entonces, para el análisis del presente trabajo de investigación, se está colocando el NAF a una profundidad aproximada de 4 metros desde el pie del talud. En la siguiente figura se observa la sección del modelo en el software Slide2:

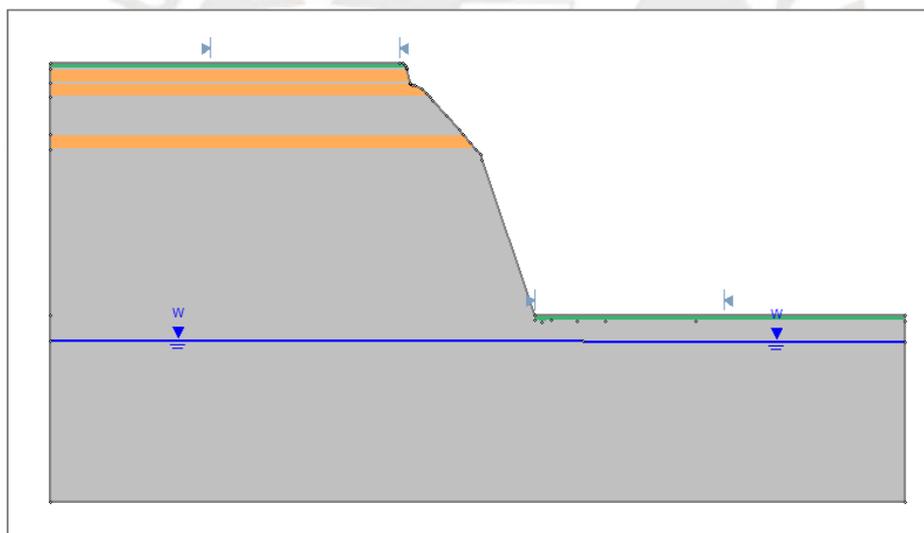


Figura 4.1: Modelo de la sección ingresada en el software Slide2

Cabe mencionar que, no se hace uso de resistencia no drenadas para el caso de los lentes de fino y relleno debido a que el talud se encuentra sin presencia de nivel freático por lo que no existe un efecto de la presión de poros sobre la resistencia al corte.

4.2 Calibración de los parámetros de resistencia

Debido al hecho de que no existen fallas globales en los acantilados en su condición actual, un factor de seguridad mayor a 1 es requerido para las condiciones estáticas. Por lo tanto, antes de realizar los análisis pseudoestáticos, los parámetros de resistencia deben ser calibrados hasta obtener condiciones de estabilidad como resultados de los análisis. En el caso esto no ocurra, se

debe aumentar el valor de la cohesión debido a un aparente aporte de cohesión debido a la cementación del conglomerado en campo (Aguilar et Pretell, 2016). En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo antes de los análisis pseudoestáticos:

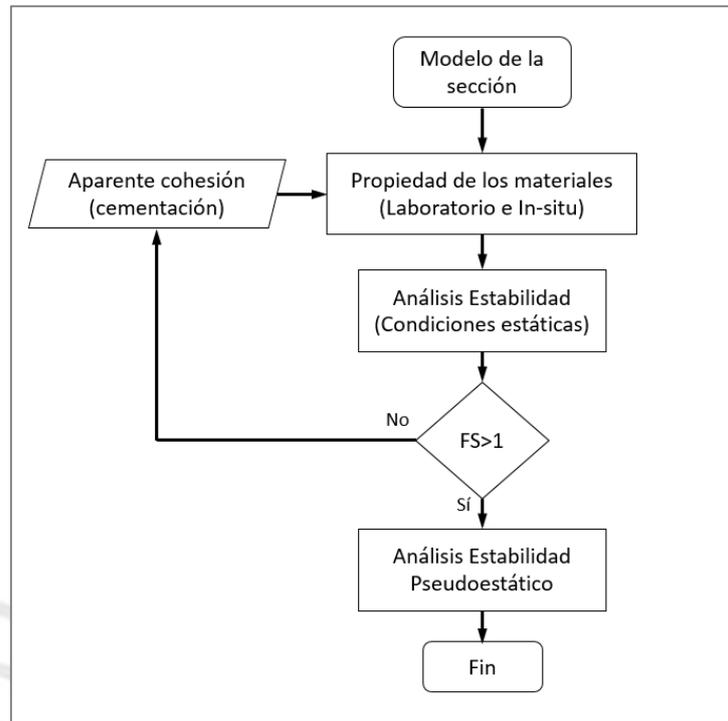


Figura 4.2. Flujo de calibración de los parámetros de resistencia. Adaptado de Aguilar et Pretell (2016)

Este incremento en los parámetros de resistencia de cohesión y de ángulo de fricción a partir del flujo de calibración anterior mostrado también se fundamenta a partir de la exploración realizada para la observación del comportamiento del talud. Pues, en el talud se logra ver un material cementante que mantiene bastante compacto a la grava de gran tamaño lo cual indica fuerzas de cohesión importantes. Además, también se observa la presencia predominante de gravas de gran diámetro a lo largo del talud lo cual puede justificar el empleo de mayores ángulos de fricción y, por ende, mayores resistencias. En la siguiente Figura 4.3 se muestra una fotografía al conglomerado de la Costa Verde observado en el talud de San Miguel.



Figura 4.3: Conglomerado de Lima en la Costa Verde

En ese sentido, a partir del criterio de calibración de los parámetros a partir de los resultados de análisis de estabilidad y de la visualización del comportamiento del talud, los valores de resistencia de cada material han sido incrementados. Principalmente las fuerzas de cohesión han sido elevadas hasta un valor de 50kPa en los materiales tanto del conglomerado como lentes finos, este valor de cohesión también fue empleado en la investigación de Aguilar et Pretell (2016). Además, este valor de cohesión converge bien con la cohesión hallada por Cañari et Alva (2001) en ensayos de corte directo a gran escala in-situ.

Finalmente, en la siguiente Tabla 4.1 se muestran los resultados de los parámetros geotécnicos empleados para representar las condiciones actuales, cuyos resultados de la estabilidad de FS son coherentes con el comportamiento estático que se observa del talud.

Tabla 4.1: Parámetros geotécnicos calibrados de la sección

Material	Parámetros de resistencia al corte
	Condiciones estáticas/pseudoestáticas
Conglomerado	- c' : 50 kPa - ϕ' : 44° - $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$
Lentes Finos	- c' : 50 kPa - ϕ' : 26° - $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$
Relleno	- c' : 0 kPa - ϕ' : 28° - $\gamma = 16 \text{ kN/m}^3$

4.3 Coeficiente sísmico

Existen diferentes criterios para hallar el coeficiente sísmico a utilizar en el análisis pseudoestático como se han descrito en el capítulo del fundamento teórico. A continuación, se comentan dos métodos principales donde el primero es una estimación clásica y rápida del coeficiente y el segundo se trata de una metodología relativamente reciente propuesto por el FHWA.

4.3.1 Coeficiente sísmico horizontal

4.3.2 USACE (1984)

Hynes-Griffin et Franklin (1984) recomendaron para los análisis pseudoestáticos emplear un coeficiente sísmico igual al 50% del valor de la máxima aceleración del suelo. Este cálculo puede resultar conservador en comparación con otras metodologías, sin embargo, la aplicación de este criterio es extensivo en los diseños y análisis de estabilidad de taludes. Entonces, al aplicar el 50% del valor del PGA del sitio de estudio de la Costa Verde en el distrito de San Miguel se obtiene un valor igual a 0.22g.

$$k = 50\% \text{ PGA}(0.45g) = 0.22g$$

Para los análisis pseudoestáticos, es necesario el ingreso del coeficiente sísmico en el software. En este caso, se puede seguir la metodología propuesta para hallar el coeficiente sísmico por el FHWA descrita anteriormente, o de manera conservadora se puede usar el criterio de la USACE (1984) que indica elegir un coeficiente sísmico igual al 50% del valor de PGA. En ese sentido, al calcular ambos coeficientes se decidió emplear el que resulto mayor, que fue el de la propuesta por la USACE con un valor igual a 0.125g.

4.3.3 FHWA (2011)

En este caso, se presenta la metodología propuesta por el FHWA descrita en el acápite 2.6.2, la cual tiene aplicabilidad en cualquier talud de análisis. Esta toma en cuenta factores de sitio, tipo de suelo del talud y la altura del mismo. Entonces al aplicar el procedimiento, en primer lugar, se halla el Factor F_{pga} , que según el tipo de suelo C de la Costa Verde considerando al conglomerado de grava como el suelo principal se obtiene un valor de 1.

Seguido a ello, al considerar una altura promedio de 36 metros para el talud, y un valor de aceleración espectral según la Figura 3.4 de 0.3g para un período de 1 segundo se obtiene lo siguiente al emplear las ecuaciones (15) y (16) del fundamento teórico:

$$B = 0.3g * \frac{1.5}{0.45g} = 1$$

$$\alpha = 1 + 0.01 * \left(\frac{36}{0.30} \text{pies} \right) * (0.5 * B - 1) = 0.4$$

Finalmente, al emplear la ecuación (14) para encontrar un valor de coeficiente de valor promedio se obtiene lo siguiente:

$$k_{av} = 0.4 * 1 * 0.45g = 0.18g$$

Como la presente metodología toma en cuenta factores de sitio del suelo, la altura del talud y emplea criterios a partir del espectro de peligro uniforme de la zona para obtener un coeficiente sísmico promedio representativo. Entonces se espera que este resultado este más ajustado al coeficiente a emplear en el análisis, es por ello que el **coeficiente sísmico de 0.18g es empleado** para el análisis pseudoestático.

4.3.1 Coeficiente sísmico vertical

En el presente trabajo se considerará para el análisis el empleo de un coeficiente vertical ya que el programa Slide2 lo permite. Esto será para poder representar mejor las fuerzas ante un movimiento de sismo ya que no vienen únicamente en direcciones horizontales. En ese sentido, para conseguir una relación de las aceleraciones se ha realizado una evaluación de resultados de acelerogramas de sismos en Lima.

Entonces, a partir de informes obtenidos de la Red Acelerográfica del Perú se han estudiado dos sismos recientes ubicados en Lima medidos a partir de diferentes estaciones acelerográficas en suelos cuyas características son similares a las que se encuentran en los acantilados, es decir, suelos gravosos mal gradados. Cabe mencionar, que estos dos sismos recientes seleccionados son de magnitud considerable ya que para magnitudes bajas no se logra obtener una distinción notoria entre los valores de máxima aceleración horizontal y vertical.

En la siguiente tabla se muestran los dos sismos seleccionados ocurridos el presente año en Mala y el Callao medidos en estaciones cuyas características del suelo se tratan de gravas aluviales mal gradadas. En la tabla se resumen la máxima aceleración del suelo en direcciones EO o NS y la máxima aceleración vertical registrada, así como la relación obtenida finalmente.

Tabla 4.2: Análisis de la relación de aceleraciones pico del suelo

Sismo	Fecha	Estación	Lugar de asiento	PGA EO/ NS (cm/seg ²)	PGA V (cm/seg ²)	PGA V/ PGA H
Sismo Mala, Cañete (Mw=5.8)	22 de Junio del 2021	Mala	Grava saturada	190.2	75.2	0.40
		CIP CN	Grava aluvial	72.03	45.9	0.64
		SENCICO San Borja	Grava mal gradada	50.18	32.57	0.65
Sismo Callao - Provincia Callao	28 de Noviembre del 2021	SENCICO Chorrillos	Por determinar	77.01	59.89	0.78
		CIP CN - Miraflores	Grava Aluvial	77.03	56.25	0.73
		SENCICO San Borja	Grava Mal gradada	77.01	58.32	0.76

Al calcular el promedio de la ratio de aceleraciones se obtiene un valor igual a 0.66, es decir, la aceleración máxima vertical está en el orden de $2/3$ de la aceleración máximo horizontal. Entonces al operar este valor promedio con el coeficiente anteriormente hallado de 0.18 se obtiene un valor de 0.11, el cual será ingresado en los análisis pseudoestáticos.

4.4 Escenarios de análisis

El resultado de los análisis de estabilidad de taludes consiste en el factor de seguridad más crítico para el escenario de evaluación. Cuando estos factores de seguridad resultan mayores que la unidad significa que el talud se encuentra en un estado de equilibrio. Sin embargo, este hecho no es suficiente para concluir que el talud es estable pues en el proceso de cálculo han existido muchas incertidumbres y asunciones de la resistencia al corte como simplificaciones del análisis. Este hecho genera que no sea suficiente tener un FS por encima de la unidad.

Entonces para brindar un margen de seguridad, según el escenario de evaluación, diferentes normativas y guías de diseño han establecido factores de seguridad mínimos recomendables. En la siguiente Tabla 4.3 se recopilan algunas de las recomendaciones de guías de diseño internacionales y lo que indica la normativa peruana en la Norma Técnica de Suelos E.050.

Tabla 4.3: Factores de Seguridad mínimos según diferentes Guías de Diseño internacionales

Caso de análisis	USACE Slope Stability (2003)	Geotechnical Design Standard – Minimum Requirements (2020)	WSDOT Geotechnical Design Manual (2013)	Normativa Peruana E.050 (2018)*
Corto Plazo o final de la construcción	1.3	1.3	1.3	-
Largo Plazo	1.5	1.5	1.5	1.5
Pseudoestático	-	1.1	1.1	1.25

*Los factores de seguridad propuestos por la normativa peruana están indicados para su aplicación en análisis de estructuras de contención de taludes

4.5 Análisis para las condiciones actuales

En primer lugar, se desarrolló el análisis de estabilidad para las condiciones actuales del talud sin el empleo de ningún tipo de mejoramiento. Los escenarios analizados fueron dos: análisis para condiciones estáticas y para condiciones pseudoestáticas. En cada uno se evaluaron los tipos de superficie de falla circulares y no circulares. Sin embargo, cabe mencionar que como el conglomerado se trata de un material granular con partículas de gran dimensión, las superficies de fallas esperadas en los taludes de la costa verde se tratan del tipo planas o segmentadas, pues las superficies de falla circulares están ligadas a suelos finos arcillosos.

En la siguiente figura se puede observar las condiciones del talud y los parámetros de los materiales empleados previo a la computación del cálculo de FS.

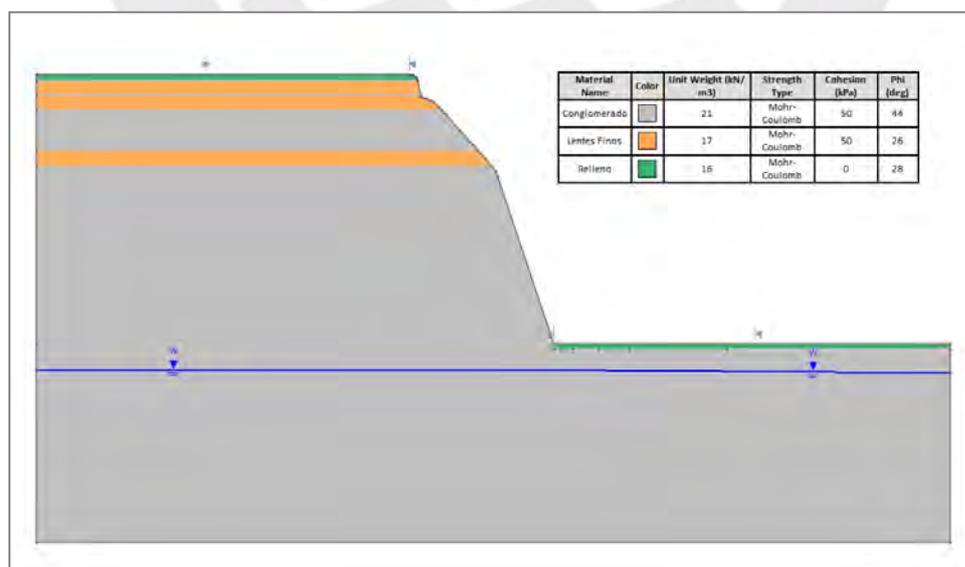


Figura 4.4: Sección del talud para los análisis en las condiciones actuales

En ese sentido, al culminar la evaluación se pudo obtener diferentes factores de seguridad y de esta forma evaluar el tipo de falla más crítico. En los métodos de cálculo de los FS del software se emplearon a Spencer y Morgenstern and Price que fueron explicados en el capítulo de Fundamento teórico, donde ambos en resumen consisten en métodos rigurosos que cumplen las condiciones de equilibrio para la sumatoria de fuerzas y momentos. Entonces, en las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos de los escenarios evaluados de las superficies de falla. Cabe mencionar que las superficies se tratan de fallas de tipo no circular como está indicado.

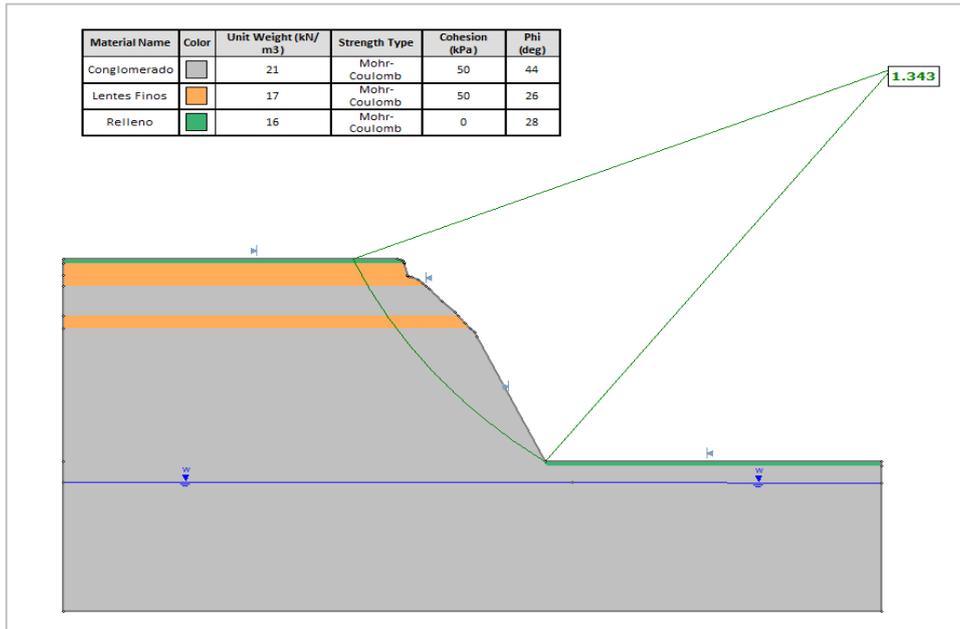


Figura 4.5: Superficie de falla circular para condiciones estáticas

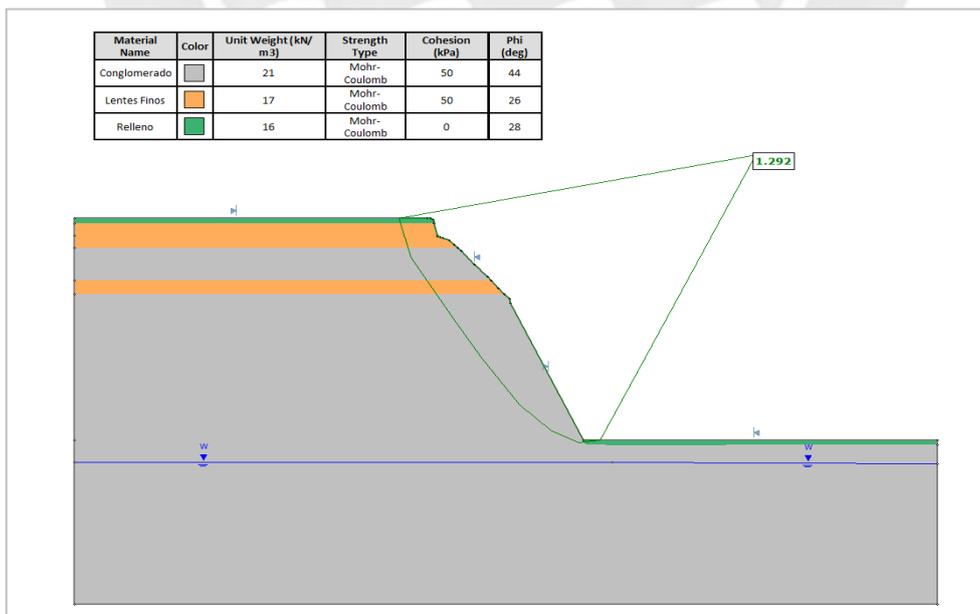


Figura 4.6: Superficie de falla no circular para condiciones estáticas

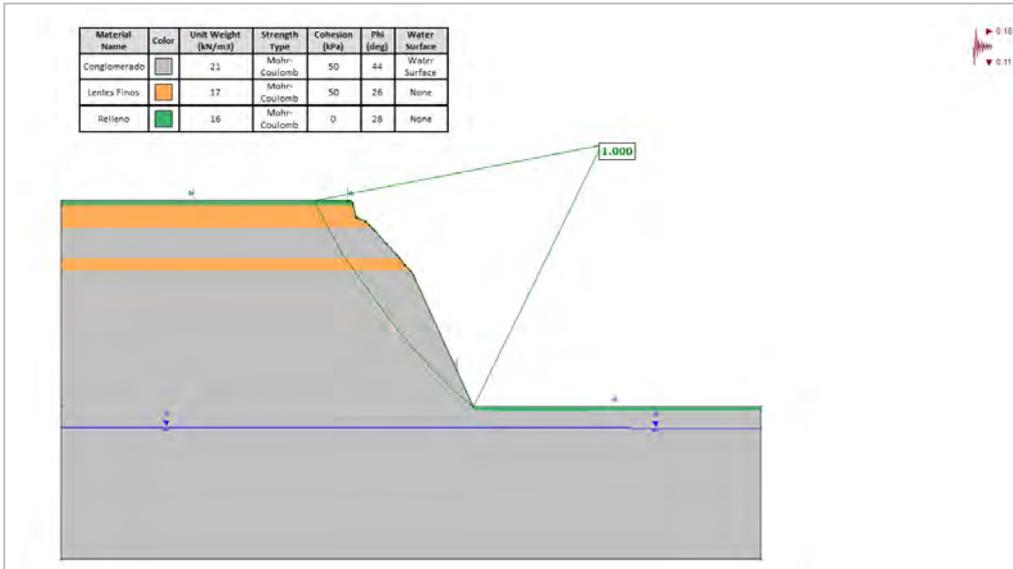


Figura 4.7: Superficie de falla circular para condiciones pseudoestáticas

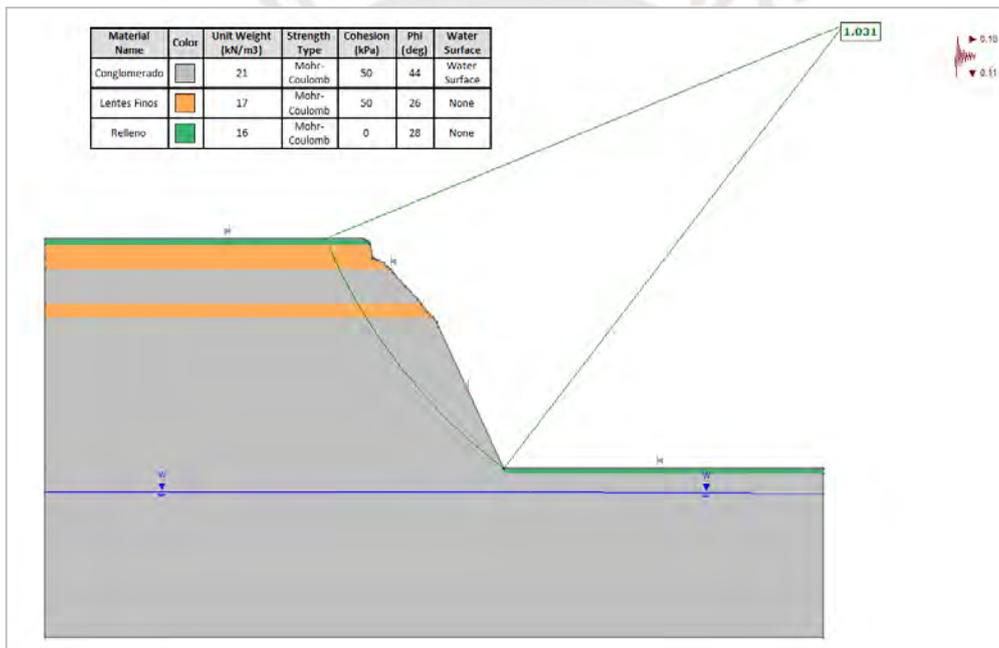


Figura 4.8: Superficie de falla no circular para condiciones pseudoestáticas

En la siguiente Tabla 3.5 se compilan los FS más críticos obtenidos para cada escenario analizado. Cabe mencionar que todas estas fallas se tratan de fallas de tipo global, es decir, que involucran deslizamientos desde la superficie del talud hasta el pie del mismo.

Tabla 4.4: Resultados de los análisis de estabilidad

Escenario	Tipo de Falla	Tipo de Superficie	Factor de Seguridad
Estático	Global	No Circular	1.34
Estático	Global	Circular	1.29
Pseudoestático	Global	No Circular	1.00
Pseudoestático	Global	Circular	1.03

4.6 Mejoramiento de la sección

4.6.1 Sistema de terrazas

La metodología de mejoramiento que posiblemente sea la primera en pensar debido a las características geométricas mostradas anteriormente es la de la generación de un sistema de terrazas a lo largo del talud para eliminar las pendientes excesivas existentes y disminuir el riesgo de afectación ante un hecho de desprendimiento de rocas. Este sistema de terrazas requiere de un movimiento significativo de tierras y el diseño del ancho de la banqueta y altura va a variar a criterio del diseñador hasta encontrar un diseño óptimo que tome en cuenta el factor de mejoramiento y de volumen de movimiento de tierras que requiere.

Además, este método activo de mejoramiento requiere constructivamente de espacio suficiente para el trabajo de la maquinaria y, en el presente tramo de estudio se tiene parte de la terraza trasera de un gimnasio de un solo nivel cercano al borde del talud. Por ello, es necesario la remoción de cierto sector de este lugar para el empleo de esta metodología de mejoramiento. Cabe mencionar, que esta recomendación también está dada en el análisis dinámico de Aguilar y Pretell (2016), la cual tiene como una de las principales conclusiones la no construcción de estructuras cercanas a los bordes de los taludes de la zona de estudio debido a que, ante un suceso de sismo, se generaría suficientes deformaciones que harían fallar al talud y con ello a las estructuras.

Existen antecedentes de trabajos bajo esta metodología de mejoramiento en la Costa Verde como por ejemplo el tratado en el malecón Castagnola cuyo proceso de cortes fue necesario y recomendado por el INGEMMET (2019) en su informe técnico debido a la presencia del relleno masivo en el talud. Sin embargo, su proceso constructivo conlleva a múltiples deslizamientos y la obstrucción de la vía principal de la Costa Verde en múltiples ocasiones y períodos largos, por lo que conlleva a riesgos importantes para el personal y a un aumento de costos que debe ser considerado si se opta por este método.

4.6.2 Sistema de mallas metálicas ancladas/adosados

Otra solución de mejoramiento que puede realizarse al tramo de estudio es el empleo de un sistema de mallas metálicas ancladas con pernos sobre el talud. Este sistema no involucra un movimiento de tierras como el anterior a menos que sea necesario realizar algún corte debido a la heterogeneidad de la superficie del talud. Existen antecedentes que indican el buen desempeño como metodología de estabilización y protección ante desprendimientos en el proyecto del Lugar de la Memoria, donde a un talud con pendientes de 70° similares al del tramo de estudio fue tratado por un sistema de mallas metálicas.

La metodología de este diseño se trata de crear un sistema de paños que están conformados por pernos anclados unidos por una cables metálicos y una malla metálica que cubre todo el área como se puede observar en la Figura 4.9. Por una parte, el diseño del enmallado es realizado por medio del análisis de equilibrio límite para un paño de dimensiones dadas. De este análisis se obtiene el empuje sobre la malla como fuerza tensional actuante, entonces con este requerimiento de resistencia se elige una malla de esfuerzo tensional superior a estos. Por otra parte, se el diseño del perno de anclaje involucra diseñar un perno de resistencia mayor que la requerida, siendo esta última obtenida de un análisis de equilibrio límite. Además. Se debe determinar la longitud mínima de anclaje según los esfuerzos de adherencia del material.

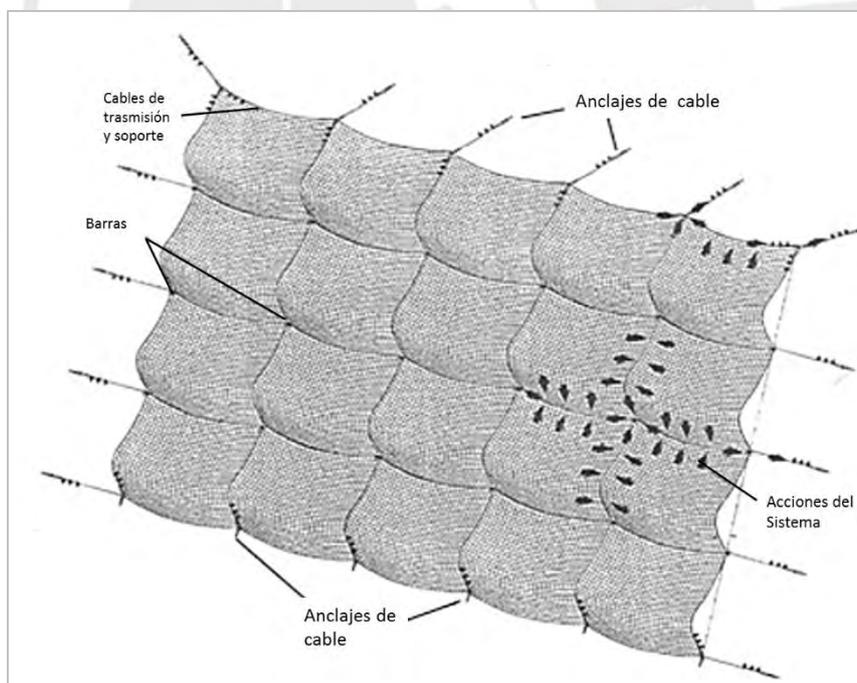


Figura 4.9: Sistema de mallas metálicas ancladas. Obtenido de Alva (2020)

La metodología de construcción de este sistema anclado se hace con el apoyo de una grúa que permitirá elevar a la maquinaria de anclaje de los pernos en las ubicaciones de perforación

definido en las especificaciones técnicas. En la siguiente figura se puede observar un perfil de este sistema de malla metálica enalada donde se pueden ver a la red de cables sobre la superficie del terreno inestable y las longitudes de anclaje de los pernos.

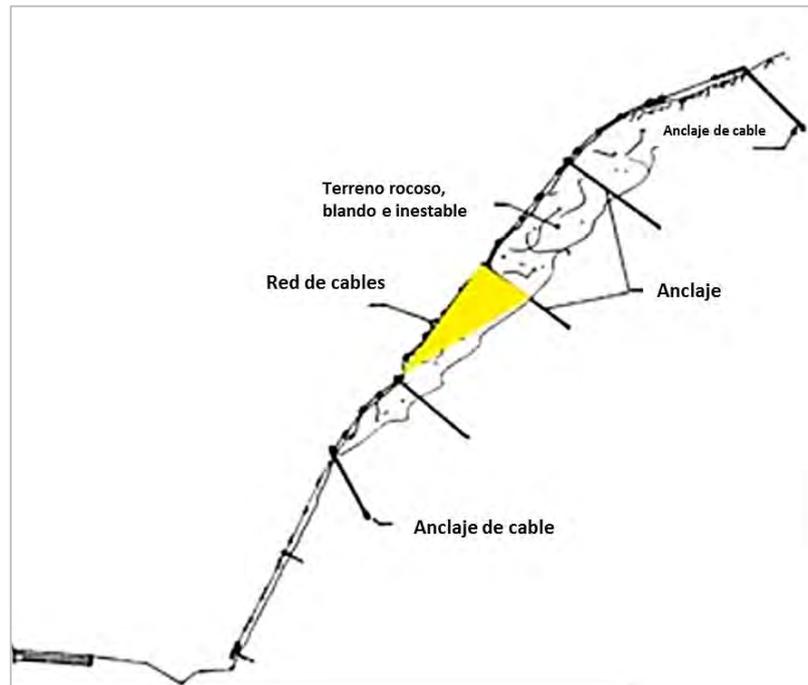
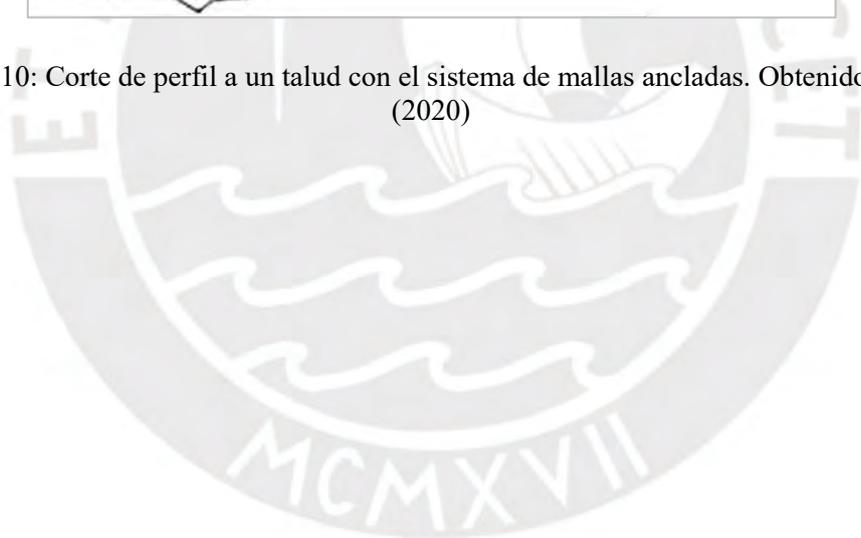


Figura 4.10: Corte de perfil a un talud con el sistema de mallas ancladas. Obtenido de Alva (2020)



4.7 Comentarios de resultados

Los resultados de los análisis para el caso de análisis estático se tratan de valores mayores que la unidad, en un promedio alrededor de 1.3, lo cual puede indicar una condición de estabilidad sin embargo no es suficiente pues no se encuentra por encima de los límites mínimos indicados por las guías y normativas. Por otro lado, los resultados obtenidos por los análisis pseudoestáticos se encuentran en la unidad, alrededor de 1.0, lo cual indica en términos de cálculo de equilibrio límite un estado de deslizamiento inminente.

Cabe mencionar que, si bien la sección analizada del talud de la Costa Verde muestra valores bajos, existe un aporte de resistencia debido a efectos tridimensionales por resistencias al corte de taludes más estables a los costados de la sección de análisis. Pues como se puede observar en la Figura 3.1, al costado de esta sección crítica existen un sistema de taludes con terrazas y al otro lado taludes con pendientes menos fuertes que de la sección. Esto hecho puede aportar en los resultados de estabilidad que no puede ser tomado debido a que se trata de un análisis bidimensional. Aunque igual por los valores puede que el aporte no sea suficiente y de igual manera un sismo puede condicionar un efecto de falla y desprendimiento.

De los tipos de mejoramiento mostrados, el sistema de banquetas puede en términos de estabilidad llegar a una condición de factores de seguridad mayores que cumplan, sin embargo, esta metodología debe ser estudiada a partir de la fase constructiva y los riesgos que involucra. Como ya ha sido comentado anteriormente, al talud del malecón Castagnola, que se encuentra 300 metros más delante del presente tramo se le realizó esta metodología y durante el proceso constructivo ocurrieron diferentes deslizamientos que generan riesgos altos en la construcción y obstrucción en una vía principal como el de la Costa Verde.

Por otro lado, el tipo procedimiento de mallas metálicas empleado en el Lugar de la Memoria es un antecedente que confirma la aplicabilidad del método sobre el talud de estudio cuyas condiciones de pendiente y tipo de material son similares. Esta metodología requiere como parámetros de diseño la resistencia torsional de la malla metálica, la resistencia de los pernos y la longitud e inclinación de los pernos de anclaje en toda la superficie del talud.

CONCLUSIONES

Se concluye que, según diferentes estudios geotécnicos pasados, el material predominante de la Costa Verde se trata de un suelo de conglomerado resistente con gravas de grandes diámetros. También se concluye que el conglomerado presenta una cohesión importante debido a la cementación de carbonato característica en el suelo de Lima. Además, este material en los taludes presenta inter-estratos de material fino arenoso de menor resistencia.

Se concluye a partir de diferentes informes técnicos sobre los problemas de estabilidad en los acantilados, que estos se encuentran en un proceso erosivo constante que genera desprendimiento y caídas de rocas. Este hecho se puede evidenciar al pasar por la vía Costa Verde y observar los bolones y montículos de suelo al pie de los taludes.

Se concluye que el análisis pseudoestático consiste en una manera rápida de estimar el efecto de las condiciones sísmicas sobre un talud. Este es aplicable cuando los suelos no son susceptibles a grandes pérdidas de resistencia ante deformaciones. En ese caso se debería realizar análisis más sofisticados como el de los métodos numéricos.

El coeficiente horizontal normalmente es estimado al obtener el 50% de la máxima aceleración del suelo. Sin embargo, existen metodologías desarrolladas más reciente que toman en cuenta diferentes factores del talud para obtener un coeficiente. Por ejemplo, se tiene al método de Bray y Travasareu que lo estima a partir de una deformación o al método del FHWA que toma en cuenta factores del tamaño y tipo de suelo que conforma al talud.

Se concluye que la relación de aceleraciones horizontales y verticales de $2/3$ es una estimación adecuada y consecuente a usar en este análisis de estabilidad pseudoestático. Esta relación ha podido ser estimada a partir de la revisión de informes realizados de registros acelerográficos.

En el análisis de superficies de falla se observa que las superficies más críticas resultan en las del tipo no circulares debido a que estas no presentan una restricción para el desarrollo de la falla. Además, el tipo de falla circular es característico en suelos cohesivos arcillosos, por lo no sería acertado establecer una superficie de falla circular para los taludes de la Costa Verde.

Para la presente sección crítica analizada, se concluye que el talud se encuentra en un estado de inminente deslizamiento ante la ocurrencia de algún sismo de magnitud significativa, pues este análisis ha dado como resultado FS iguales a la unidad. Este resultado no significa necesariamente que el talud falla debido a que existen muchas incertidumbres, sin embargo, para fines de seguridad este análisis debería acompañarse de una estimación de las deformaciones permanentes.

A partir de la visita realizada al talud, se observa que este presenta una sección bastante crítica debido a su elevada pendiente en comparación con las secciones de su alrededor. Por ello, la construcción trasera de una terraza de gimnasio se encuentra en un riesgo inminente y por temas de seguridad no debería estar localizado tan cerca al talud como ha sido observado

Debido a la geometría de los taludes, y la cercanía con construcciones y de la vía principal Costa Verde, la búsqueda de métodos de mejoramiento resulta complejo pues los procesos constructivos se ven dificultados y además existen riesgos asociados por las edificaciones cercanas a los taludes.

Se concluye que para taludes de geometría compleja con pendientes muy empinadas cuyo acceso sea difícil se empleen soluciones del tipo pasivas, es decir que no involucren movimientos de tierras, pues estos trabajos presentan altos riesgos y dificultades en la construcción.

Los acantilados de la Costa Verde presentan altas dificultades para establecer métodos de mejoramiento en los taludes, esto es debido a una falta de proyección urbanística desde su construcción pues se ha permitido con los años la construcción de edificaciones y áreas comunes verdes próximas a los bordes del talud y además se ha construido la vía principal Costa Verde cercana al pie del talud. Esto genera un escenario complejo que conllevará grandes retos a la ingeniería para establecer soluciones que eviten las fallas de los taludes.

6 RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un programa extensivo ensayos de caracterización in-situ a gran escala para conocer la resistencia del conglomerado presente en las diferentes zonas acantilados de la Costa Verde y poder realizar una caracterización geotécnica en toda su longitud. Asimismo, se recomienda realizar ensayos que permitan cuantificar cuál es el aporte de resistencia del material cementante debido al carbonato de calcio existente en el conglomerado de Lima.

Se recomienda realizar el presente proceso de análisis pseudoestático para otros diferentes taludes críticos de los acantilados en otros distritos de la Costa Verde. Esto con el objetivo de poder generar una zonificación de los taludes con menores FS y de esta manera conocer cuales taludes requieren la intervención de la ingeniería. Esto con el objetivo de que en un futuro se pueda ejecutar un plan de mejoramiento de estabilidad sobre todo la longitud de los acantilados.

Se recomienda acompañar el presente análisis con un análisis de estabilidad bajo la metodología de Reducción de resistencia en software de elementos finitos. Ya que estos obtienen una superficie directa al reducir la resistencia del suelo hasta llegar a un estado límite. A diferencia del análisis pseudoestático en equilibrio límite que requiere de la búsqueda iterativa de

superficies, este método te da un resultado de superficie a partir de cálculos de esfuerzos. Este trabajo se recomienda ya que permite compatibilizar y comprobar los resultados.

Se recomienda que, además de los análisis de estabilidad por equilibrio límite, también se realicen de manera complementaria los análisis de deformaciones bajo los métodos numéricos que realizan un análisis de esfuerzos y deformaciones. Para ello, es necesario realizar la primera recomendación de caracterización para poder ingresar a este análisis más sofisticado parámetros de resistencia confiables.

Asimismo, también se recomienda realizar un análisis de caída de rocas en la sección del talud para conocer el comportamiento de los bloques de rocas y ver su influencia sobre la metodología de solución propuesta. Esta recomendación es importante ya que se conoce que uno de los principales tipos de fallas en los taludes es la caída de material.

Se recomienda no seguir ejecutando proyectos de construcción de edificaciones cercanas a los taludes de la Costa Verde cuya sección es crítica. Para ello se debe establecer en la longitud de la Costa Verde una mínima distancia de seguridad donde no es admisible construir una edificación. Además, todo proyecto de edificaciones realizado en zonas cercanas debe ser analizado en estabilidad para que se conozca la influencia del peso del edificio en la estabilidad del talud.

Se recomienda que, en el caso de contar con vegetación y áreas verdes sobre la cresta del talud, se realice un sistema de riego de tipo goteo y no por inundación, ya que este último genera la sobre saturación del talud. Siendo este último factor uno de los principales condicionantes de las fallas ocurridas en taludes.

Se recomienda realizar una investigación a mayor detalle de la aplicabilidad de los sistemas de mejoramiento comentados en el presente trabajo de mallas metálicas para poder llegar a conclusiones más fundamentadas de su aplicabilidad en términos de criterios de diseño y métodos de construcción.

Se recomienda emplear para los análisis pseudoestáticos un coeficiente de aceleración horizontal que se encuentre en el rango de 0.18g a 0.22g para los análisis de estabilidad en los taludes en la Costa Verde.

Se recomienda realizar un análisis pseudoestático que considere la condición de carga sísmica vertical, puesto que esto representa mejor la dirección de fuerzas sobre un talud producto de un movimiento sísmico. Para ello se recomienda realizar mayor investigación para establecer un criterio de que valor de coeficiente vertical debe emplearse en los análisis pseudoestáticos.

Se recomienda emplear para el método de equilibrio límite los métodos de cálculo de Spencer y Morgenstern and Price ya que satisface el equilibrio de fuerzas y momentos de la dovela. Sobre todo, para un análisis pseudoestático se recomienda estos métodos que cumplen todas las condiciones de equilibrio ya que usar métodos de cálculo que no tengan equilibrio de fuerzas llevarían a resultados errados.



BIBLIOGRAFÍA

- ALVA HURTADO, J. (2020). *Estudio Geotécnico Lugar de la Memoria*. Estudios Geotécnicos de cimentación en la costa, sierra y selva del Perú. Lima, Perú. Extraído de: https://www.facebook.com/watch/live/?ref=watch_permalink&v=3568263503187035
- Aguilar, Z. y Pretell, R. (5-6 de Diciembre de 2016) Dynamic assessment of the costa verde cliffs in lima. World Engineering Conference on Disaster Risk Reduction. Peruvian Association of Professional Engineers. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/348728774_DYNAMIC_ASSESSMENT_OF_THE_COSTA_VERDE_CLIFFS_IN_LIMA
- Aliaga Arana, D. A. (2020). *Análisis de Estabilidad Estática de un Talud Crítico en el Distrito de Magdalena por el Método de Elementos Discretos*. 113.
- Bray, J. D., & Travasarou, T. (2009). Pseudostatic Coefficient for Use in Simplified Seismic Slope Stability Evaluation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(9), 1336–1340. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0000012](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0000012)
- Cañari, M. (2001). “Análisis de la estabilidad de taludes de la Costa Verde”, Tesis de grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Cañari, M., & Alva, J. (1997). *Análisis de estabilidad de taludes de la Costa Verde*. 5–24.
- Carillo, A, 1979, Dynamic behavior of fluvio-alluvial soils of Lima, Peru, in Proceedings of the 6th Pan American Conference on Soils Mechanics and Foundation Engineering, Lima, Peru, Vol.2, pp. 49-56
- CISMID-FIC-UNI. (2015). *Análisis de Riesgo en Zonas Urbanas del Distrito de Magdalena*. Programa Presupuestal 068: Reducción de Vulnerabilidad y Atención de Emergencias por Desastres. 57.
- CISMID-FIC-UNI. (2016). *Mapa de microzonificación sísmica de la ciudad de Lima actualizado al 2016*. 320000.
- CISMID-FIC-UNI (1996). “Foro técnico. La Costa Verde: Diagnóstico, Propuestas y Soluciones” Auditorio del CISMID. 17 de Julio de 1996
- Das, B. M. (2014). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*.
- Department of Transport and Main Roads. (2020). *Geotechnical Design Standard – Minimum Requirements*. February, 23.
- Díaz, J. (2008). *Estabilización del talud de la costa verde en la zona del distrito de Magdalena*. [Tesis para obtener el título profesional Ingeniería Civil]. Repositorio Institucional, Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/7119>
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). *Soil strength and slope stability*. John Wiley & Sons.
- Duque Escobar Gonzalo. (2016). *Erosión de los suelos*. Universidad Nacional de Colombia. Tomado de: <http://bdigital.unal.edu.co/53252/45/erosiondesuelos.pdf>

- El Comercio (2019) *La Costa Verde en observación por riesgo de nuevos derrumbes en acantilado*. Extraído de: <https://elcomercio.pe/lima/seguridad/costa-verde-observacion-riesgo-nuevos-derrumbes-acantilados-ecpm-noticia-670306-noticia/>
- Granados Lopez, A. R. (2006). Estabilización Del Talud De La Costa Verde En La Zona Del Distrito De Barranco. *Test*, 1–125. <http://tesis.pucp.edu.pe/>
- Hynes-Griffin, M.E., and Franklin, A.G. (1984). Rationalizing the seismic coefficient method, Final Report, Miscellaneous Paper GL-84-13, Department of the Army, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS.
- INGEMMET. (2021). *Informe Técnico N° A7165 Elaborado por la Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico del INGENIEROS Equipo de investigación : Cristhian Anderson Chiroque Herrera*. 1–31.
- INGEMMET. (2019). *Informe Técnico A6930 Evaluación de Peligros Geológicos en masa en el malecón Castagnola - Acantilado de la Costa Verde*. 0–26.
- INGEMMET. (2020). Evaluación de peligro geológicos por movimientos en masa del malecón Pedro de Osma-acantilado de la Costa Verde. *Dirección de Geología Ambiental y Riesgo Geológico*, 0–21.
- Instituto Metropolitano de Planificación IMP (1995) “Plan Maestro de desarrollo de la Costa Verde 1995.2010
- JORGE ALVA INGENIEROS (2009).”*Análisis de Estabilidad de los Taludes del Centro Comercial Larcomar Sección Sur - Miraflores*”, Informe Técnico, Miraflores - Lima, Perú.
- Karakouzian, M., Candia, M. A., Wyman, R. V., Watkins, M. D., & Hudyma, N. (1997). Geology of Lima, Peru. *Environmental and Engineering Geoscience*, 3(1), 55–58. <https://doi.org/10.2113/gseegeosci.iii.1.55>
- FHWA (2011). LRFD seismic analysis and design of transportation geotechnical features and structural foundations - NHI course no. 130094 reference manual geotechnical engineering circular no. 3. United States. Federal Highway Administration. Recuperado de: <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/40372>
- Guzmán, A., Zavala, B. & Valenzuela, G. (1997). Estudio de seguridad física de losacantilados de la Costa Verde. Boletín. Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica, n. 18. Perú: INGENIEROS. 97 p
- Macedo, J. (2018). Simplified Procedure for Estimating Seismic Slope Displacements for Subduction Zone Earthquakes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 144(3), 04017124. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001833](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001833)
- Morgenstern, N. R., and Price (1965). The analysis of the stability of general slip surfaces, *Géotechnique*, 15 (1),
- Pacheco Zapata, A. A. (2006). *Estabilizacion del talud de la Costa Verde en la zona del distrito de San Isidro*. 80.

- Raygada, L. (2011). *Análisis de la estabilidad y deformaciones en el acantilado de la costa verde. [Tesis para obtener el título profesional Ingeniería Civil]*. Repositorio Institucional, Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de: <http://cybertesis.uni.edu.pe/handle/uni/3480>
- Rubianes, G., Paulette, D., Fuentes, R., & Antonio, V. (2016). *Propuesta de mejora de los niveles de servicio para mitigar la congestión vehicular en las intersecciones de la Av . Rafael Escardo comprendida entre las avenidas Costanera , La Paz y La Libertad , Lima – San Miguel*.
- Spencer, E. (1967). A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter.slices forces, *Géotechnique*, 17 (1), 11-26
- SENAMHI (N.A.). Promedio de temperatura normal para Lima Oeste. Extraído de: <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?p=pronostico-detalle&dp=lima&localidad=0001>
- Tavera, H., Bernal, I., Condori, C., Ordaz, M., Zevallos, A., & Ishizawa, O. (2014). *Evaluación del Peligro Sísmico en Perú: Mapa de Peligro Sísmico para el Perú*. Instituto Geofísico Del Perú (Igp), 66.
- Tumialán De la Cruz, P. H. (2016). *Rasgos Geológicos Del Río Rimác, Abastecimiento De Agua En Su Cono De Deyección*. *Revista de Ciencias*, 11, 120–130. https://doi.org/10.31381/revista_ciencias.v11i0.575
- Urrutia, P. (2008). *Análisis dinámico de Estabilidad por Elementos Finitos de los taludes de la costa verde en el distrito de Miraflores. [Tesis para obtener el título profesional Ingeniería Civil]*. Repositorio Institucional, Pontificia Universidad Católica del Perú. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/1065>
- Varnes, S. 1978. "Landslides types and processes". *Geomorphology* pp. 56-71
- Villacorta, S., Núñez, S., Vásquez, J., Pari, w., Ochoa, M., Benavente, E., Tatar, L., Luque, G., Rosado, M., Fídel, S. & Úbeda J. (2015). Peligros geológicos en el área de Lima Metropolitana y la Región Callao. *Boletín. Serie C: Geodinámica e Ingeniería Geológica*, n. 99. Perú: INGEMMET. 151 p.
- Washington State Department of Transportation. (2013). *Geotechnical Design Manual M46-03.08. October*, 103–110.