

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIA



“ESTABILIZACION DEL TALUD DE LA COSTA VERDE  
EN LA ZONA DEL DISTRITO DE MAGDALENA”

TESIS PARA OPTAR POR EL TITULO DE

**INGENIERO CIVIL**

Presentado por

Javier Díaz Venero

LIMA - PERÚ

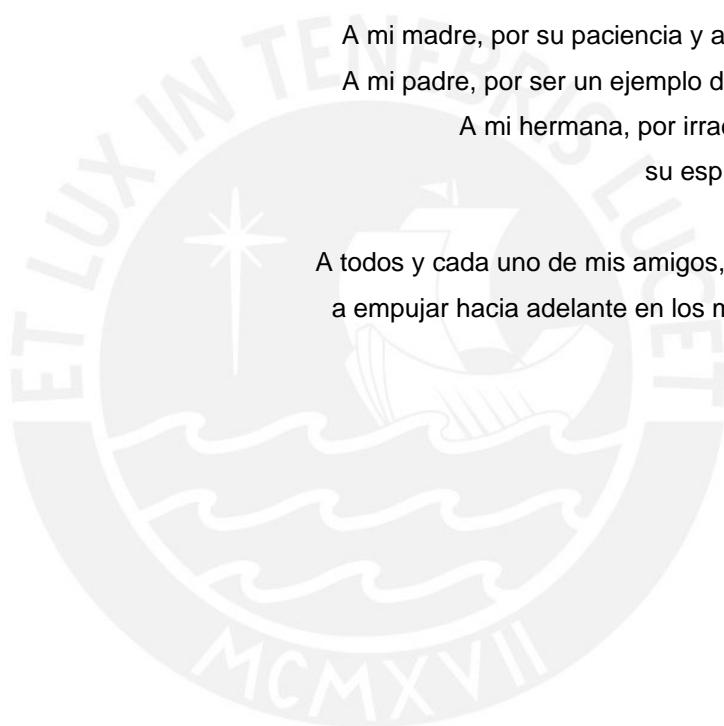
2008

A mi madre, por su paciencia y amor incondicional.

A mi padre, por ser un ejemplo de profesionalismo.

A mi hermana, por irradiar y contagiarme  
su espíritu emprendedor.

A todos y cada uno de mis amigos, que me ayudaron  
a empujar hacia adelante en los momentos difíciles.



### Agradecimientos:

A los ingenieros Manuel Olcese Franzero y Jorge Zegarra Pellanne, quienes con sus enseñanzas, apoyo y colaboración, tanto en su rol de profesores como en el de asesores, han hecho posible la realización de este trabajo.

A todo el personal del Laboratorio de Mecánica de Suelos de la PUCP por las facilidades brindadas.

Al ingeniero Hebert Sotelo Aedo por su colaboración desinteresada, consejos, guías y amistad brindada durante el proceso de realización de esta tesis.

A los ingenieros Mariela Cañari Sanchez, Oscar Maggiolo Robert y Danilo Moyasevic por la facilitación de información, consejos y recomendaciones.

A las siguientes instituciones, por la información y facilidades brindadas: Empresa Municipal Administradora de Peaje de Lima (EMAPE), Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN), Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), Fondo Metropolitano de Inversiones (INVERMET), Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET), Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), Instituto Metropolitano de Planificación (IMP), Municipalidad de Magdalena, CORPEI S.A., Maccaferri S.A.C y al departamento de geotecnia de la compañía CESEL.

Finalmente, a los distintos profesionales que me abrieron las puertas de sus oficinas y/u hogares durante la etapa de recolección de información.

## Resumen del Trabajo de Tesis

En el presente trabajo se analizan los problemas de estabilidad del talud en un tramo de 500 m de la Costa Verde en el distrito de Magdalena, cerca del límite con el distrito San Miguel, presentándose alternativas de solución y dos diseños para la estabilización de problemas específicos.

Se hace una recopilación de información, además de un trabajo de campo, de manera de contar con los suficientes datos y así poder dar un enfoque de la situación del talud. Como primer paso se realizó un levantamiento topográfico de la superficie del talud, sectorizando el talud en secciones transversales al eje de la pista cada 50 m, para luego realizar la descripción geológica y geotécnica de zona.

En el capítulo de estabilidad de taludes, se hizo un “back analysis” para obtener juegos de valores para los parámetros resistentes del suelo conglomerado (material predominante en el talud) debido a que se tiene poca certeza acerca de los valores exactos de estos parámetros. También se evaluó la influencia de un lente de material fino en la estabilidad del talud y la influencia de un movimiento de tierras en el factor de seguridad. Asimismo, se hace una evaluación de la caída de cantos rodados a lo largo del tramo, ya que es el principal problema que se presenta.

Con toda esta información se procede a realizar un catálogo de falla en el que se especifican los problemas que presenta el talud y se enumeran los agentes que causan inestabilidad. Definidos éstos, se plantean diferentes formas de estabilización, analizando como antecedente el desempeño de soluciones construidas anteriormente en el tramo y los alrededores.

Finalmente se diseñan dos métodos de estabilización, que están principalmente avocados a solucionar el problema de la caída de cantos rodados: uno que consiste de una malla metálica hexagonal de doble torsión sobre el talud y el segundo que es un arreglo de tierra armada con una pantalla estática ubicada al pie del talud. Si bien es cierto, ambas soluciones son del tipo pasivas, la que mejor resultados presenta es la malla hexagonal de doble torsión, que mediante el uso de anclajes por sectores, también da solución al problema de la inestabilidad del relleno en la zona superior del talud y encausa derrumbes.

Índice

<b>1.0 Introducción</b>	
<b>2.0 Antecedentes</b> .....	<b>02</b>
2.1 Reseña histórica del acondicionamiento moderno de la costa Verde.....	02
2.2 Antecedentes Técnicos.....	04
2.3 Ubicación del área en estudio.....	07
2.4 Condiciones climáticas.....	08
2.5 Topografía del área del estudio.....	09
2.6 Información diversa.....	10
<b>3.0 Geología de zona</b> .....	<b>11</b>
3.1 Generalidades .....	11
3.2 Características Geomorfológicos de la zona.....	12
3.3 Características litológicas.....	13
<b>4.0 Geotecnia</b> .....	<b>16</b>
4.1 Generalidades.....	16
4.2 Ensayos de laboratorio.....	17
4.3 Descripción geotécnica .....	20
<b>5.0 Análisis de estabilidad de taludes</b> .....	<b>25</b>
5.1 Introducción.....	25
5.2 Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes.....	25
5.3 Back Analysis.....	27
5.4 Influencia de los lentes de material fino en la estabilidad de taludes.....	32
5.5 Análisis de la influencia del movimiento de tierras en el F.S.....	35
5.6 Análisis de la caída de cantos rodados.....	36
<b>6.0 Catálogo de falla</b> .....	<b>50</b>
6.1 Situación actual.....	50
6.2 Catálogo de falla.....	50
6.2.1 Agentes que provocan la inestabilidad de los taludes.....	51
6.2.2 Principales fallas y problemas del talud.....	54
<b>7.0 Proyecto de estabilización</b> .....	<b>59</b>
7.1 Alternativas para la estabilización del talud.....	59
7.2 Análisis de soluciones realizadas en el sitio.....	64
7.3 Diseño de red metálica más malla hexagonal de doble torsión.....	68
7.4 Diseño de solución combinada sistema de tierra armada con valla estática.....	81
<b>8.0 Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>94</b>
<b>9.0 Bibliografía</b> .....	<b>97</b>

## CAPITULO 2

### 2.0 Antecedentes:

La Costa Verde se define como “la franja litoral” de la costa, que desde el distrito de La Punta hasta el de Chorrillos (La Chira), comprende las playas y terrenos existentes desde la línea de más alta marea, así como los que se ganen al mar; los acantilados hasta su borde superior, y la franja de ancho variable de terrenos del estado y de particulares ubicados a partir del borde superior de los acantilados hacia el interior continental.

La Costa Verde es una zona importante para el desarrollo de la capital pues tiene un alto potencial de desarrollo turístico y empresarial. Además, en ella se encuentra uno de los corredores viales más transitados de la ciudad. Los distritos que conforman la Costa Verde son La Punta, Bellavista, La Perla, San Miguel, Magdalena del Mar, San Isidro, Miraflores, Barranco y Chorrillos.

Los tramos de Magdalena y San Miguel han sido declarados en más de una ocasión en emergencia, debido a los problemas suscitados en los taludes del acantilado y accidentes derivados de estos.

### 2.1 Breve reseña histórica del acondicionamiento moderno de la Costa Verde:

Las bajadas de acceso a las de las playas de la Costa Verde, fueron construidas a fines del siglo XIX en los sectores de Barranco y Chorrillos, con fines de recreación pública de verano.

Para poder conformar playas de arena, entre los años 1920 y 1930 se construyeron los primeros enrocados y espigones al sur del litoral. En 1940, el Club de Regatas Lima inicia sus obras de “enrocado” en los límites de su propiedad, para sedimentar arena y ampliar su espacio recreativo. Consecuencia de esta iniciativa, las obras de espigonado en los años siguientes (1941-1950) fueron más significativas en la conformación de playas en el sector de los Baños de Barranco, Agua Dulce y Pescadores.

En estos mismos años, las autoridades edilicias de la época apoyaron proyectos de apertura y reacondicionamiento de accesos peatonales y carrozables para los Baños de Miraflores, Barranco y la Herradura de Chorrillos. En la **Foto 2.01** se puede apreciar el estado del acantilado en el año 1956.

En el periodo comprendido entre 1960 y 1970, a través del gobierno central, se formularon planteamientos para configurar un territorio destinado a la recreación metropolitana, en lugar de playas aisladamente logradas, resultando de estos, uno de los primeros estudios de prefactibilidad, encargado a la empresa Aramburu-Menchaca-Corpei (1972). Además, se destinaron presupuestos para obras de infraestructura vial que unieron Miraflores con el sector de La Herradura.

Entre los años 1980 y 1990, la Municipalidad de Chorrillos realizó obras viales de La Herradura hacia La Chira. El gobierno central por su parte unió vialmente los distritos de San Isidro, Magdalena y San Miguel.

El tramo desde Marbella hasta la bajada Bertolotto se realizó a fines de esta década, denominándosele “Av. Costanera Almirante Miguel Grau”, correspondiente a la segunda etapa del Proyecto Especial Costa Verde.

Entre los años 1990 y 2000, se ejecutaron obras para el Mejoramiento Sanitario de la Costa Verde: se instaló el Colector Costa Verde y sus respectivas redes entre los distritos de Miraflores y Chorrillos; se construyó la Cámara de Bombeo para impulsar desagües hacia el Colector Surco en Chorrillos, y se construyó la Cámara de Rejas que detiene el 90% de la carga de sólidos presentes en las aguas servidas del Colector Surco, antes de su emisión al mar.

En 1995, la Autoridad del Proyecto Costa Verde y el Instituto Metropolitano de Planificación (IMP) con el Financiamiento de las municipalidades ribereñas, suscriben un convenio para la elaboración del estudio “Plan Maestro de Desarrollo de la Costa Verde 1995-2010”. Donde se plantean los lineamientos y planes que se pretenden seguir para el desarrollo de la Costa Verde. Resultando, de estas iniciativas, la recuperación del espacio urbano y la construcción de modernas estructuras para la diversión y turismo, como por ejemplo Larco Mar y Sport Paradise Park.



**Foto 2.01** Foto del acantilado de la Costa Verde en el distrito de Magdalena a la altura del final de la Av. Sucre (Ex. Independencia) y Av. Brasil. *Servicio Aerofotográfico Nacional (1956)*

## **2.2 Antecedentes técnicos:**

Entre las principales fuentes, ordenadas cronológicamente, cabe mencionar:

a) *Estudio de la Protección del Litoral de las Bahías del Callao y Miraflores.* El informe, realizado por la misión francesa “Sogreah” en 1959, pertenece a la Dirección de Hidrografía y Navegación de la Marina de Guerra del Perú (DHN). Entre los puntos más saltantes se encuentran análisis de vientos, temperatura, oleaje, corrientes y geomorfológicos. Cabe destacar el ensayo de reconstrucción de la formación de las Bahías del Callao y Miraflores (ver **Foto 2.02**). Para la estabilización de los taludes del litoral, plantearon como alternativa de solución el uso de un conjunto de muros de concreto usados en Biarritz, al Sur Oeste de Francia, por la constitución análoga a los taludes de la Bahía de Miraflores. Sin embargo, las suposiciones y condiciones en las

que se encontraba la Costa Verde cuando se realizaron este informe han ido variando a lo largo del tiempo y no se pueden aplicar.

*b) Estudio de Prefactibilidad de defensa del Litoral y la habilitación de nuevas playas de Lima Metropolitana* Realizado en 1972 por la asociación de la consultoras Corpei-Aramburú-Menchaca es uno de los estudios que más ha abarcado respecto a las investigaciones en la Costa Verde en distintas especialidades. Este, fue requerido por el Ministerio de Vivienda-Dirección General de Desarrollo Urbano. Dicho estudio, además de sus anexos, abarcaron dos años de trabajos en esta zona. El informe comprendió desde La Punta hasta Chorrillos y estudiaba principalmente el análisis de la erosión marina de la franja costera, la estabilidad de los taludes y la red vial que se generaría entre la playa y los acantilados, entre otros. Este, es un muy buen referente de la zona, el cual nos permite hacer una comparación en los métodos de análisis de hace 30 años, las proyecciones sociales, económicas y urbanísticas con la realidad actual.

En este informe, se agrupan los taludes en 4 categorías (inestable, estable, crítico y relleno) y se dan recomendaciones para mejorar la estabilidad de los taludes tales como la revegetación, el control de los rellenos, clausura de desagües que vertían sus aguas a la superficie del talud y combinaciones de espigonados y enrocados para solucionar el problema de la erosión marina (especialmente La Perla y San Miguel). No existía aún la pista que corre al pie del talud en la zona del presente estudio y la caída de cantos rodados no era un problema en el que hayan entrado a detalle.

*c) Proyecto de remodelación de los acantilados de Magdalena y San Miguel (estudio de prefactibilidad).* El estudio fue realizado por la Dirección de Geotecnia del Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) en 1979, el cual fue el tema de tesis del Ing. Eduardo Díaz Leturia. Este documento, trata el estudio geodinámico y la estabilidad de los acantilados en la margen costera de los distritos de Magdalena del Mar y San Miguel. El estudio resalta la presencia de derrumbes dentro del tramo de estudio de la presente tesis. Se sugiere adoptar, para el problema de la estabilidad de los taludes, la construcción de pequeños muros de contención paralelos a la autopista en las áreas críticas propensas a derrumbes, complementando la estabilidad del acantilado mediante el peinado del talud y su respectiva forestación. No se presenta un diseño a detalle de las características de los muros de contención a usar (pues es un estudio de prefactibilidad) sin embargo muestra una sección típica, en la que se ubica un muro de contención al pie del talud, en el que solo se define el ancho del arreglo (4 m).

*d) Tesis: "Análisis de Estabilidad Estática y Dinámica de los Acantilados de Lima" Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Ingeniería (FIC-UNI).- García E. (1984) y "Evaluación del Riesgo Geotécnico con Incidencia en la Estabilidad Estática de Taludes para los Acantilados de Lima" Universidad Ricardo Palma (URP)-.Sosa O.(1992)* Ambas tesis realizan un análisis de estabilidad de taludes mediante el empleo del Método de Sarma . En estas tesis se emplearon 30 secciones a lo largo de la Costa Verde, para analizar los taludes bajo condiciones estáticas y dinámicas, encontrándose superficies de falla y probabilidades de falla. Ambos autores destacan la falta de información precisa sobre los parámetros de resistencia al corte del suelo conglomerado que conforma la Costa Verde. Se recomienda prohibir la acumulación de desmontes en la parte alta del acantilado, evitar el riego por inundación, retirar los colectores de desagüe y disminuir la erosión marina. No se presentan diseño de soluciones técnicas al problema de estabilidad de los taludes.

*e) Plan Maestro de desarrollo de la Costa Verde 1995-2010 Volumen A: Diagnóstico Instituto Metropolitano de Planificación ,Agosto de 1995.* Aprobado de acuerdo al



Convenio Marco suscrito entre la Autoridad Autónoma del Proyecto Costa Verde (APCV) y el IMP. El Volumen A: Diagnóstico, presenta los Antecedentes Institucionales, Legales y Técnicos del Estudio, así como los lineamientos Operativos y normativos del mismo. Presenta una descripción general de las características físicas-ambientales, político geográficas, de viabilidad y transporte, entre otros para poder tener una referencia del estado de la Costa Verde con fines de inversión y desarrollo. En el volumen B: Propuestas y D: Programa de Inversiones, se presentan criterios a seguir para las selecciones de las soluciones de estabilización y reforestación, pero sin inclinarse por alguna alternativas de diseño en particular. Cabe resaltar que se encontró una propuesta de revegetación por inundación, lo que como se detallará más adelante, es perjudicial para el talud. Los informes, en algunos casos, son muy generales para toda la Costa Verde para ser usados en la presente tesis.

f) *Foro técnico: “La Costa Verde: diagnóstico, propuestas y soluciones.” CISMID-FIC-UNI 1996* Dentro de este foro, auspiciado por el Instituto Nacional de Defensa Civil (INDECI), se discutió acerca del Proyecto Costa Verde en sí, la costa y el mar, la estabilidad de taludes y distintas propuestas de desarrollo. Se ha podido tener acceso a información de trabajos referentes al tema de los expositores, los cuales se mencionan en la bibliografía. Dentro de las soluciones que se plantean respecto a la estabilización de taludes y algunos de sus problemas específicos, se encuentran: elementos de retención flexibles con geomallas, forestación de complemento a soluciones civiles y como medida de protección contra la erosión, modificación de la geometría del talud (cortes, rellenos, etc), protección mediante enmallado con anclajes, concreto lanzado, asfalto, concreto armado, elementos prefabricados, etc. Ya se empieza a mencionar el problema de la caída de cantos rodados. Este foro es importante pues se toma especial interés en el tema de estabilidad de taludes, además de realizarse enfoques de ingeniería civil en una situación que ya es parecida a la actual de la Costa Verde.

g) *Estudio de la seguridad física de los acantilados de la Costa Verde.* El estudio fue realizado por la Dirección de Geotecnia del INGEMMET en mayo de 1997. El objetivo del informe es efectuar el análisis de la composición, origen y características geomecánicas de los materiales que conforman los acantilados y emitir recomendaciones que puedan servir para mejorar sus condiciones de estabilidad. El informe sugiere para determinadas zonas la agroforestería como medida de protección contra la erosión de los acantilados.

h) *Tesis: Análisis de la Estabilidad de Taludes de la Costa Verde FIC-UNI.* La tesis de la Ing. Cañari, finalizada el 2001, es parte de un conjunto de trabajos realizados para EMAPE por la compañía HIDROENERGIA consultores en ingeniería SCRL, sobre la estabilidad del Acantilado de la Costa Verde. Estos informes fueron presentados en 1997. El área que abarcó esta tesis fue la zona desde el distrito de San Miguel (bajada Bertolotto) hasta la quebrada de Armendáriz (Miraflores), con una longitud aproximada de 8.5 km y un ancho aproximado de 55 m. Resalta, entre otros aspectos, el ensayo in-situ de corte directo y la Zonificación Geológico-Geotécnica de los acantilados en términos de riesgo. Es uno de los pocos trabajos que logra encontrar valores de parámetros de la resistencia al corte del conglomerado de la Costa Verde, mediante ensayos de campo a gran escala. Utiliza los valores obtenidos para calcular factores de seguridad en la estabilidad de taludes. Se recomienda usar como medidas de estabilización en los acantilados gaviones, vallas de protección, concreto lanzado, forestación, pantallas de anclaje, muros de pirca, desquinche y banquetas. Se encuentran valores de diseño para la elaboración de soluciones contra la caída de cantos rodados, sin embargo, los modelos son diferentes a los encontrados para la zona en estudio. El informe es una buena referencia para el estudio de la estabilidad de taludes de la Costa Verde en la actualidad.



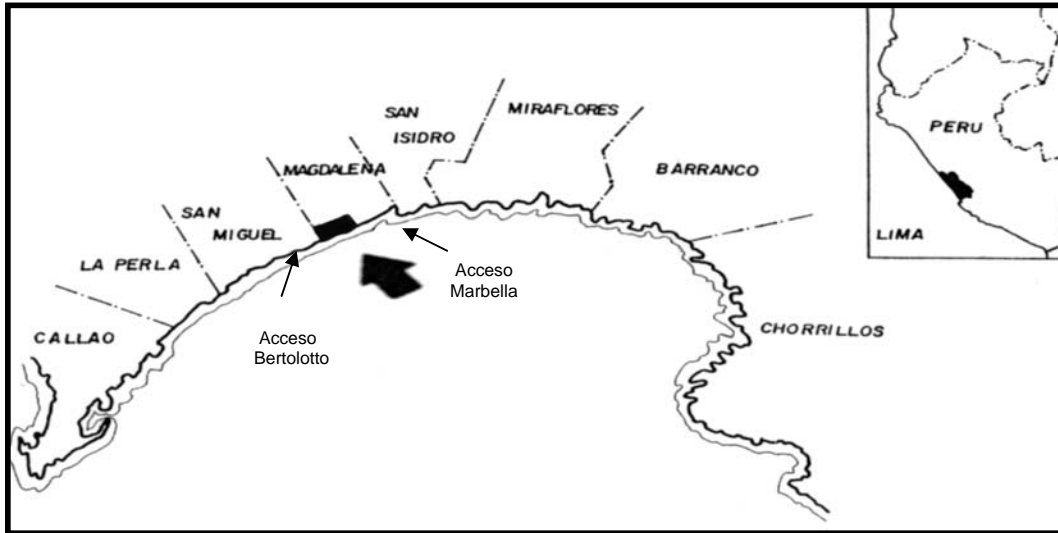
**Foto 2.02** Modelo utilizado en la reconstrucción de la formación de la Bahía .  
*Sogreah (1959)*

### **2.3 Ubicación del área en estudio:**

Los acantilados de los distritos de Magdalena del Mar, tienen una longitud y ancho aproximado, de 2.5 km y 50 m respectivamente y están ubicados en la parte central del litoral y al Oeste de Lima Metropolitana. Los límites de los acantilados de Magdalena son: por el Norte el distrito de San Miguel y por el Sur el distrito de San Isidro (a la altura del Parque “La Pera del Amor”).(ver **Gráfico 2.01**).

El acceso a la zona del estudio es a través de las entradas viales a la Costa Verde tales como el acceso de la Av. Bertolotto , el de la Av. Brasil (ver **Gráfico 2.02**) y el de Marbella.

El tramo de 500 m. seleccionado para el desarrollo de la tesis, se ubica entre el límite distrital de Magdalena y San Miguel, y la Avenida Brasil. Está delimitado, aproximadamente, por la intersección de las calles Pascual de Vivero con Diego Ferré (progresiva P 0+000) y la calle Diego de Agüero (progresiva P 0 +500). Se puede apreciar una vista panorámica del tramo de estudio en la **Foto 2.03**.



**Gráfico 2.01** Ubicación de la zona en estudio.  
*Adaptado de Sosa (1992)*

#### **2.4 Condiciones Climáticas:**

Los acantilados de la zona de Magdalena, en la franja de la Costa Verde, están sometidos a la acción de condiciones micro climáticas particularizadas dentro de la costa peruana, tipificándolo como clima semiárido, bañado por brisas marinas.

A pesar que no se registran variaciones extremas entre las temperaturas máximas y mínimas anuales, la nubosidad permanente durante los meses de Abril a Noviembre, y el contenido elevado de humedad en todos los meses del año, constituyen condiciones que limitan la instalación de ambientes recreación, diversión, turismo y vivienda.

En general, en la Costa Verde se tiene una precipitación pluvial anual promedio de 0.48 mm. Las precipitaciones están referidas a la presencia de garúas invernales. La humedad relativa se mantiene entre el 94% y el 67% siendo mayor en los meses de invierno.

Los vientos locales de mayor intensidad ocurren en el periodo de Octubre a Enero, siendo su dirección predominante sur.



**Foto 2.03** Vista panorámica en la actualidad del tramo en estudio. (Dic 2002)

### **2.5 Topografía del área en estudio:**

Para la elaboración de los planos se han tomado como base los planos de la Autoridad Autónoma de la Costa Verde en una escala 1:1000, del Instituto Catastral de Lima (1997) en una escala 1:1000 y el plano de las obras municipales realizadas a mediados del 2002 en la corona del talud-Escala 1:200, proporcionado por la Municipalidad de Magdalena.

El mes de agosto del 2002 se realizó un levantamiento topográfico complementario del relieve del talud. Debido a la imposibilidad de usar instrumentos topográficos convencionales por las condiciones de la zona, se empleó una estación Total marca Trimble serie 5600 que no requiere de prismas. Este equipo es propiedad de la empresa Geosystems, a la que también se les encargó el procesamiento de las curvas de nivel y los cortes transversales cada 50 m, dentro del tramo en estudio.

Para referenciar la altura de las curvas del nivel de los taludes, se tomó el BM-FIC-1, el cual se encuentra incrustado en la Puerta principal de la Univ. Nacional Federico Villareal-Facultad de Ingeniería Civil, y tiene una elevación de 54.7286 m.s.n.m.

Debido a la configuración del terreno, la presencia de gente de mal vivir, el alcance del instrumento y a estructuras aledañas, existieron zonas en las que no se pudo divisar con toda precisión la parte más alta del talud.

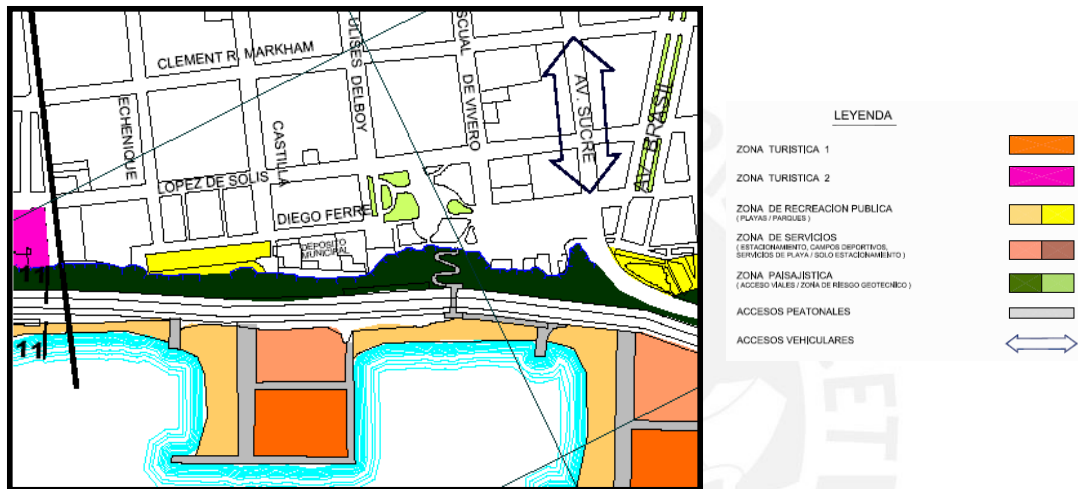
Cabe señalar, que al realizar el empalme entre los planos de catastro de 1997(1:1000), el levantamiento topográfico de los taludes y el levantamiento de las nuevas obras municipales realizadas cerca al talud (1:200) se presentó un desfase debido a que el plano de catastro viene de la reconstrucción fotogramétrica y los otros dos son producto de mediciones en campo.

### **2.6 Información diversa:**

Existen numerosos artículos periodísticos que enfocan y describen los problemas de los taludes, los accidentes ocasionados y los distintos cierres de esta vía. Mediante ellos uno se puede hacer la idea de la magnitud del problema de la caída de cantos y

derrumbes del talud. Estos artículos aportan rigurosas descripciones de las condiciones del sitio, sin embargo, la mayoría de ellos carecen de criterios técnicos, y confunden los términos (por ejemplo deslizamientos con derrumbes) que pueden llevar a conclusiones erróneas.

Uno de los proyectos que la prensa resalta, y es mencionado en diversos informes, es el unir vialmente la Punta con San Miguel. Sin embargo si es que no se lleva a cabo un correcto estudio de las verdaderas condiciones y posibilidades que representa la realización de esta vía, se pueden presentar iguales (o mayores) problemas a los encontrados en la zona de los distritos de Magdalena y San Miguel. En el **Gráfico 2.02** se puede ver la zonificación de los suelos que el Plan Maestro de la Costa Verde contempla.



**Gráfico 2.02** Zonificación del uso de los suelos y del mar según el Plan Maestro de la Costa Verde- IMP (1999)

## CAPITULO 3

### 3.0 Geología de la zona:

#### 3.1 Generalidades:

La ciudad de Lima se encuentra asentada sobre el cono de deyección del río Rimac. Este cono está conformado por un conglomerado de cantos rodados y gravas de origen ígneo, mezclados íntimamente con arenas y materiales limo-arcillosos, que actúan de matriz en mayor o menor grado. Estos materiales finos frecuentemente aparecen formando lentes de espesor variable (Martínez, 2001), notándose que en los bordes laterales del cono de deyección predominan depósitos limo-arcillosos intercalados con lentes arenosos de espesores reducidos. Este conglomerado puede ser observado en la pared del talud que conforma los acantilados de Lima.

El cauce del río Rimac a lo largo de su historia, ha variado de posición desplazándose de Sur a Norte hasta llegar a la ubicación actual. Su descarga de agua ha sufrido evidentemente variación. Al parecer, durante las crecidas del caudal del río han tenido lugar desbordes hacia las márgenes del mismo, originando acumulaciones de material que luego han servido para modificar el cauce en la etapa de estiaje.

El cono de deyección del río Rimac poseía una mayor extensión frontal, pero debido a procesos de erosión marina se ha ido reduciendo y modelando, formándose así los actuales acantilados del litoral limeño (Carrillo, 1979).

El vértice de este cono de deyección se ubica en las inmediaciones del distrito de Vitarte; el límite Sur está demarcado por el macizo rocoso del Morro Solar de Chorrillos, mientras que hacia el Norte este cono de cubre parte del abanico aluvial del Río Chillón. El actual lindero entre los abanicos aluviales de ambos ríos se encuentra aproximadamente a 3 km al Norte del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez. El abanico, de Este a Oeste, presenta una pendiente promedio de 1:80 (INGEMMET, 1997).

Cabe mencionar que en el distrito de Magdalena se observa que la acción de los procesos de erosión marina, manifestados en el retroceso del talud y la destrucción de estructuras en la corona, ha sido más intensa que en el resto del litoral limeño correspondiente a la Bahía de Miraflores. Esta erosión intensa es producto de la construcción de espigones en el distrito de Chorrillos y aledaños, con el objeto de “ganar” terreno al mar y la protección lateral de la Costa, afectándose el equilibrio erosión-sedimentación de la bahía. (Maggiolo, 1971).

Una característica importante de los acantilados es la presencia de costras calcáreas principalmente entre los distritos de Chorrillos y Miraflores. El origen del contenido carbonatado de las aguas subterráneas de la región de Lima se debe a que “en el cañón del Infiernillo, la erosión del río Rímac en distintas formaciones rocosas, arrastra fragmentos de calizas, que se vuelven gravas angulosas, arenas y finalmente por disolución desaparecen en las aguas del río y, luego, estas pasan a formar las aguas subterráneas que finalmente la deposita en forma de costras en los taludes” (Martínez, 2001).

Las costras se formaron “por la precipitación de estos carbonatos en la superficie libre de los acantilados debido a distintas condiciones de termodinámica en los acantilados” (Aramburú Menchaca-CORPEI, 1972). Inclusive, hasta hace algunas décadas, era posible observar en la pared “rocosa” que conforma los acantilados de Lima, que el

agua afloraba en forma de “chorrillos” debido a que los acantilados cortaban la napa freática.

### **3.2 Características Geomorfológicas de los acantilados de la Zona de Magdalena:**

Desde el punto de vista morfológico (ver Gráfico 3.01), el distrito de Magdalena del Mar se halla asentado sobre una terraza fluvio-aluvional del cono de deyección del río Rimac, modelada por las aguas del Océano Pacífico.

El análisis litológico realizado por INGEMMET (1997) de los cantos rodados presentes a lo largo de la Costa Verde, “demuestra predominio composicional general de rocas volcánicas, sobre intrusivas y sedimentarias”. Sin embargo, en la zona del presente estudio, existe más bien predominio de rocas intrusivas sobre rocas volcánicas y se reconoce además una variación en la orientación de los rodados con respecto a las zonas aledañas (San Isidro, Barranco y Miraflores). Estos hechos se deben, en gran parte, a las variaciones de posición y caudal experimentadas por el río Rimac, tal como se mencionó anteriormente.

Antes de la construcción de la pista Costanera Miguel Grau, al pie de los acantilados de la Costa Verde, el mar se encontraba en contacto directo con la base de los mismos, conformándose en esta zona playas de cantos rodados, socavando el pie de los acantilados.

Muchas de las quebradas y cárcavas que existían perpendiculares a la cara de los acantilados, han sido rellenadas con desmonte y material de préstamo. Algunas de las de mayor tamaño, como por ejemplo las ubicadas al final de la Av. Brasil y en la primera cuadra de la Av. Bertolotto, se aprovecharon como accesos viales al corredor de la Costa Verde.

Se realizará un mayor detalle de algunos de los puntos mencionados en capítulo referente a la situación actual de los taludes.

### **3.3 Características litológicas:**

En términos generales se distinguen las siguientes unidades:

#### **3.3.1 Depósitos marinos:**

Se trata de depósitos litorales, compuestos por materiales clásticos, transportados al mar por efecto de la acción de los ríos y en parte como resultado de la acción erosiva de las olas. Estos sedimentos han sido posteriormente redistribuidos por efecto de la deriva costera.

Estos depósitos pueden ser observados en los escombros acumulados al pie de los acantilados en forma de montículos y acomodados en declives alineados en relación con el transporte continuo del oleaje. Litológicamente están conformados por diferentes tipos de rocas, presentan granulometría variada y formas redondeadas a subredondeadas. El predominio de cantos rodados se observa desde Mar Bella hasta el sector de la Municipalidad de San Miguel en una distancia aproximada de 3 a 4 km (INGEMMET, 1979).

### **3.3.2 Depósitos Eólicos:**

Están compuestos por arena fina acumulada por la acción del viento en los bordes de los acantilados y barrancos de las fajas costaneras, de acuerdo a la topografía y dirección del viento locales. En el caso específico del tramo en estudio se pueden observar pequeñas acumulaciones de arena en la cara del talud y en las eventuales terrazas intermedias.

Estas arenas tienen su origen en la porción más fina de las arenas de playa, se depositan en los taludes, presentan espesores reducidos y son completamente inestables.

### **3.3.3 Depósitos fluvio-aluvionales:**

Los depósitos aluviales del cuaternario están constituidos principalmente por los materiales acarreados por los ríos que provienen de la vertiente occidental andina atravesando terrenos de rocas terciarias, rocas mesozoicas y el Batolito de la Costa. Estos materiales tapizan el piso de los valles, habiéndose depositado en parte en el trayecto de estos ríos y en gran parte a lo largo y ancho de sus abanicos aluviales (INGEMMET, 1997).

El principal depósito aluvial del pleistoceno lo constituye el antiguo cono aluvial del Río Rimac. Los sedimentos de estos depósitos aluviales, observados en terrazas, cortes y perforaciones, están representados por conglomerados. En los canales ubicados en la parte central del cono de deyección predominan grandes espesores de cantos rodados en matriz limo arcillosa. En los bordes laterales predominan depósitos limo-arcillosos con lentes de limos y arcillas de espesores reducidos.

### **3.3.4 Depósito aluvial:**

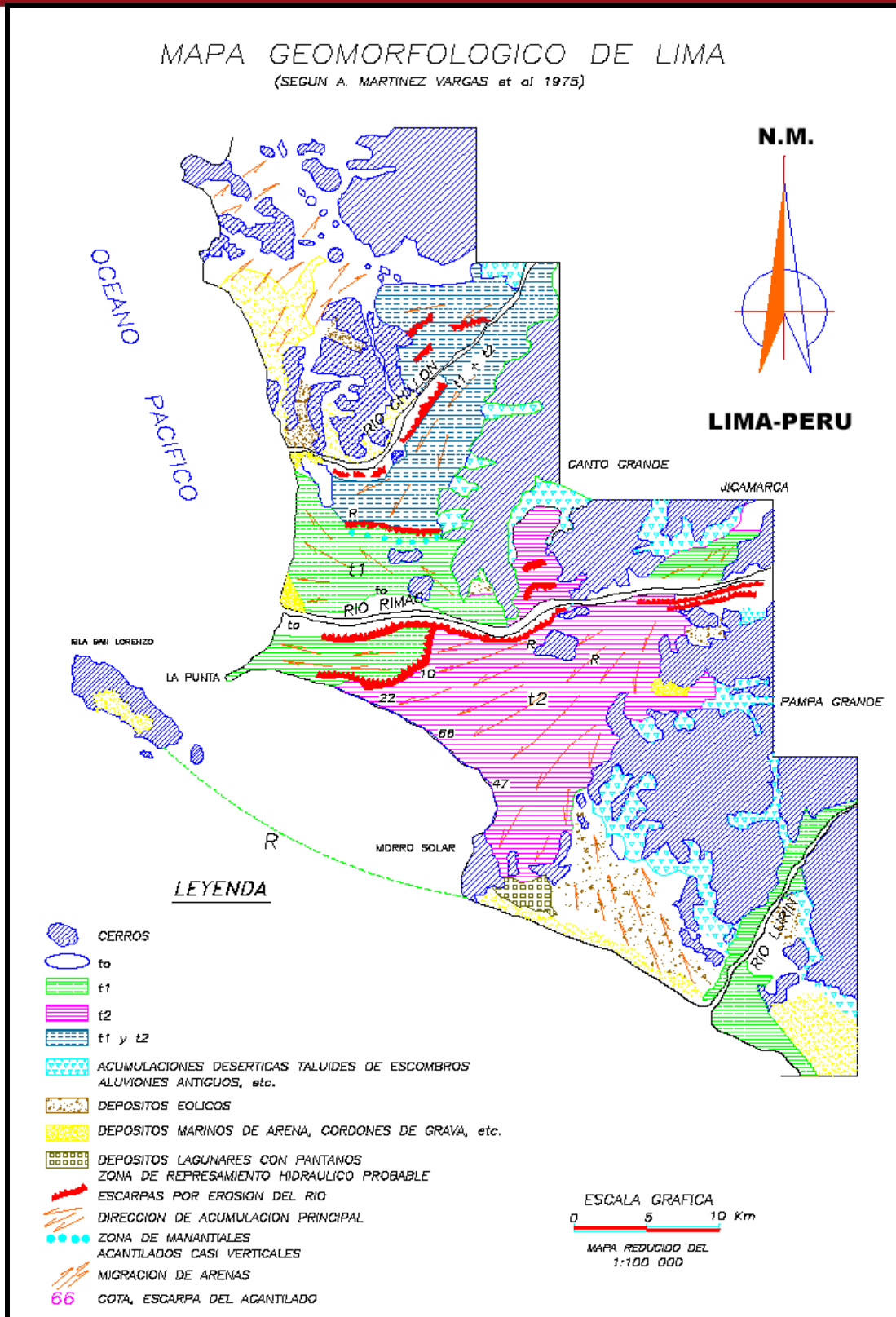
Este material es de la edad cuaternaria reciente y pertenece a las últimas avenidas del río Rimac. Es un depósito heterogéneo compuesto de arcillas, arenas y limos, que se presentan sin orden ni arreglo alguno.

### **3.3.5 Depósito de rellenos:**

Consisten principalmente de basura, desmonte y deshechos de viviendas. En algunas zonas se pueden apreciar pedazos de concreto y ladrillos en la cara del talud.

Estos rellenos colocados por el hombre, son variables en cuanto a su ubicación y tipo de material. Por ejemplo, existen zonas en las cuales se siguió una política de creación de parques, generándose así el relleno de cárcavas en el talud (debidamente compactados). En otros casos estos rellenos se ubican en antiguas zonas explotadas como canteras. Gran cantidad del material extraído de la Vía Expresa del Paseo de la República fue utilizado para “ganar” tierra al mar, etc.





**Gráfico 3.01** Mapa Geomorfológico de Lima.  
Tomado de Martínez (2001)

## CAPITULO 4

### 4.0 Geotecnia:

#### 4.1 Generalidades:

Los taludes de la Costa Verde en la zona del distrito de Magdalena están constituidos en su mayoría por una grava mal gradada (o graduada) con matriz areno arcillosa, que comúnmente se identifica como el “conglomerado” de Lima. Las gravas que lo conforman son redondeadas a subredondeadas (cantos rodados), tienen un tamaño máximo de 25 cm, un tamaño medio menor de 10 cm y es susceptible al intemperismo de la zona (ver **Foto 4.01**). Como se menciona en la geología, existe un predominio en la litología de los cantos rodados de origen volcánico sobre intrusivo.

El talud presenta intercalaciones de finos o lentes, en su mayoría arcillosos, de espesor promedio de 2 m y máximo de aproximadamente 5 m. Estas intercalaciones de finos, no tienen un orden particular, sin embargo, generalmente son horizontales y su espesor disminuye con respecto a la altura.

La elevación promedio de los taludes por sobre la pista es de 46 m, y tienen un relieve de pendiente entre 45° y 90° (en algunos pocos casos mayor a 90°), medidos respecto al plano horizontal (**ver Plano 01**). La distancia promedio de la pista al pie del talud es de 5 m.

Los rellenos que se encuentran en la parte superior del talud consisten de material de préstamo, basura y desmonte los cuales tienen una pendiente entre 40° y 60° (promedio 46°) y espesor variable. El de mayor envergadura, según fotografías aéreas de hace más de 40 años y la evidencia actual, esta ubicado a la altura del Estadio “Chambochumbi”, progresiva P 0 +150.



**Foto 4.01** Vista de cantos rodados que conforman el conglomerado.

#### 4.2 Ensayos de laboratorio:

Se agruparon en ensayos en material grueso y material fino. Los resultados de estos e pueden encontrar en el anexo informático de la presente tesis.

#### 4.2.1 Ensayos en material grueso:

##### 4.2.1.1 Ensayos de clasificación:

Debido a la accesibilidad de la zona, la mayoría de las muestras fueron extraídas al pie del talud. Se tomaron 17 muestras alteradas en bolsa (Mab) de material gravoso. A cada una de estas muestras se le realizó el análisis granulométrico por tamizado respectivo (NPT 339,129-ASTM D 422). Cuando fue posible, se efectuaron ensayos de límites líquidos, límites plásticos (NPT 339,129- ASTM D4318), ensayos de peso específico de sólidos (NPT 339,191-ASTM D854) y ensayos granulométricos por sedimentación (NPT 339,128-ASTM D 422) al material que paso la malla #200 para tener una idea de las propiedades del material fino que constituye la matriz del conglomerado. Los valores correspondientes a los ensayos de peso específico de sólidos (NPT 339,129-ASTM D 854), corresponden a la porción fina de material constituyente de las muestras.

Del total de las muestras, se usaron 11 muestras separadas 50 m entre si para la confección de un huso granulométrico. (**ver Gráfica 4.01**)

	Muestra	LL	LP	IP	Gs	SUCS	P <sub>4</sub>	P <sub>200</sub>	Cu	Cc
1	P 0+000				2.7	GP	35.40	1.01	1.98	0.001
2	P 0+050	NP			2.7	GP-GM	33.90	5.95	3.04	0.003
3	P 0+100				2.68	GP	14.40	2.30	0.58	0.008
4	P 0+150	22	19	3	2.71	GP	11.40	2.20	0.76	0.010
5	P 0+200					GP	19.50	2.68	1.18	0.013
6	P 0+200	NP			2.68	GP	15.40	2.23	0.72	0.010
7	P 0+250	22	17	5		GP	19.20	2.76	0.88	0.009
8	P 0+250	NP			2.69	GP	11.40	2.42	0.68	0.009
9	P 0+300					GP	14.90	2.93	0.90	0.012
10	P 0+300	20	16	4		GP	100.00	4.76	1.27	0.018
11	P 0+300	22	19	3	2.7	GP	17.00	3.70	1.08	0.017
12	P 0+ 325	23	18	5	2.68	GP-GC	29.20	5.90	1.82	0.007
13	P 0+350	28	20	8	2.67	GP-GC	24.80	7.35	1.97	0.019
14	P 0+350	27	19	8		GP	5.60	1.43	0.04	0.001
15	P 0+400	24	17	7		GP-GC	29.30	6.84	1.93	0.010
16	P 0+450					GP	18.40	4.60	2.49	0.018
17	P 0+500	21	17	4		GP	25.30	4.20	0.91	0.011

**Cuadro 4.01** Resumen de la clasificación de suelos gravosos según los ensayos índice en laboratorio para el material encontrado en el Distrito de Magdalena.

De los resultados de los ensayos anteriores, se puede observar, que en promedio, la cantidad de partículas que pasan la malla #4 es el 25% y que el material que pasa la malla #200, presente en el conglomerado, es el 4% del peso y tiene una plasticidad baja. Asimismo, se puede ver que en promedio, el valor del Cu es 1.30% y el valor de Cc es 0.01%.

#### 4.2.1.2 Ensayos resistencia al corte:

Es difícil pretender hacer un ensayo compresión triaxial en el conglomerado de Lima, ya que la elección del espécimen depende de la granulometría (tamaño máximo del suelo), lo que nos llevaría a tener muestras talladas de diámetros muy grandes y también cámara de ensayos de dimensiones que no están disponibles en nuestro medio. El diámetro mínimo usual es de 35 mm y en el Perú es posible ensayar probetas de hasta 150 mm. de diámetro.

La tesis de Mariela Cañari de la UNI (2001) hace un aporte importante al estudio de este tipo de suelos en la Costa Verde, realizando un ensayo de corte directo “gigante” con el que obtiene valores de parámetros de resistencia al corte. En el capítulo de análisis de estabilidad de taludes, se hace un “back analysis” para ver como distintos valores de los parámetros de resistencia sugeridos por la bibliografía se desempeñan en un modelo basado en la topografía real del tramo.

#### 4.2.1.3 Ensayos especiales

Parte de la resistencia al corte del conglomerado es atribuida a la cementación por carbonatos (en especial el calcio) de la matriz de este suelo. Por lo que se realizó un análisis químico, con el cual se determina la presencia de carbonatos  $\text{CO}_3^2$  en la matriz (seleccionándose para ello el material que pasa la malla # 4), tomando 3 muestras, una al inicio, al medio y al final del tramo. Resultados:

Muestra	Ubicación	Tipo	Clasificación	Contenido Carbonatos ( $\text{CO}_3^2$ ), %
M-1	P 0 + 000 Magdalena	MAB	SP	0.02
M-2	P 0 + 250 Magdalena	MAB	SP	0.30
M-3	P 0 + 500 Magdalena	MAB	SP	0.06

**Cuadro 4.02** Resultado de análisis de carbonatos en matriz arenosa del conglomerado.

De donde se puede confirmar la presencia de este cementante, sin embargo, no podemos cuantificar el aporte de este a la resistencia al corte. Son pocos los estudios acerca de la relación de cementación vs. resistencia al corte en suelos de clima como el nuestro. En el estudio de Walsh (1997) “*Shear Strength Attributable to Cementation Versus Soil Suction in Arid Enviroements*” *Unsaturated Soil Engiennering Practice Geotechnical Special Publication N°68*” ASCE se puede ver que para concentraciones de carbonatos menores a 1% la contribución es pequeña, sin embargo, sería preferible realizar ensayos de campo en el conglomerado de Lima en los que se pueda evaluar la diferencia en la resistencia al corte de muestras con cementación y eliminando este efecto (por ejemplo, usando ácidos).

#### 4.2.2 Ensayos en material fino:

##### 4.2.2.1 Ensayos de clasificación:

Las 14 muestras del fino, fueron tomadas en los lentes más representativos del talud y en las zonas en las que se pudo observar un cambio de material. Usando estas muestras se pudo obtener un huso de los materiales finos (ver **Gráfica 4.02**).

	Muestra	LL	LP	IP	Gs	SUCS	P <sub>200</sub>
1	P 0-050	43	26	17	2.63	CL	98.30
2	P 0+000	24	18	6	2.75	SC-SM	41.20
3	P 0+000	28	21	7	2.68	CL-ML	73.90
4	P 0+025	37	24	13	2.7	CL	80.96
5	P 0+050 (I)	27	20	7	2.7	CL-ML	84.80
6	P 0+050 (II)	26	20	6	2.7	CL-ML	70.50
7	P 0+ 050	28	23	5	2.72	ML	65.00
8	P 0+050	24	19	5	2.7	CL-ML	58.09
9	P 0+075	24	19	5	2.72	CL-ML	65.81
10	P 0+100	26	20	6		CL-ML	87.20
11	P 0+150	26	20	6	2.7	CL-ML	65.30
12	P 0+200	24	19	5	2.73	CL-ML	65.60
13	P 0+300	28	21	7	2.73	CL-ML	89.49
14	P 0+400 (con tubo)	30	22	8	2.67	CL	74.10

**Cuadro 4.03** Resumen de la clasificación de suelos según los ensayos índice en laboratorio para el material encontrado en el Distrito de Magdalena.

**4.2.2.2 Ensayos resistencia al corte:**

La muestra inalterada (MiB) para la realización de los ensayos triaxiales se obtuvo en la progresiva P 0+050 debido a que en los primeros 100 m. del tramo los lentes tienen mayor potencia, longitud y accesibilidad.

Se hicieron dos tipos de ensayos de compresión triaxial según normas NTP 339.164, ASTM D 2850 para el caso no consolidado no drenado (UU) y NTP 339.166, ASTM D 4767 para el caso consolidado no drenado CU. El ensayo no consolidado no drenado (UU), se realizó presiones de cámara de 1,2 y 4 kg/cm<sup>2</sup> y muestras de 35 mm. de diámetro y 8.00 cm. de altura. Mientras que el ensayo consolidado no drenado se realizó con una contra presión de 4 kg/cm<sup>2</sup> y presiones de cámara de 5,6 y 8 kg/cm<sup>2</sup>.

Los resultados son los siguientes:

Ensayo de compresión triaxial no consolidado no drenado “UU” (envolvente de falla vs. esfuerzo desviador):

$$C = 1.10 \text{ kg/cm}^2 \quad \phi = 0^\circ$$

Ensayo de compresión triaxial consolidado no drenado “CU” (envolvente de falla vs. esfuerzo desviador) :

$$C' = 0.84 \text{ kg/cm}^2 \quad \phi' = 22^\circ$$

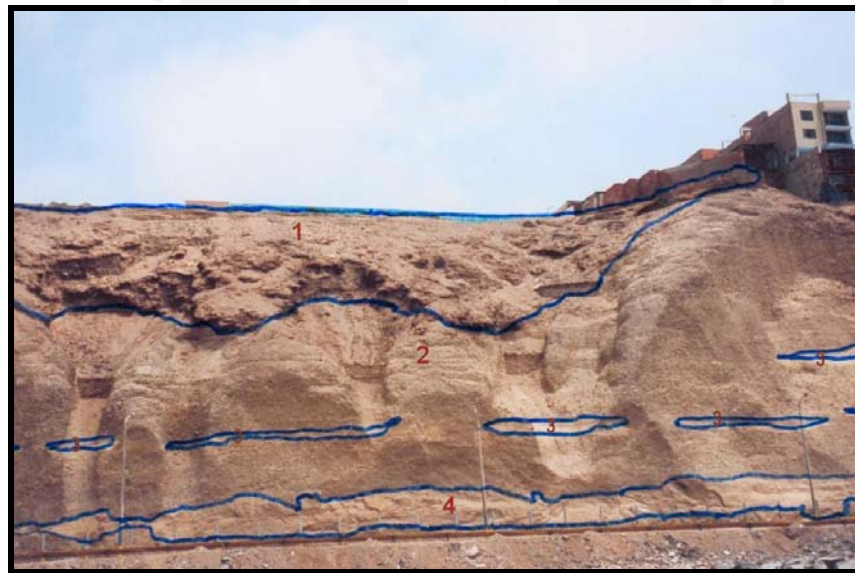
Siendo la densidad inicial del material ensayado 1.53 ton/m<sup>3</sup>. Mayores detalles del ensayo se pueden ver en el anexo informático de la presente tesis.



**Foto 4.02** Progresiva P 0+050. **Foto 4.03** Extracción del bloque muestra inalterada.

#### 4.3 Descripción geotécnica:

##### 4.3.1 Progresivas del P + 000 al P + 100:



**Foto 4.04** Vista Panorámica del las progresivas P +000 a P + 100.

El talud en este tramo presenta una altura de 40 m a 46 m con un ángulo predominante máximo de  $65^\circ$ .

Esta constituido en su mayoría por una grava mal gradada (con zonas ligeramente arcillosa y limosa). Idealizando el talud, mediante el esquema de la **Foto 4.04** se tiene la siguiente descripción:

**1:** Es un relleno ubicado en la parte superior del talud que tiene una inclinación de  $30^\circ$  a  $60^\circ$  y un descanso que se inicia a la altura de la terraza de madera del hotel que se

ve a la derecha. Tiene un color plomo oscuro, probablemente debido a descomposición. El terreno de la zona aledaña al relleno, superior ha sufrido asentamientos (Inst. Nac. De Defensa Civil (1997-2002)), se puede ver la evolución en el tiempo de este relleno en el anexo informático, dentro de la carpeta correspondiente al análisis del corrimiento del talud.

**2:** Como se mencionó, el suelo predominante es una grava mal gradada (GP) teniéndose en zonas localizadas una grava mal gradada ligeramente arcillosa (GP-GC). Los cantos rodados en la parte superior están a punto de caer, además la acción erosiva del viento genera una erosión en forma de media caña. Se pueden apreciar pircas al tope de su capacidad.

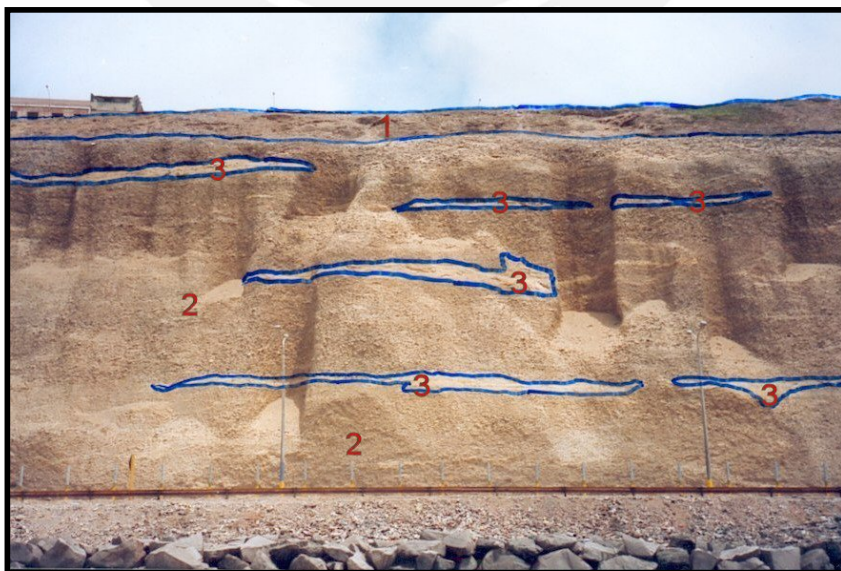
Descripción de muestra tomada en el pie del talud en P 0+000: Bolonería de 10 cm en 15%, grava gruesa redondeada, tamaño máximo 25 cm; arcilla inorgánica, plasticidad baja, dura, húmeda a seca, marrón rojizo (GP).

**3:** Los lentes superiores de material fino son más delgados que el lente al pie del talud. Conforme se va descendiendo a lo largo del talud, se ve que los materiales finos se intercalan mas con la grava. Se tomo una muestra en el P + 400 a una altura de 6m. que luce igual que estos lentes erráticos resultando una arcilla limosa (CL).

**4:** Los lentes en la zona inferior de esta zona están constituidos por una arcilla limosa, de plasticidad baja, dura, seca a húmeda, color marrón amarillento (CL-ML). Se nota un pequeño cambio de color mas amarillento y se tomaron muestras antes y después del cambio (P + 000), encontrándose limos (ML) y arcillas limosas (CL-ML). En menor proporción y potencia se pueden apreciar lentes de arena (SP) de menos de un metro intercalados en la grava y los finos de la zona inferior.

Existen, de manera aislada, zonas en las que el fino del suelo ha sido reemplazado por cristales blancos los cuales tienen una fuerte reacción al HCL .

#### **4.3.2 Progresivas del P 0 +100 al P + 500:**



**Foto 4.05** Vista panorámica de progresivas P + 100 a P + 250.



**Foto 4.06** Vista panorámica de progresivas P + 250 a P + 500.

El talud tiene una altura promedio de 45 m, con un ángulo predominante de 70°, teniéndose en general 3 pendientes a lo largo de cada tercio de altura, donde la base es más empinada y se va inclinando mientras. Al igual que en el tramo P 0 + 000 al P 100 anterior se tiene que:

**1:** Relleno en la parte superior pero de menores dimensiones que en el tramo inicial. Se observan enredaderas.

**2:** Consiste de una grava mal gradada (GP), muy parecida al tramo anterior. Descripción: Grava gruesa, redondeada, con bolonería de 10 cm, húmeda, marrón amarillento (GC). En el tercio medio de la altura del talud se tiene zonas en la que la grava es más arcillosa.

**3:** Se aprecian lentes de material fino, color marrón por zonas amarillento (CL o CL-ML). Se observan lentes no continuos de arcilla en la base. Se puede rescatar de la bibliografía, (Cañari (2001)), que entre las progresivas P 0+350 y P 0+400, se ejecutaron 2 calicatas al pie del talud, encontrando un primer estrato de arcilla (CL) hasta 1.60 m de profundidad y 22.50 % de humedad, continuando con el conglomerado de Lima, constituida por grava mal gradada (GP).

En 3 trincheras ejecutadas, que figuran en la misma referencia y entre las mismas progresivas, se encontró grava mal gradada (GP) y grava mal gradada en matriz limosa (GP-GM) hasta una profundidad de 0.40 m, manteniéndose homogéneo este suelo en todo lo largo de las trincheras y con una humedad promedio de 1.9 %.



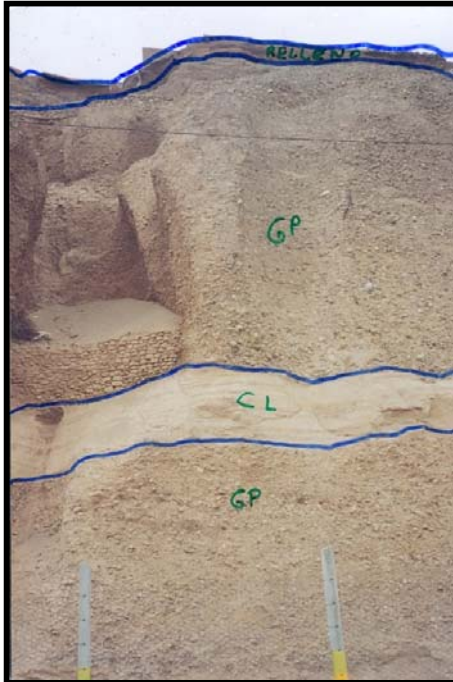


Foto 4.07 Progresiva P + 400.

**4.3.2.1 Progresiva P 0+400:** El talud tiene una altura de 55 m., con un ángulo predominante de 65°. En el tercio superior del talud se ven cantos rodados de T.M. 25 cm aprox. mientras que en la base del talud se aprecian bolones de 3" y 4". Se observa un pequeño bloque a punto de caer pues tiene grietas a su alrededor de aproximadamente 1 m. Se tomó una muestra del lente de finos ubicado a 6 m de altura resultando una arcilla de plasticidad media, compacta, húmeda a seca, marrón claro (CL).

**4.3.2.2 Progresiva P 0+450:** El talud tiene una altura de 54 m, con un ángulo predominante de 65°. En esta zona se indujeron derrumbes mediante inundación. Se aprecian 2 lentes de arcilla en la mitad inferior de talud, consistentes de la misma arcilla observada en la progresiva P 0+400. Se tomó una muestra de grava mal gradada (GP) al pie del talud. El tercio medio del talud esta constituido por una grava arcillosa (GP-GC). El relleno en la corona consiste de material de préstamo sin mucha acumulación de basura.

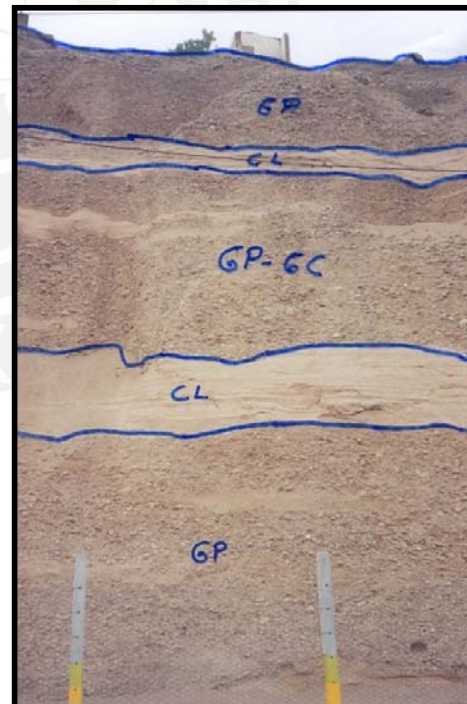


Foto 4.08 Progresiva P + 450.

## CAPITULO 5

### 5.0 Análisis de estabilidad de taludes:

#### 5.1 Introducción:

Los parámetros del suelo más importantes para la evaluación de un análisis de estabilidad de taludes son el peso unitario, el ángulo de fricción interna y la cohesión de cada uno de los materiales integrantes del talud. Para el caso específico de la Costa Verde, existen diversos rangos de valores que se plantean como propios del “conglomerado de Lima” que es el principal tipo de suelo en el tramo de estudio.

En la **Tabla 5.01** se ven combinaciones de valores del ángulo de fricción y la cohesión planteadas en la bibliografía sugeridas para la Costa Verde y la **Tabla 5.02** se muestra como antecedente, análisis de estabilidad de taludes hechos en el tramo seleccionado. Sin embargo, al modelar un talud con la topografía real de la Costa Verde y algunos de los valores propuestos, nos topamos con la incongruencia que, para determinadas secciones, el factor de seguridad (F.S) es menor que uno (es decir que las fuerzas de resistencia al corte disponible son menores que las fuerzas de equilibrio de esfuerzos de corte) a pesar de no presentarse en la realidad aún la falla del talud y de no encontrarse signos visibles de un inminente colapso .

Debido a esta particularidad, es que en el presente capítulo se plantea, además del análisis de estabilidad de taludes, un “back análisis”, en el que se realiza una evaluación de influencia de la variación de los parámetros de resistencia en el factor de seguridad, para así obtener juegos confiables de parámetros de resistencia del conglomerado basados en la situación actual del talud.

El análisis de la estabilidad de taludes se realizó mediante el uso del programa Slope/W v. 5.11 considerándose una superficie de falla tipo circular y usando el método de Spencer.

#### 5.2 Parámetros para el análisis de estabilidad de taludes:

Para la realización del análisis de estabilidad de taludes de la zona seleccionada, se definieron los siguientes parámetros:

**5.2.1 Geometría del modelo:** Los perfiles fueron modelados con la topografía obtenida de la zona.

**5.2.2 Estratos en el modelo:** Se consideraron 3 tipos de materiales que se distribuyen a lo largo del talud a manera de estratos:

*Material granular:* Correspondiente al conglomerado de Lima (grava arenosa mal gradada ligeramente arcillosa GP-GC).

*Material cohesivo:* conformado en su mayoría por lentes de arcilla limosa y arcillas de baja plasticidad. Los espesores varían de 1 a 4 m.

*Relleno:* Constituido principalmente por material de préstamo para rellenar antiguas cárcavas y ganar terreno en la parte superior del talud. En la parte inferior, se considera un relleno de 2 m. de espesor que corresponde a la base del pavimento de la pista que corre al pie del talud.

Ubicación	Tipo de Estudio	Parámetros				Referencias
		Z (m)	C Kg/cm <sup>2</sup>	φ (°)	γ (TN/m <sup>3</sup> )	
Hospital del Empleado Banco de Vivienda Av. Emancipación Ministerio de Educación Av. Abancay Beneficiencia Pública de Lima	Cimentación Zapatos cuadradas de Lima Metropolitana	8	0.4	36	-	FIC- UNI Humala (1982) Cimiento Rectangular Z= DF = 2.00 m. B= 3.00 m  q <sub>ad</sub> = 8.5 Kg./cm <sup>2</sup> (Beneficiencia) q <sub>ad</sub> = 8.0 kg/cm <sup>2</sup> (Banco de la Vivienda)
		10	0.4	40	-	
		6	0.4	36	-	
		9	0.6	37	2.2	
Barranco	Estabilidad de Taludes	-	0.0	35	2.0	Martínez (1981) Estudio Geotécnico Alva (1981) Aplicación a Estabilidad
		-	0.4	35	2.0	
Costa Verde Acantillados (La Punta-Chorillos)	Estabilidad de Taludes	-	0.6	39	2.2	García (1984) Tesis de Grado FIC -UNI
Suelos de Lima, Mapa de MS y DS	Características del conglomerado de Lima para Cimentaciones	Estudio, análisis de las gravas arenosas, mineralogía petrología, parámetros referenciales de Mecánica y Dinámica de Suelos			A. Martínez (1986) Seminario Comité Peruano de Mecánica de Suelos	
Costa Verde	Revisión	2	0.4	25-40	2.2	A. Martínez V. (1996) Conferencia CISMID 2.5 ≤ q <sub>ad</sub> = 15 kg/cm <sup>2</sup>
	Recopilación de datos sobre estabilidad de taludes en Lima	-	0.4 - 0.5	36 y 42	1.8 - 2.2	Carrillo (1989) Artículos, Revistas Ingeniería Geotécnica FIC-UNI
Costa Verde	Estabilidad de Taludes	2	0.55	28-40	2.4	Cañari (2001) Tesis de Grado UNI-FIC

**Tabla 5.01** Recopilación de parámetros de resistencia cortante de la Costa Verde, tomado de Prácticas de Campo de Maestría 2001, Alberto Martínez.

Estudio	Método Utilizado	Ubicación Perfil equivalencia	F.S		Consideraciones			
			Estático	Pseudo-Estati	Suelos modelo	γ (ton/m <sup>3</sup> )	φ' (°)	c'
Tesis Sosa Oviedo	Sarma	Jr Ulises Delboy equiv P 0+150	1.6	-	Limo arcilloso	1.7	26	6 ton/m <sup>2</sup>
					Conglomerado	2.2	39	6 ton/m <sup>2</sup>
					Relleno	1.4	-	-
Tesis Mariela Cañari	Bishop	P 7	1.38	1.02	Finos	1.7	28.5	0.9 kg/cm <sup>2</sup>
	Jambu	eq. P 0+500	1.34	1.01	Conglomerado	2.1	40	0.55 kg/cm <sup>2</sup>
	Bishop	P 8	1.67	1.28	Relleno	1.8	30	0.05 kg/cm <sup>2</sup>
	Jambu	aprox. P 0+450	1.62	1.30	Programa utilizado PcStabl			
	Bishop	P 9	1.07	0.92				
	Jambu	eq. P 0+450	0.79	0.66				
	Bishop	P 10	1.18	0.94				
	Jambu	aprox. P 0+450	1.15	0.94				
	Bishop	P 11	1.54	1.20				
	Jambu	eq. P 0+100	1.52	1.14				
	Bishop	P 12	1.54	1.15				
	Jambu	eq. P 0+050	1.26	0.95				
	Bishop	P 13	1.05	0.82				
Jambu	eq. P 0+000	0.95	0.71					

**Tabla 5.02** Valores del factor de seguridad obtenidos en el tramo en estudios anteriores

**5.2.3 Influencia de la napa freática:** Según el informe “Evaluación del comportamiento de la Napa de los Acuíferos del río Rímac y Chillón” -realizado por el equipo de aguas subterráneas, Gerencia de Producción-Sedapal (2001)- para el pozo más cercano al tramo (No 444 Prolongación Ayacucho, San Miguel a 1.5 km aprox. de la zona) la napa freática se encuentra por debajo de los 45 m. respecto a la superficie. Sumando esto a las evidencias de campo, se concluye que el suelo no está saturado y por lo tanto no se desarrollarán presiones de poros.

#### **5.2.4 Propiedades resistentes y peso unitario de los materiales ubicados sobre la potencial superficie de falla**

Como se ha mencionado con anterioridad, no se han determinado con seguridad los parámetros cohesión ( $c$ ) y ángulo de fricción interna ( $\phi$ ) en el campo y/o laboratorio del suelo característico (salvo el ensayo de corte in situ realizado por Cañari (2001)). Debido a este problema se realizó un análisis previo de los parámetros de resistencia de los suelos, mediante un “back analysis”.

### **5.3 Back analysis:**

El presente “back analysis” consiste en tomar distintos juegos de valores dentro del rango de las propuestas en la bibliografía y reemplazarlos en el modelo del talud más crítico. Se desarrolla tanto para un análisis estático y pseudo-estático, los cuales se detallan a continuación.

#### **5.3.1 Análisis estático:**

Si es que al realizar el análisis de estabilidad con un juego de valores, nos da un F.S. menor a la unidad, el juego no es válido pues esto significaría que el talud ha colapsado a pesar de no haberlo hecho. En el caso que el factor de seguridad sea igual o ligeramente superior a la unidad, se puede concluir que el juego proporciona las suficientes fuerzas resistentes para que el modelo no falle (pero en estado de inminente falla). Es decir, que la combinación de  $c$  y  $\phi$  analizada representa valores mínimos que debe de resistir el conglomerado para que el talud real esté soportando la configuración modelada.

Como primer paso, se eligió la progresiva 0 +300 como la sección del talud en la que se presenta la configuración más desfavorable de los cortes obtenidos (más alto y empinado de los cortes del **Plano 01**), para partiendo de un modelo basado en esta, empezar la iteración de valores correspondientes a los parámetros de resistencia. Cabe resaltar que como la altura de los taludes es prácticamente la misma en el tramo, el factor determinante fue el ángulo de inclinación del relieve del talud.

Seguidamente se establecieron las características de cada material:

Donde el *material grueso*, modelado como conglomerado, corresponde a una grava arenosa mal gradada (GP). Las iteraciones inicialmente abarcaron juegos de valores incluidos en el rango de  $\phi$  de 25 a 42° (incrementos de 2.5°) combinados con valores de  $c$  de 0 a 0.55 kg/cm<sup>2</sup> (incrementos de 0.2 kg/cm<sup>2</sup>). Sin embargo en una iteración preliminar rápida para los análisis estático y pseudo estático, eran pocos los valores que sobrepasan un F.S  $\geq 1$ . Es entonces por esto que se decide ampliar el rango de  $c$  hasta 0.8 kg/cm<sup>2</sup> y el de  $\phi$  hasta 47.5. El peso específico usado en el ensayo es  $\gamma = 2.3 \text{ g/cm}^3$ .

Las propiedades del *material fino*, conformado en su mayoría por una arcilla limosa (CL-ML), se toman de los resultados del ensayo triaxial (ver anexos) como:

$$\gamma_{\text{inicial}} = 1.53 \text{ g/cm}^3, \quad \Phi = 22^\circ \text{ y } c = 0.84 \text{ kg/cm}^2.$$

Cabe mencionar que el “back analysis” es un análisis determinístico y se basa en las peores condiciones en un periodo, de donde surge la interrogante si es que es preferible usar la densidad inicial de la muestra o la densidad saturada para el modelamiento.

Por un lado, usar un modelo con el valor de la densidad inicial de la arcilla limosa, se parece más a lo que sucede actualmente en campo pero no es una situación tan crítica como la que ha podido soportar el talud al aumentarse la cantidad de agua en los vacíos, pues el peso de la fase agua aumenta el peso del lente y por lo tanto hace que aumente la inestabilidad del talud.

En contraposición, usar una hipótesis en la que la arcilla esta saturada en un análisis de estabilidad (densidad saturada: 1.91 g/cm<sup>3</sup>), implica asumir presiones de poro que no se han dado ya que la saturación hubiera llevado al colapso del material grueso del talud.

Los cálculos que se presentan a continuación han sido obtenidos con los valores iniciales de densidad. En la **Tabla 5.06** se muestra una comparación entre el cálculo de la estabilidad de taludes usando ambas densidades, luego de haberse obtenido el verdadero talud más crítico.

El *relleno* se introduce asumiendo los siguiente valores constantes:  $\gamma = 1.83 \text{ g/cm}^3$ ,  $\phi = 25^\circ$  y  $c = 0 \text{ kg/cm}^2$ . En la **Tabla 5.02** se pueden ver los valores sugeridos de la bibliografía para la estabilidad de taludes, sin embargo, para el presente análisis se elimina la cohesión del relleno y se toman valores más desfavorables pues los rellenos han ido variando a lo largo del tiempo y pudo haberse presentado una situación más complicada que la actual.

### **5.3.2 Análisis pseudo estático:**

En el caso del análisis sísmico, se ha hecho un seguimiento a la zona mediante fotografías aéreas, bibliografía y artículos periodísticos (ver anexo informático y Zúñiga (2004)) y en especial al perfil P 0+300 (y luego al P 0+500) para ver si ha sucedido alguna falla catastrófica (en la que se hayan vencido las fuerzas resistentes y se haya desplazado una gran cantidad de material) no encontrándose evidencia de este hecho desde 1944 hasta la actualidad. Además en un seguimiento mediante artículos periodísticos e informes del INDECI a lo largo de los años, se ha podido ver que se hablan de derrumbes, desprendimientos de piedras y socavación del talud causada por el mar pero no un caso de falla catastrófica.

Para realizar un análisis por sismo pseudo-estático del talud, el principal valor a encontrar para introducir la carga sísmica son las aceleraciones máximas causadas por un sismo en el conglomerado de Lima. Se asume que el perfil 0+300 no ha fallado por sismo, de donde se puede inferir que ha resistido la máxima aceleración presentada en el periodo mencionado. La geometría del talud ha variado a lo largo del tiempo, pero se asume que es prácticamente la misma para efectos de este análisis. Esto significa que si le aplicamos la máxima aceleración soportada por el talud al modelo del perfil e iteramos con los valores propuestos, llegaríamos a que todos los juegos que nos dan como resultado un F.S. igual a la unidad representan

combinaciones que le han dado al talud las suficientes fuerzas resistentes para no colapsar y por lo tanto corresponden a los mínimos válidos que en este planteamiento corresponderían al conglomerado de Lima.

Debido a la condición de borde que representa un talud durante un sismo, a la subjetividad en que se basan muchos informes acerca de la “intensidad” de daños ocurridos y a las hipótesis que se plantean para el desarrollo de un análisis pseudo estático, se selecciona el sismo ocurrido el año 1966, sobre otros sismos de gran envergadura como los de 1970 y 1974, pues este presenta la máxima “aceleración máxima” registrada en el conglomerado de Lima, que es aprox. igual a 0.275 g.

Datos del registro:

**LIMA, PERU, INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ, 10/17/66, COMP N08E 3282 POINTS OF A(T) IN CM/SEC/SEC/1000 AT .02 SEC INTERVAL PEAK VALUES0 ACCEL=-269.3 CM/SEC/SEC, VELOCITY=-21.6 CM/SEC, DISPL= -16.6 CM.**

El efecto de los sismos se introduce como coeficientes horizontales y verticales, que generan una carga que es una fracción del peso de cada rebanada analizada. En este caso, se tomó como coeficiente sísmico horizontal un valor igual al 100% de la aceleración máxima registrada, 0.275 g. y un 60% de la aceleración máxima registrada para el coeficiente vertical, 0.165 g.

**5.3.3 Resultados:**

**Back analysis en el corte de talud correspondiente a la progresiva P 0+300**

Propiedades del material (algunos juegos de valores):

$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\Phi^\circ$	C (kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	C(Mpa)
2.3	35	0.2	22.6	19.62
2.3	37.5	0.4	22.6	39.24
2.3	40	0.6	22.6	58.80
2.3	42.5	0.8	22.6	78.48

Factores de Seguridad para el Análisis Estático						
C (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Phi^\circ$					
	35.0	37.5	40.0	42.5	45.0	47.5
0						
0.2	0.648	0.689	0.734	0.779	0.829	0.883
0.4	0.809	0.854	0.903	1.003	1.033	1.091
0.6	0.967	1.002	1.063	1.178	1.231	1.298
0.8	1.171	1.269	1.328	1.376	1.432	1.486

Factores de Seguridad para el Análisis Sísmico						
$a_{max}$ :	269.3 cm/s <sup>2</sup>			AH:	0.275 g	
				AV:	0.165 g	
C (kg/cm <sup>2</sup> )	$\Phi^\circ$					
	35.0	37.5	40.0	42.5	45.0	47.5
0.2	0.416	0.444	0.478	0.481	0.521	0.563
0.4	0.567	0.592	0.623	0.675	0.682	0.714
0.6	0.676	0.787	0.898	0.943	0.962	1.038
0.8	0.874	0.92	1.007	1.02	1.162	1.213

**Tabla 5.03:** Factores de seguridad obtenidos del análisis estático y sísmico para distintos valores de cohesión C y ángulo de fricción interna  $\Phi^\circ$

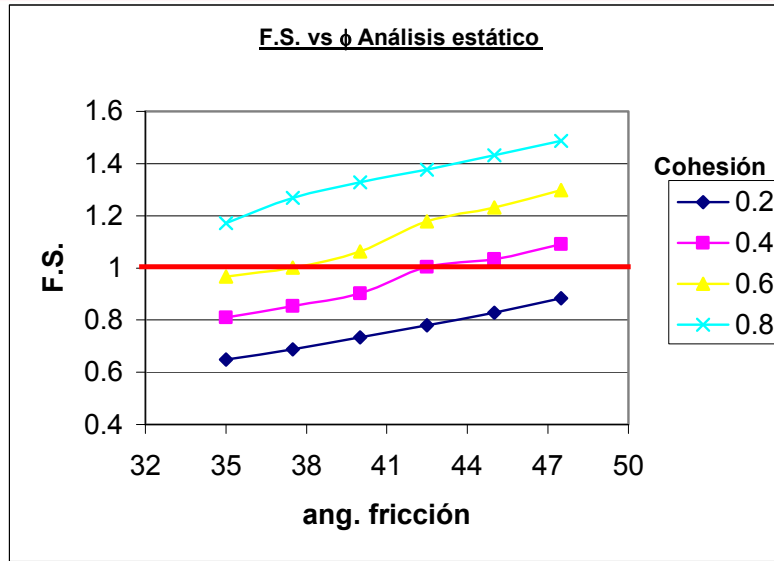


Gráfico 5.01 Resultados del análisis estático

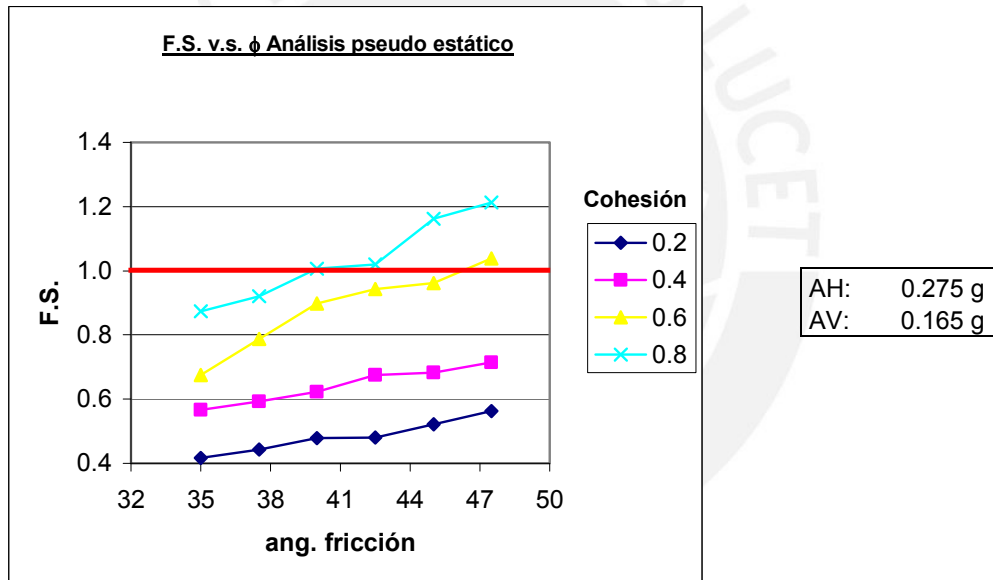


Gráfico 5.02 Resultados del análisis sísmico. Se observa que son pocos los valores dentro del rango que superan un F.S.=1.

**5.3.4 Conclusiones y observaciones para el back analysis:**

Se puede observar que para el análisis estático, si se mantiene la cohesión constante y se varia el ángulo de fricción en todo el rango, la variación total del F.S. es en promedio de 0.30. Mientras que si se mantiene el ángulo de fricción constante y se varia en todo el rango la cohesión, el resultado de la variación total es de casi 0.60.

En el análisis estático se puede ver que por lo menos 2 de los juegos, que están dentro del rango de valores propuesto por la bibliografía, tienen un  $F.S \geq 1$  mientras que para el análisis pseudo-estático ninguno de los valores propuestos supera la unidad.

De todas las iteraciones, el juego de valores que menos se aleja de lo planteado por la bibliografía y cumple con la condición de tener el menor F.S mayor a la unidad es:

**Ángulo de fricción interna  $\phi = 40^\circ$   
Cohesión  $C = 0.80 \text{ kg/cm}^2$  (78.48 Mpa)**

Se realizó una comprobación rápida aplicando estos valores a todo el tramo, obteniéndose F.S. mayores o iguales a 1.

El valor de los parámetros de resistencia al corte obtenido es alto y queda fuera del rango propuesto por los antecedentes, de donde cabe mencionar:

- El juego de valores más parecido a los resultados es el valor de campo de Cañari (2001). Era de esperarse que se pareciera más a este valor pues, como se mencionó anteriormente, se realizó en la Costa Verde y es un valor de campo. No obstante, el ensayo de corte directo in situ fue realizado a poca profundidad, casi en la superficie del talud; mientras que el presente análisis representa a los parámetros resistentes que se requieren el suelo a lo largo del plano de falla.
- El material que da las fuerzas resistentes al talud, el que está a lo largo del plano de falla, está más confinado (con respecto a los ensayos realizados) pues está a mayor profundidad, soporta una columna grande de suelo sobre si además de estar rodeado de material por todos lados, lo que lo puede hacer más resistente.
- En el material a lo largo del plano de falla el efecto del intemperismo y la acción del hombre es menor que en la superficie del talud.
- Los resultados obtenidos son mínimos valores reales que debería de haber tenido el suelo en la zona asumiendo que ha soportado la más alta aceleración máxima encontrado para el conglomerado de Lima en un perfil que es el más desfavorable del tramo. Estas restricciones exigen de por si una resistencia alta del suelo.
- Podría darse el caso que la cohesión aparente proporcionada por los carbonatos de calcio en la grava sea mayor mientras más alejado este el suelo de la superficie del talud.

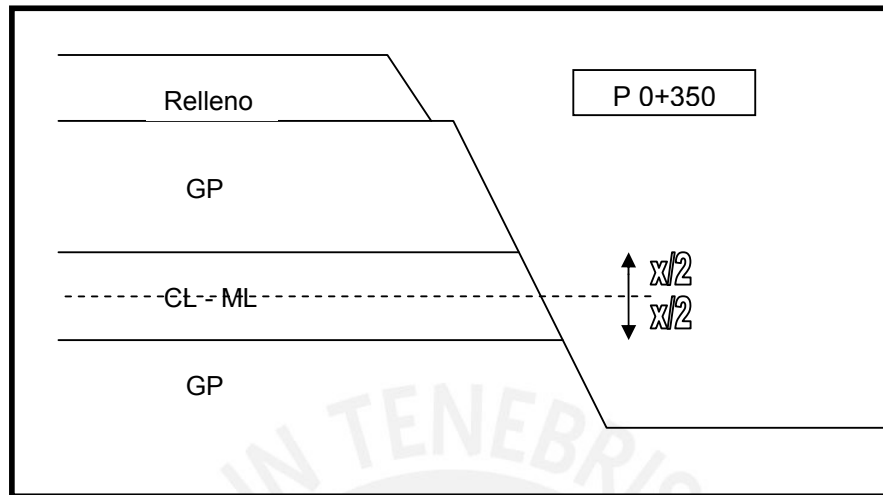
#### **5.4 Influencia de los lentes de material fino en la estabilidad de taludes:**

Dentro de los estudios de estabilidad de taludes realizados en la Costa Verde, existe la tendencia de eliminar los lentes que tienen un ancho menor al 5% y 10% de la altura total del talud (aplicado por García (1984), Cañari (2001)). Tomando una diferencia de alturas entre el pie y la parte superior del talud de 50 m, se estarían omitiendo los lentes menores que 2.5 m. Usando este criterio, se estaría eliminando muchos lentes que en las inspecciones de campo parecen influir en la estabilidad global del talud .

Se consideró que un lente era significativo para ser modelado, durante el levantamiento, si es que: se prolongaban marcadamente dentro del tramo sin perderse rápidamente y mostraran un cambio significativo en el material.



De todos los lentes, los más pequeños que se reconocieron como significativos y destacables en campo, tenían un ancho de 1.14 m y 1.41 m, son los pertenecientes a las progresivas P 0+250 y proximidades del perfil P 0+300.



**Gráfico 5.03** Esquema de la sección típica utilizado para la variación del ancho del lente de arcilla limosa.

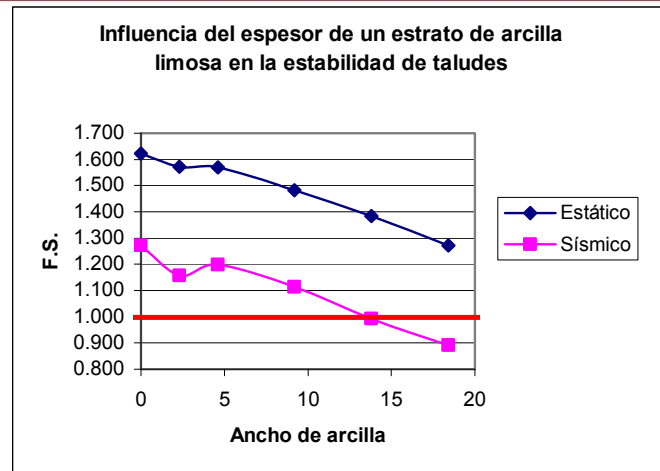
Para esclarecer este punto, se realizó un análisis de la influencia de un estrato de arcilla limosa en la estabilidad del talud. Este tipo de análisis nos permite también establecer el peligro que representan la presencia de finos, en los acantilados en el distrito de Magdalena.

El análisis consiste en introducir a un talud completamente conformado de conglomerado (P 0+350) un estrato de material fino de espesor igual a la mitad, doble, cuádruple y ocho veces el 10% de la altura total del perfil (4.6 m) evaluando en cada uno de los casos la estabilidad del talud (ver **Gráfico 5.03**). Al igual que en el back analysis se hacen un análisis estático y un análisis pseudo estático (considerando la misma aceleración).

**5.4.1 Cálculos y resultados:**

$a_{max}$ :	0.275 g
AH:	0.275 g
AV:	0.165 g

Espesores (X)		Factor de Seguridad	
Proporción	Espesor (m)	Estático	Sísmico
Cero	0	1.622	1.27
Mitad	2.3	1.571	1.157
Simple	4.6	1.570	1.199
Doble	9.2	1.482	1.113
Cuádruple	13.8	1.384	0.993
Ocho veces	18.4	1.271	0.891



**Tabla 5.04 y Gráfico 5.04:** Influencia del espesor de un estrato de material en el Factor de Seguridad.

#### **5.4.2 Conclusiones:**

Como se puede ver de los resultados, a más espesor del estrato de material fino en el talud, el factor de seguridad se va haciendo menor. En el caso sísmico, la inclusión del estrato de arcilla llevaría la falla del talud.

Calculando una línea de tendencias de los resultados de la gráfica F.S. vs. Ancho de la arcilla se obtienen las ecuaciones siguientes:

Para el análisis estático:  $F.S. = -0.0187x + 1.6336$ ; y el valor de  $R^2 = 0.9793$ .

Para el análisis sísmico:  $F.S. = -0.0191x + 1.2581$ ; y el valor de  $R^2 = 0.9441$ .

De donde se puede ver que para cada metro de material arcilloso disminuye en aproximadamente 0.019 el factor de seguridad del talud.

Es entonces que para un hipotético estrato de espesor igual al 10% de la altura total del talud (4.6 m.), el efecto que este causaría en el factor de seguridad, sería una reducción de 0.11 para el análisis estático y 0.09 para el análisis sísmico, es decir se disminuye el valor del factor de seguridad en un 8%. Se observa que la influencia del estrato de material fino está dentro del orden de las décimas y que podría ser despreciado para este perfil y análisis. No obstante se incluyen los estratos de fino en los distintos modelos debido a que influyen negativamente y a que los resultados de influencia de la arcilla en los taludes varían según la geometría, altura y número de estratos de arcilla modelados. Se recomienda, para próximos estudios, realizar análisis similares para tener un mayor espectro de resultados y así poder llegar a conclusiones generales para la Costa Verde.

#### **5.5 Análisis de la influencia del movimiento de tierras en el factor de seguridad**

Para evaluar la efectividad de los movimientos de tierra como una solución total o parcial al problema de estabilización, el presente análisis consiste en evaluar la influencia de cortes en el talud y su repercusión en el F.S.

El perfil elegido para este análisis fue el P 0+300 pues la geometría del talud es la más complicada para un movimiento de tierras y es la sección del tramo en la que se presenta la configuración más alta y empinada. Se plantea un corte siguiendo una recta a través del pie del talud por una que va modificando el perfil según la inclinación correspondiente.

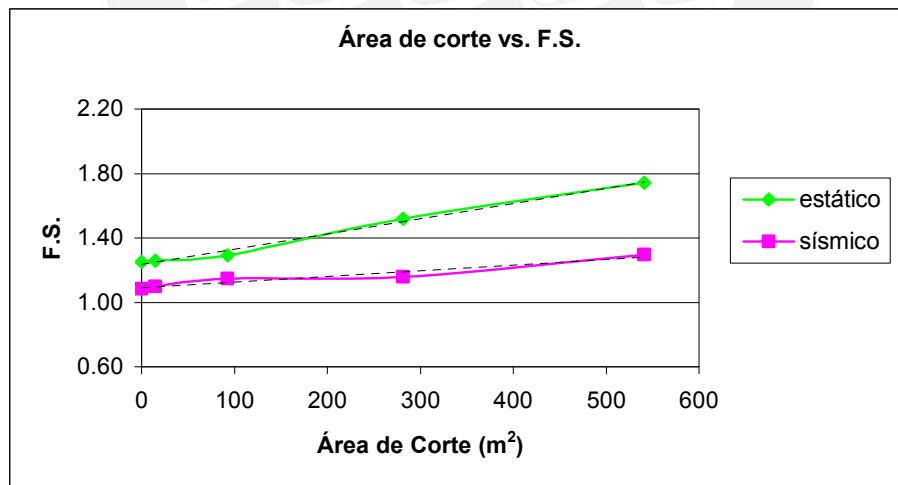
Se tomaron 5 inclinaciones (incluyendo la configuración inicial del talud) y se usó las propiedades del conglomerado obtenidos del back analysis.

Al igual que en los casos anteriores, se realizaron un análisis estático y otro pseudo-estático. Para evaluar al corte como solución, según la recomendación del informe de Hidroenergía Consultores (1997), se puede tomar un  $\alpha = 0.20$  y  $0.25$ , optando por el primero.

**5.5.1 Resultados:**

Inclinación Perfilado V:H	Área de Corte (m <sup>2</sup> )	Factor de Seguridad	
		Análisis Estático	Análisis Sísmico
3-1	15.08	1.433	1.233
2-1	92.33	1.501	1.334
4-3	281.55	1.734	1.333
1-1	541.04	1.997	1.486

**Tabla** Resultados obtenidos del análisis de la influencia del movimiento de tierras.



**Gráfico 5.05** Influencia del movimiento de tierras en el factor de seguridad.

### **5.5.2 Conclusiones de la influencia del movimiento de tierras en el factor de seguridad:**

Como era de esperarse, se puede ver de las gráficas que a mayor corte en el talud, el factor de seguridad aumenta.

Calculando una línea de tendencias de los resultados de la gráfica F.S. vs. Área de corte, se tiene que:

Para el análisis estático: F.S. =  $0.0011x + 1.4129$ ; y el valor de  $R^2 = 0.9979$ .  
Para el análisis sísmico: F.S. =  $0.0004x + 1.2493$ ; y el valor de  $R^2 = 0.8806$ .

De donde se puede ver que para cada  $100 \text{ m}^2$  de corte, el factor de seguridad aumenta 0.11 para el caso estático y 0.04 para el sísmico.

Es decir, si se quisiera lograr los mínimos factores requeridos para el diseño de taludes 1.5 (Estático) y 1.25 (sísmico) según el ASCE (2002), se tendría que cortar por lo menos un área de aproximadamente  $500 \text{ m}^2$ . Debido a la poca influencia del corte en el mejoramiento de la estabilidad de taludes es recomendable usar otros tipos de sistema de estabilización o usar el corte como medida complementaria.



## **5.6 Análisis de la caída de cantos rodados:**

La caída de un bloque (cantos y/o boleos) a lo largo de un talud puede ser simulada mediante programas de cómputo, con el propósito de proveer un análisis estadístico de los probables eventos de caída de rocas y grava en un sitio específico.

Para el modelamiento de la caída de un bloque, son necesarios parámetros que dependen del mismo, tales como: densidad, diámetro, forma y velocidad inicial de caída, además parámetros que dependen del talud, tales como: su geometría, tipos de suelo, la rugosidad del suelo (que depende también de la geometría), el coeficiente tangencial de fricción y el coeficiente normal de restitución.

Las simulaciones informáticas permiten obtener la energía de impacto, el rebote máximo y promedio en un punto determinado, parámetros que sirven para el diseño de soluciones pasivas a la caída de bloques en un talud.

### **5.6.1 Modelamiento de caída de cantos rodados:**

Se utilizó el Programa de Simulación de Caída de Rocas (CRSP), el cual mediante una simulación de movimientos de deslizamiento, caída libre, rebote y rodadura determina las trayectorias de los cantos rodados mediante un modelo matemático que sigue el comportamiento de los cantos, obteniendo variables como la longitud máxima del recorrido, la energía, la velocidad, la altura máxima y el promedio de rebote que alcanzan los cantos durante la caída, los cuales se podrán aplicar en la selección de la ubicación y dimensiones de pantallas de protección.

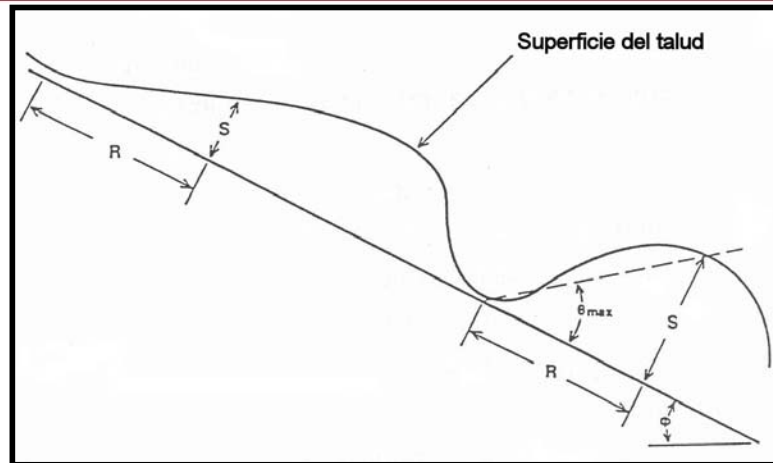
El modelo toma en cuenta la forma de la superficie de contacto, el ángulo de rotación en el punto de contacto, la rugosidad de la superficie del talud, los coeficientes normal y tangencial.

### **5.6.2 Datos para el modelamiento:**

**5.6.2.1 Perfil de Contacto:** El modelo requiere de tramos donde se consideran pendientes promedios. Los perfiles para el análisis de la caída de cantos rodados usados en el modelo son similares a los que se tomaron para la evaluación de la estabilidad de taludes. En algunos casos se varió estos debido a que la trayectoria de la caída no coincidía con el perfil.

**5.6.2.2 Velocidad Inicial de Caída de los Bloques:** El rango de valores sugerido por el manual del CRSP (1991) es de 0.30 m/s a 0.91 m/s (1 a 3 f/s).

**5.6.2.3 Rugosidad de la Superficie:** La rugosidad de la superficie es una estimación de cuanto puede variar el talud, dentro de una longitud paralela a la pendiente, igual al radio del bloque que cae. La evaluación de este valor se puede hacer de forma visual, cuando se tiene experiencia en la recolección de datos; el investigador principiante puede hacerlo con una cuerda extendida pendiente abajo, midiendo la distancia perpendicular (S) de la pendiente promedio a la cuerda, en una distancia igual al radio del canto con el que se simulará la caída (R).



**Gráfico 5.05** Esquema de la obtención de la rugosidad de la superficie

**5.6.2.4 Forma y dimensiones de los bloques:** La forma asignada a los bloques fue de tipo esférico con un diámetro de 0.20 m.

**5.6.2.5 Coeficiente de Restitución Tangencial,  $C_t$**  :El coeficiente de restitución tangencial determina la magnitud de la componente de velocidad paralela al talud se aminora durante el impacto.

**5.6.2.6 Coeficiente de Restitución Normal,  $C_n$** : El coeficiente de restitución normal es una medida de comparación del cambio (o pérdida) de la velocidad normal a la ladera del bloque antes del impacto, con la velocidad normal después del impacto. Este se determina por la rigidez de la superficie de la ladera. Para mayor detalle del tema se sugiere consultar de la bibliografía ) "Protección contra desprendimiento de rocas-Pantallas Dinámicas"(1996) y el manual del CRSP(2002).

Debido a la falta del rango de valores del coeficiente tangencial de fricción ( $C_t$ ) y del coeficiente normal de restitución ( $C_n$ ), para el modelamiento de la caída de un canto rodado y/o boleó, a lo largo de un talud de conglomerado (suelo gravoso), se realizaron una serie de ensayos in-situ para el ajuste del rango de valores de estos parámetros .

Los resultados han sido comparados con simulaciones mediante el programa Colorado Rockfall Simulation Program Version 2.1 (CRSP) iterando los valores de  $C_t$  y  $C_n$  en rangos de materiales similares sugeridos en estudios anteriores.

Asimismo, se hizo una comparación de los valores de rugosidad ( $R$ ) obtenidos en campo y los que mejor simulaban el comportamiento según el programa.

## **5.6.2 Ensayos y análisis para la selección de coeficientes del conglomerado para la evaluación de caída de boleos y/o cantos rodados en la Costa Verde - Magdalena**

### **5.6.2.1 Ensayos de campo**

Los ensayos se realizaron en la Av. Costanera Miguel Grau ubicada en la Costa Verde, en el distrito de Magdalena, a la altura del acceso hacia la Av. Brasil.

### Materiales Utilizados

4 cascos.  
4 chalecos de seguridad.  
1 wincha de 50 m.  
1 wincha de 5 m.  
1 cámara fotográfica digital.  
1 cámara filmadora digital.  
1 Balanza.  
2 Banderas.  
1 Eclímetro.  
1 Soga de 20 m y yeso.  
6 conos y 2 carteles de seguridad .  
2 miras topográficas (reglas).  
1 cronómetro.  
3 radios.

#### **5.6.2.2 Procedimiento:**

Para el ensayo se seleccionó un talud idóneo, que permitiera el acceso a la corona, sin significar un riesgo para los vehículos que transitan por la zona, y para los que realizaran el ensayo. El talud seleccionado se encuentra en la zona cerrada de la Av. Costanera Miguel Grau, en el corredor de la Costa Verde, correspondiente al distrito de Magdalena.

Luego de seleccionado el sitio, se procedió a la demarcación de la zona de impacto de los cantos. Esta fue dibujada al pie del talud, trazando con yeso rectas paralelas distanciadas cada 3 m, para que con la ayuda de estas referencias poder ubicar la posición final de los cantos.

Se ubicaron dos miras topográficas, uno al pie del talud y otro a una distancia horizontal de 4,5 m del pie (en la superficie del talud), para poder obtener la velocidad de caída y la altura de rebote, respectivamente.

Se recolectaron 50 boleos y/o cantos de diámetro entre 0.12 y 0.27 m (obtenido del promedio de las dos más grandes dimensiones) y de peso entre 1.0 y 21.0 kg, para lanzarlos luego desde la corona del talud. Con los datos del diámetro y peso se obtuvo una densidad promedio de 2.15 ton/m<sup>3</sup> para los boleos y cantos.

El personal se instaló de la manera siguiente:

- Una persona con una bandera que daba el inicio y el final del recorrido del canto rodado a lo largo del talud.
- Una persona al pie del talud que anotaba el punto en el que se detenía el canto y la distancia de impacto con respecto al pie.
- Dos personas en la corona del talud, una de las cuales pesaba y tomaba las dimensiones de los cantos y llevaba la cuenta de los lanzamientos; y otra que lanzaba los cantos.
- Una persona ubicada en un talud cercano a la zona de ensayo, que pudiera ver de perfil la trayectoria de la caída de los cantos y que tomara la lectura de los rebotes mediante las miras instaladas en el talud.
- Una persona que filmara de manera diagonal el talud de tal manera que pudiera registrar el movimiento transversal y vertical del bloque cayendo a lo largo del talud.

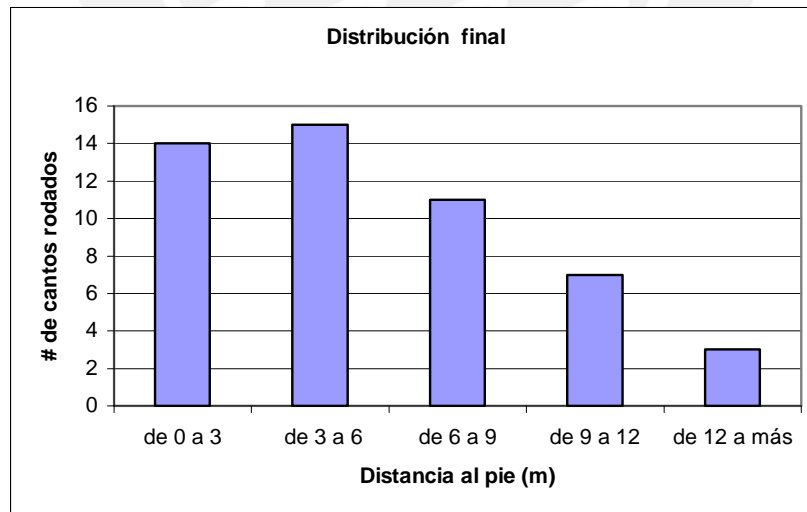


**Foto 5.01** Vista panorámica del lugar de ensayo, en donde se observa la distribución de personal durante el mismo.

### 5.6.2.3 Resultados

Se lanzaron 50 boleos y/o cantos, obteniéndose los siguientes resultados:

Rebote máximo:	4.10 m aprox.
Rebote promedio:	1.10 m.
Rango de velocidad:	7 a 11 m/s.
Distancia máxima de rodado:	16 m.



**Gráfico 5.05** Distribución final de los cantos lanzados en campo.

De donde se puede ver que un 30% de los cantos rodados tienen una posición final entre 3 y 6 m con respecto del pie del talud.



Asimismo, las alturas de rebote a la altura de la mira colocada en el talud se distribuyeron de la siguiente manera:



Foto 5.02 Distribución final de los rodados en la pista

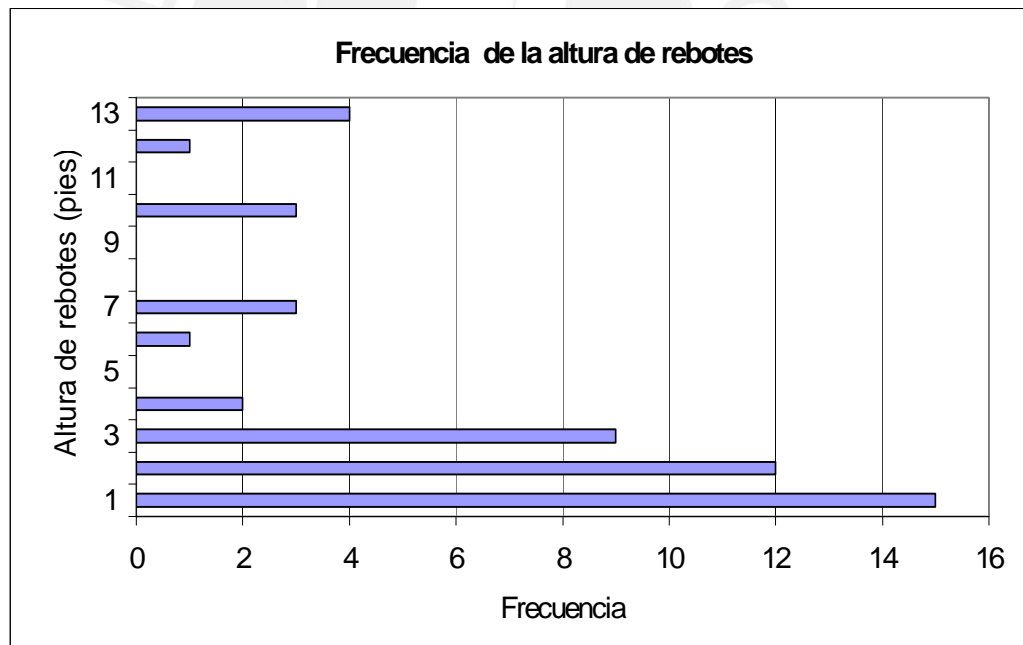


Gráfico 5.06 Alturas de rebotes, agrupadas en rangos de 1 pie, obtenidas de los lanzamientos de campo.

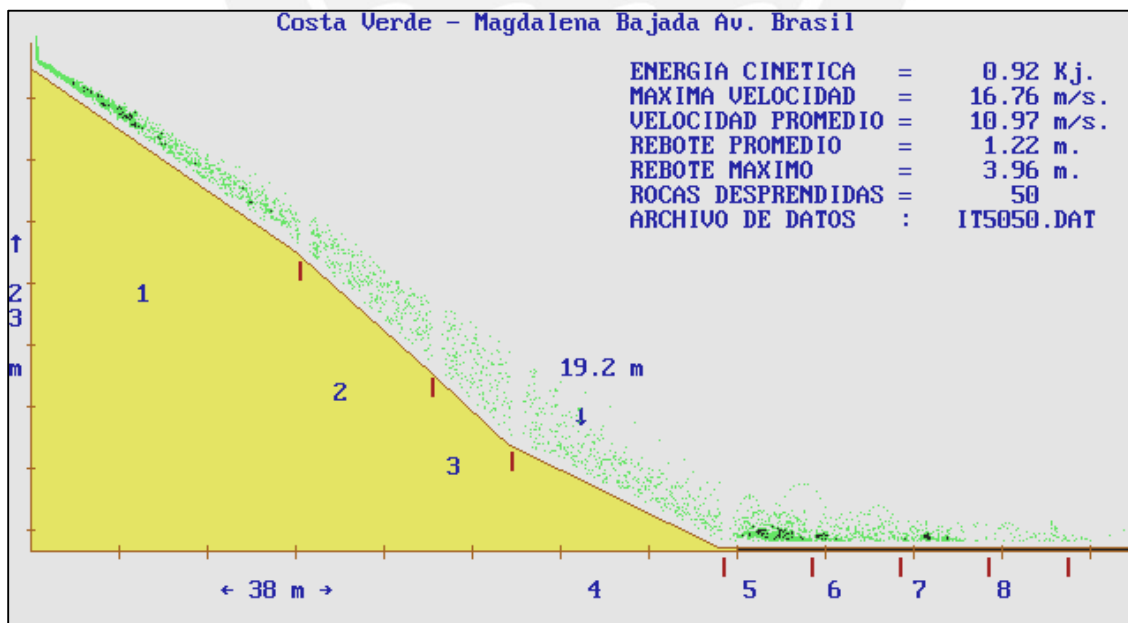
#### 5.6.2.4 Simulación en el CRSP

Los datos que se tomaron para la simulación en el CRSP fueron los siguientes:

- Para simplificación de la geometría del talud, se tomaron 4 tramos en la configuración del perfil del modelo. Asimismo, se modelaron tramos horizontales de 3 m. cada uno, para tener una referencia con respecto a las líneas de referencia marcadas en campo.
- Se tomó un diámetro de 18 cm. y densidad de 2.15 ton/m<sup>3</sup>, obtenidos del promedio de los 50 cantos lanzados.
- Se tomaron 50 200 piedras lanzados por corrida, dependiendo del análisis, en el programa.
- Los valores de R, Cn y Ct se tomaron como conocidos para el material compuesto de caídos al pie del talud, el relleno de la zona superior y el pavimento de la pista.
- La rugosidad inicial se obtuvo de la manera siguiente: se extendió una wincha de 50 m. y se analizó la variación vertical promedio del talud, en función de una distancia igual al diámetro.

**Tabla 5.06** Valores usados en el modelamiento del talud.

	Tipo de suelo	R	Cn	Ct	Referencia
1	Relleno	0.30	0.3	0.8	Manual CRSP (1991) y (2002)
2	Conglomerado	0.10	0.28-0.35	0.78-0.85	Manual CRSP (1991) y (2002)
3	Conglomerado	0.10	0.28-0.35	0.78-0.85	Manual CRSP (1991) y (2002)
4	Caídos y arena suelta	0.35	0.28	0.8	Manual CRSP (1991) y (2002)
5	Pavimento	0.75	0.4	0.9	Azzoni et al (1995), Hoek (1987)
6	Pavimento	0.75	0.4	0.9	Azzoni et al (1995), Hoek (1987)
7	Pavimento	0.75	0.4	0.9	Azzoni et al (1995), Hoek (1987)
8	Pavimento	0.75	0.4	0.9	Azzoni et al (1995), Hoek (1987)
9	Pavimento	0.75	0.4	0.9	Azzoni et al (1995), Hoek (1987)



**Gráfico 5.07:** Modelo del talud para la calibración

### 5.6.2.5 Variaciones de Ct y Cn

**Tabla 5.07** Evaluación de Ct y Cn en el rango propuesto por la bibliografía:

Ct	Cn	Rm (m)	Rp (m)	Vp (m/s)
0.78	0.28	1.83	0.91	10.36
	0.30	1.83	0.91	10.36
	0.33	1.83	0.61	10.67
	0.35	1.83	0.91	10.97
0.8	0.28	1.83	0.91	10.36
	0.30	1.83	0.91	10.36
	0.33	1.83	0.61	10.67
	0.35	1.83	0.91	10.67
0.83	0.28	1.83	0.61	10.06
	0.30	1.83	0.61	10.67
	0.33	1.83	0.91	10.67
	0.35	1.83	0.91	10.67
0.85	0.28	1.83	0.91	10.36
	0.30	1.83	0.91	10.67
	0.33	1.83	0.91	10.67
	0.35	1.83	0.91	10.67

Donde:

Ct : Coeficiente de restitución tangencial.

Cn : Coeficiente de restitución normal.

Rm: Rebote máximo en el punto de análisis

Rp : Rebote promedio en el punto de análisis

Vp : Velocidad promedio en el punto de análisis

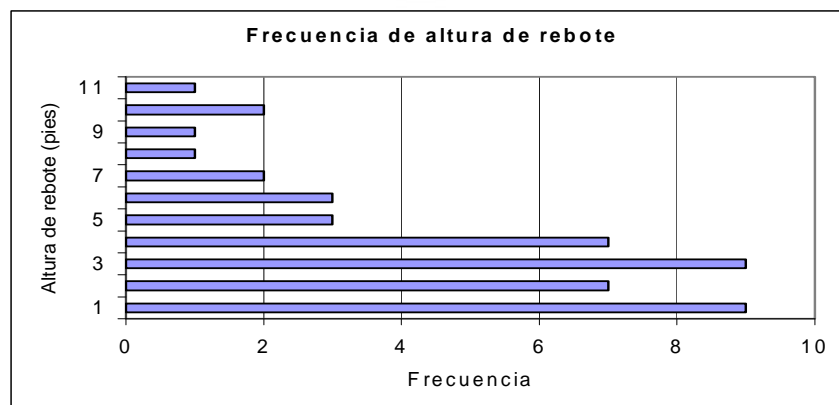
### 5.6.2.7 Variación de la rugosidad

Tomando los valores de Cn= 0.3 y Ct= 0.8, se evaluó la variación de la rugosidad, para todo el rango, con 50 piedras lanzadas y de R: 0.30 a 0.50 con 200 piedras, debido a que es la zona que tiene los resultados más parecidos a los obtenidos en la simulación real de campo:

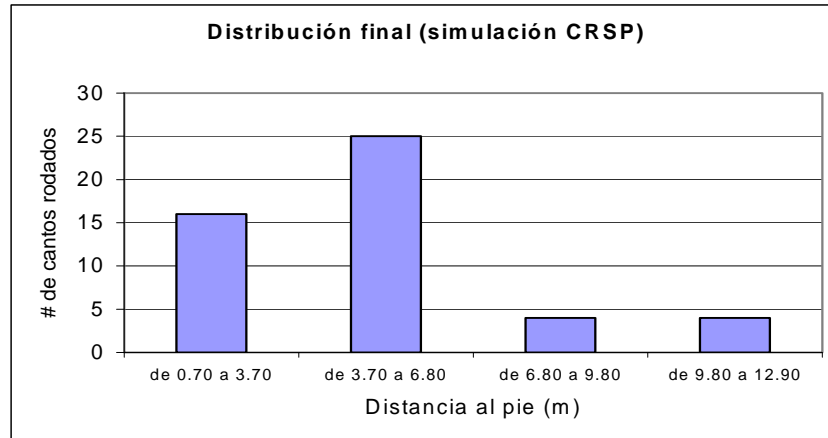
		# = 50				# = 200	
Rugos. 2	Rugos. 3	Rm	Rp	Rugos. 2	Rugos.3	Rm	Rp
0.08	0.06	1.83	0.91	0.30	0.25	3.35	1.22
0.10	0.08	1.83	0.91	0.30	0.30	3.66	1.22
0.10	0.10	1.83	0.91	0.35	0.30	3.35	0.91
0.15	0.10	2.13	0.61	0.35	0.35	3.96	1.22
0.20	0.15	2.74	0.91	0.40	0.35	3.05	0.91
0.20	0.20	2.74	0.91	0.40	0.40	3.96	1.22
0.25	0.20	3.05	0.91	0.45	0.40	3.66	1.22
0.30	0.25	3.35	0.91	0.45	0.45	3.66	1.22
0.30	0.30	3.35	1.22	0.50	0.45	3.66	1.22
0.35	0.30	3.35	0.91	0.50	0.50	4.27	1.22
0.35	0.35	3.35	0.91				
0.40	0.35	3.05	0.91				
0.40	0.40	3.05	0.91				
0.45	0.40	3.05	0.91				
0.45	0.45	3.05	0.91				
0.50	0.45	2.74	0.91				
0.50	0.50	3.96	1.52				

**Tabla 5.08** Variación de los rebotes con respecto al valor de la rugosidad.

La distribución de la posición final de los cantos rodados en los ensayos, es similar a la obtenida en campo, por ejemplo, para rugosidad R: 0.50, Ct: 0.8 y Cn: 0.3, se tiene que:



**Gráfico 5.08:** Frecuencia de Rebotes según simulación



**Gráfico 5.09:** Distribución final de los cantos rodados al pie del talud según simulación

#### **5.6.2.8 Comentarios acerca de los resultados:**

Se puede ver que para la geometría del tramo analizado, la variación de los valores de  $C_n$  y  $C_t$  no afectan considerablemente al rebote máximo, rebote promedio y la velocidad del punto analizado; mientras que la variación de los valores de la rugosidad, en el rango propuesto por la bibliografía, sí influye en el resultado.

La evaluación del programa CRSP da una valoración similar a lo ocurrido en campo en cuanto a la distribución de los recorridos de los cantos con respecto al pie y la frecuencia de los rebotes en el punto de análisis.

#### **5.6.2.9 Observaciones, conclusiones y recomendaciones acerca del ensayo de campo para la obtención de los valores de $C_t$ y $C_n$ .**

Se pudo apreciar, que debido a la geometría del talud y al material que lo constituye, que variaciones significativas en los valores de  $C_t$  y  $C_n$ , en el rango especificado por la literatura, no alteran los valores del rebote en el punto analizado.

Como se sabe, la rugosidad es función de la geometría del talud y se estimó, de las mediciones de campo, un rango de  $R$ : 0.06-0.20. Sin embargo, en las simulaciones, para rebotes promedios y máximos similares a los reales, el programa requiere valores entre 0.25 y 0.50 de rugosidad.

Una variación de 0.30 en el valor de la rugosidad, genera una diferencia máxima en el valor del rebote máximo de 1.22 m y en el rebote promedio de 0.31m. Por lo tanto la altura de rebote máxima y promedio sí son susceptibles a la variación de la rugosidad.

Para la simulación en el programa CRSP y modelando el talud de conglomerado de esta zona de Magdalena, se pueden usar valores de 0.25 a 0.50 de rugosidad, de 0.78 a 0.83 de  $C_t$  y de 0.28 a 0.33 de  $C_n$ . Para efectos de la investigación en la zona del distrito de Magdalena es recomendable usar un valor de 0.50 de rugosidad,  $C_t$  de 0.80 y  $C_n$  de 0.30 pues se ajustan más a los valores de rebotes obtenidos en campo.

Se recomienda hacer el ensayo de lanzamiento de cantos rodados colocando mallas a una distancia de 3 a 5 m del pie del talud, de tal manera que esta intercepte la

trayectoria y se haga fallar esta mediante el impacto de los cantos, registrando la falla mediante 3 filmadoras (frontal, perfil y/o diagonal o superior).

	Tipo de suelo	R	Cn	Ct	Referencia
1	Relleno	0.30	0.30	0.80	Manual CRSP (1991)
2	Conglomerado	0.50	0.30	0.80	Calibrado del Manual CRSP (1991)
3	Caídos y arena suelta	0.35	0.28	0.80	Manual CRSP (1991)
4	Pavimento	0.75	0.4	0.90	Azzoni et al (1995), Hoek (1987)

**Tabla 5.09** Resumen de valores tomados para el modelamiento y evaluación de la caída de piedras en el tramo.

### 5.6.2.10 Evaluación de la caída de cantos rodados :

El principal problema del tramo es la caída de cantos rodados, pues se presenta en toda su longitud y los rebotes llegan sin mucha dificultad a la pista.

Se realizaron simulaciones en los 11 perfiles del tramo, para ubicar la zona con los valores más altos de rebote máximo y promedio. Las alturas de rebote se evaluaron en referencias imaginarias tomadas a 3 m, 6 m y 9 m de distancia horizontal respecto al pie del talud para saber cuanto afectaban a la pista que corre al pie del talud.

Como inicio de la caída de los cantos rodados se tomaron dos puntos: A partir de la corona del talud (debido a que es el punto más alto de caída) y desde la parte inferior del relleno superior, el cual está ubicado entre 4 y 10 m más abajo de la corona (debido a que es el inicio del conglomerado).

El valor de rebote promedio que se obtiene es la diferencia vertical entre el nivel de la pista y el promedio de la altura de los bloques que pasa por allí, mientras que el rebote máximo corresponde a la altura de la envolvente de trayectorias máximas con respecto a la pista. Debido a que los rebotes influyen en el diseño de vallas estáticas, se muestran en la siguiente tabla los resultados de rebote máximo y promedio de todo el tramo.

Progresiva		0.00 m		3.00 m		6.00 m		9.00 m	
		Corona	Relleno	Corona	Relleno	Corona	Relleno	Corona	Relleno
P + 000	R máx.	4.9	5.5	4.6	4.9	2.4	2.4	1.8	2.1
	R pro.	0.9	1.2	0.6	0.6	0.3	0.3	0.3	0.3
P + 050	R máx.	6.7	14	7.3	8.8	5.5	5.8	2.4	6.1
	R pro.	1.8	4.3	2.1	2.4	1.2	1.8	0.6	2.4
P + 100	R máx.	0.0	14.63	0.0	11.3	0.0	7	0.0	6.4
	R pro.	0.0	10.67	0.0	4.3	0.0	2.1	0.0	1.8
P + 150	R máx.	11.0	9.75	4.0	6.7	6.7	7.3	6.1	4.6
	R pro.	4.6	5.49	1.2	1.8	1.2	0.9	1.2	0.6
P + 200	R máx.	11.3	11.58	5.5	8.2	7.0	7.6	4.9	4.6
	R pro.	6.7	6.1	1.8	2.1	1.5	1.5	1.2	0.9
P + 250	R máx.	13.1	11.58	6.1	6.4	10.7	8.8	11.9	7.3
	R pro.	5.8	5.49	1.5	1.5	1.8	1.2	3.4	1.2

P + 300	R máx.	17.7	17.98	12.8	13.1	8.8	8.5	10.7	8.5
	R pro.	9.8	9.45	4.6	3.7	2.4	1.8	1.5	1.5
P + 350	R máx.	11.6	13.11	7.6	8.5	9.4	8.5	11.3	8.2
	R pro.	6.1	5.8	1.8	1.8	1.5	1.2	1.5	0.9
P + 400	R máx.	18.6	19.2	15.5	16.5	11.6	12.8	7.3	8.2
	R pro.	11.6	11.58	5.8	5.8	3.0	3.4	2.1	2.1
P + 450	R máx.	16.2	17.68	12.5	14.3	7.3	10.4	7.0	6.4
	R pro.	11.3	9.75	6.1	4.3	2.7	2.1	1.2	1.8
P + 500	R máx.	14.0	12.8	13.7	11.3	10.7	7	6.7	4.9
	R pro.	6.4	6.1	1.8	3.4	1.2	1.5	1.2	0.9

**Tabla 5.10:** Rebote máximo y rebote promedio para distancias de 0.00,3.00,6.00 y 9.00 m. del pie del talud para caída desde la corona e inicio del relleno

De la evaluación de la caída de cantos rodados a lo largo del tramo, tomando como punto de partida de los proyectiles la parte superior del estrato de conglomerado, se puede ver que:

	Hm	Hp	Vm	Vp	Em	Ep
<b>0+000</b>	5.1	1.5	22.6	15.8	2.7	2.8
<b>0+050</b>	6.7	1.8	23.8	15.5	4.6	3.1
<b>0+100</b>	15.4	11.12	16.7	12.5	7.3	1.7
<b>0+150</b>	11.0	4.6	26.2	15.8	7.3	3.8
<b>0+200</b>	11.3	6.7	26.5	17.7	8.2	3.9
<b>0+250</b>	13.1	5.8	27.1	17.4	7.3	4.1
<b>0+300</b>	18.0	9.8	25.3	15.2	8.5	3.6
<b>0+350</b>	11.6	6.1	25.9	17.7	9.4	3.7
<b>0+400</b>	18.6	11.6	21.9	15.2	7.9	2.7
<b>0+450</b>	16.2	11.3	23.5	17.7	8.2	3.1
<b>0+500</b>	14.0	6.4	26.5	14.6	6.7	3.9
<b>Max</b>	18.6	11.6	27.1	17.7	9.4	4.1
<b>Min</b>	5.1	1.5	16.7	12.5	2.7	1.7
<b>Prom</b>	12.8	7.0	24.2	15.9	7.1	3.3

Donde:

- Hm: Altura máxima de rebote para la sección analizada medida con respecto al pie del talud.
- Hp: Altura promedio de rebote para la sección analizada medida con respecto al pie del talud.
- Vm: Velocidad máxima del proyectil al pasar por el pie del talud.
- Vp: Velocidad promedio del proyectil al pasar por el pie del talud.
- Em: Energía máxima del proyectil al pasar por el pie del talud.
- Ep: Energía promedio del proyectil al pasar por el pie del talud.

### 5.6.2.11 Conclusiones y observaciones de los resultados de los análisis de caídas de cantos rodados:

De los resultados (**Tabla 5.10**) se observa que los valores de rebote máximo y promedio son mayores cuando se asume la caída a partir de la parte inferior del relleno que desde la parte más alta de la corona del talud. Este fenómeno puede deberse a que el relleno de la parte superior tiene una geometría menos empinada y atenúa más el rebote comparado con el conglomerado.

Se ha podido corroborar con lo visto en el campo que: la gran mayoría del tramo presenta caída de proyectiles de impacto directo a la pista, que los cantos que más rebotan son los que inician su caída en el inicio superior del estrato de conglomerado y que la geometría de cada talud influye en el rebote de los cantos que caen a través de él.

La mayor energía de impacto encontrada en el tramo fue la correspondiente al perfil 0+250 con una energía de impacto igual a 4.1 kJ, pues la geometría favorece al aumento de la velocidad a través de la caída.

La zona en la que los cantos rodados rebotan con mayor altitud y recorren más distancia antes de detenerse es en la progresiva 0+400, lo que concuerda con visto en el campo, pues es en esta zona en la que más se acumula material al pie del talud y en la pista.

Como se observa cada talud presenta diferentes intensidades del problema de la caída de cantos rodados, por lo que las soluciones varían según la geometría, altura de rebote y energía de impacto.

Evaluación de valores para la progresiva 0+400.

Ubicación P 0+ 400 Acantilados de la Costa Verde – Magdalena  
Sin Protección, inicio de caída a partir de parte superior  
Observaciones: relleno  
CRSP Archivo de entrada PROG 0+400.DAT

#### CARACTERISTICAS DE LA ROCA

Cantidad	100
Forma	Esférica
Peso	10.89 Kg
Diámetro	0.20 m

#### DATOS PARA LA SIMULACION

Número total de celdas	10	
Punto de análisis de coordenada X	29.26 m.	
Velocidad Inicial en X	0.3 m/s	
Velocidad Inicial en Y	-0.3 m/s	
Zona de inicio	Superior	46.94 m.
coordenada-Y	Inferior	46.02 m.



No de Celda	Coef. Rugos.	Coef. Tang.	Coef. Norm.	Coord. Inicial X	Coord. Inicial Y	Coord. Final X	Coord. Final Y
1	0.5	0.8	0.3	0.00	147.97	50.52	79.07
2	0.5	0.8	0.3	50.52	79.07	66.27	72.83
3	0.5	0.8	0.3	66.27	72.83	70.54	69.55
4	0.5	0.8	0.3	70.54	69.55	89.57	33.14
5	0.5	0.8	0.3	89.57	33.14	93.83	21.19
6	0.5	0.8	0.3	93.83	21.19	95.80	0.00
7	0.75	0.9	0.4	95.80	0.00	105.64	0.00
8	0.75	0.9	0.4	105.64	0.00	115.49	0.00
9	0.75	0.9	0.4	115.49	0.00	125.33	0.00
10	0.75	0.9	0.4	125.33	0.00	227.03	0.00
11	0.75	0.9	0.4	227.03	0.00	0.00	0.00

Punto de análisis: X = 29.26 m, Y = 0 m.

Total de rocas que superan el punto de análisis= 88

Probabilidad Acumulada	Velocidad (m/seg)	Energía (J)	Altura de Rebote (m)
50%	15.03	1450	11.02
75%	16.93	1768	11.31
90%	18.65	2054	11.58
95%	19.67	2225	11.73
98%	20.83	2417	11.91

Velocidad (seg)	Altura de rebote(m)	Energía cinética (J)
Maximum: 22.19	Maximum: 20.99	Maximum: 2938.45
Average: 15.03	Average: 11.69	Average: 1450.92
Minimum: 7.26	Minimum: 11.02	Std. Dev.: 346
Std. Dev.: 9.28	Std. Dev.: 1.44	

## CAPITULO 6

### 6.0 Catalogo de falla:

#### 6.1 Situación actual:

Los taludes de la Costa Verde en la zona del distrito de Magdalena, en más de una oportunidad, han sido declarados en emergencia. La socavación marina existente antes de la construcción de la pista, era el principal problema y la mayor causa de inestabilidad, generando un rápido retroceso del terreno.

Desde la construcción de la pista, los derrumbes y la caída de cantos rodados del acantilado, han sido constantes, especialmente en el tramo de estudio. Durante años el mar destruyó progresivamente el terraplén de la vía más cercana al mar, provocando que a mediados de los 90's se tenga que reconstruir el terraplén y realizar un enrocado

En la actualidad, el tramo del estudio se encuentra clausurado desde finales de febrero del año 2002. En este periodo se ha construido una solución temporal, consistente de una malla apoyada en parantes, ubicada en la berma central que separa las dos vías. Durante unos meses se habilitó la vía de Norte a Sur, la cual está más alejada del talud, y se cerró la vía de Sur a Norte. Sin embargo, ocurrieron derrumbes y caídas de piedras que afectaron ambas vías y por precaución se clausuraron ambas.

#### 6.2 Catalogo de falla:

En el trabajo de Cañari (2001) podemos apreciar una zonificación geológica-geotécnica de los acantilados en términos de riesgo. Según ésta, el tramo tiene un gran sector catalogado como de riesgo muy elevado o crítico (rojo), y en menor proporción, zonas de riesgo medio (azul) y riesgo elevado (naranja).



**Gráfica 6.01** Zonificación geológica-geotécnica de los acantilados en términos de riesgo.

Según recomendación de esta, las soluciones que se planteen en los tramos críticos pueden ser aplicables o inferir en los segmentos de menor riesgo.

Debido a que no es un solo problema el que influye en las condiciones del talud, en el presente catalogo de fallas, enumeraremos los principales agentes que generan problemas de inestabilidad en el talud y la ubicación de los problemas que este tiene, en un catalogo de falla.

En la actualidad el mar no socava directamente el talud como lo hizo antes de la construcción de la pista, por lo que no debe ser considerado como un agente activo.

## **6.2.1 Agentes que provocan la inestabilidad de los taludes:**

### **6.2.1.1 Efecto del viento:**

La erosión eólica es la principal causa de la caída de material del talud. La brisa marina al encontrarse con el talud va limpiando de a pocos las arenas y finos del conglomerado, dejando a las gravas sin soporte.

Además, la brisa marina transporta sales que se depositan en la superficie del talud, las cuales propician la degradación del material y, en menor grado, generan cambios de volumen.

Durante las tardes de viento moderado, es frecuente la formación de pequeños “remolinos” de aire, que empiezan a media altura del talud y van subiendo a través de su relieve, erosionándolo de una manera violenta hasta, finalmente desaparecer en la parte superior.

En la actualidad se puede observar la erosión eólica, puesta de manifiesto como “medias cañas verticales” o “cilindros”.



**Foto 6.01** Formaciones en el talud a manera de cilindros, causados principalmente por la erosión eólica.

### **6.2.1.2 Efecto del agua:**

El agua tiene un doble efecto negativo en la estabilidad del talud pues reduce la resistencia al esfuerzo cortante y aumenta el peso del suelo. El talud no tiene presencia de napa freática.

Si bien es cierto, las precipitaciones pluviales no son fuertes en la zona, una garúa prolongada erosiona levemente la superficie de los lentes de finos. Mayores caudales de agua, provenientes de tuberías, riegos excesivos por inundación, etc., han generado grandes derrumbes y el colapso del suelo en diversos tramos del talud.



**Foto 6.02** Erosión, a manera de surcos, causada debido a intensa garúa (Dic. 2002)  
El ancho del lente es 2 m. aprox.



**Foto 6.03** Colapso del suelo debido a inundación. Se puede ver que la matriz del conglomerado se separa de las gravas. (Ago. 2002)

#### **6.2.1.3 Efecto de la temperatura:**

El cambio de temperatura en los taludes provoca cambios en los volúmenes del material constituyente, cambios de humedad y contribuye a la intemperización del talud, en especial de las gravas que constituyen el conglomerado.

En la publicación de Vivar (1997) se menciona la pérdida de resistencia en la “*falla por intemperismo*” característica, que se manifiesta en una secuencia estacional de humedecimiento-secado-contracción-desprendimiento, en los paquetes de limos amarillentos, arcillas marrón rojizo y en mucha menor proporción en algunos paquetes de gravas, que inestabilizan a las capas superiores”.

#### **6.2.1.4 Efecto de los movimientos sísmicos:**

Los sismos remueven el material debilitado o suelto de talud, generando desprendimientos y caída de cantos rodados a la pista. Aceleran el proceso de caída de los cantos y provocan deformaciones a lo largo del talud, además de aumentar los esfuerzos cortantes del material.

También producen desplazamientos y agrietamientos en los rellenos de la zona superior, además de precipitar la caída de estructuras ubicadas al borde del talud.

Se tiene que recordar que el talud es una condición de borde, en la cual el material no esta confinado por lo que el efecto de las ondas sísmicas es complejo.

#### **6.2.1.5 Efecto de la acción del hombre:**

La modificación de la geometría del talud por el hombre, en general, ha disminuido las condiciones de estabilidad. Los cortes, limpiezas y desquinches realizados han ido haciendo más vertical el perfil de los taludes. Inclusive, debido a la dificultad que implica realizar estas maniobras a medio talud, la mayoría de cortes han sido realizados en la zona inferior debilitando y reduciendo progresivamente el pie del talud.

Otro problema generado por el hombre es el arrojado de basura y desmontes al talud, que se acumulan en la superficie o bajan rodando generándose derrumbes, erosión y desprendimiento de cantos rodados. La basura se encuentra desperdigada a lo largo del talud y al pie del mismo, a pesar de que se realizan constantes limpiezas. Sobre los rellenos se detalla en el punto 6.2.2.3.

Las vibraciones que generan los vehículos que pasan por la pista al pie del talud también provocan la caída de cantos.

Los taludes soportaban los desagües de las viviendas aledañas y canales de las antiguas chacras, pero éstos fueron derivados eliminando la contaminación y el efecto erosivo del agua. Actualmente existen jardines en la zona superior los cuales no deben ser regados por inundación

### **6.2.2 Principales fallas y problemas del talud:**

#### **6.2.2.1 Caída de cantos rodados:**

El conglomerado que constituye el talud es susceptible a la acción de la erosión eólica e intemperismo. Como se ha mencionado, la brisa marina limpia el material que rodea a los cantos y la caída de éstos es facilitada por cambios de humedad, temperatura, sismos, vibraciones provocadas por vehículos y aviones, etc.

La caída de los cantos, así como los derrumbes, se producen a lo largo de todo el tramo. La intensidad de estos fenómenos está ligada directamente con el relieve del talud.

La mayoría de cantos caen sobre la vía más cercana al talud, ya que la distancia del pie a la pista es en promedio 5 m. En pocos casos, los cantos rebotan hasta la otra vía, sin embargo, los accidentes generados directa o indirectamente por el impacto de estos "proyectiles" afectan a ambas.

Dentro de las dificultades que plantea un análisis teórico para la solución de este problema se encuentra la definición de la trayectoria de caída de los cantos, la velocidad inicial, la altura de rebote, la velocidad de llegada a la pista y la energía de impacto.



Foto 6.04 Distribución de cantos caídos a través del tramo.

#### **6.2.2.2 Derrumbes:**

Es importante recalcar que lo que sucede en la actualidad en el tramo son derrumbes y no deslizamientos. Los derrumbes consisten generalmente de desprendimientos de un volumen no muy grande, causados por el efecto de la gravedad, no presentan superficies de deslizamiento y están condicionados por discontinuidades y fisuras existentes mientras que los deslizamientos presentan un plano de falla en el que se ha vencido las fuerzas de corte. No se tiene evidencia suficiente para afirmar que han ocurrido deslizamientos en la zona.

La geometría del talud presenta zonas en las que existen salientes a manera de domos, con más de  $90^\circ$  de inclinación con respecto a la vertical, que pueden derrumbarse con el progresivo debilitamiento del material que las sostienen. Están ubicados en el tercio medio vertical del talud.

#### **6.2.2.3 Rellenos:**

Existen numerosos rellenos en el tramo, que en su mayoría consisten de material de préstamo, basura y desmonte. Los tres grandes rellenos existentes son el que constituye la base de la pista, el ubicado en la zona superior desde la progresiva 0+030 hasta casi la progresiva 0+150, y el ubicado en la corona del talud desde la progresiva 0+150 en adelante.

El relleno ubicado entre P 0+030 y P 0+150 se encuentra en lo que fuera un gran forado en forma del cuña del talud (Fotos 6.05-6.07). La forma atípica de esta no permite definir su procedencia, lo que si puede verificar es su progresivo relleno a lo largo de los años (ver anexo del corrimiento de borde de los taludes) hasta la altura del acantilado natural.

Los grandes rellenos superiores han sido realizados principalmente con el objetivo de ganar terreno para la construcción. Los rellenos ubicados en la corona tienen un

relieve con inclinación entre  $60^\circ$  y  $45^\circ$  y una terraza que aparece en algunos puntos con un ancho máximo de 10 m.

La degradación del material que constituye el relleno, las presiones a las que está sometida y la falta de confinamiento generaron el agrietamiento en estructuras y el pavimento ubicados en la zona superior del talud.

El relleno de la base de la pista fue colocado para ganarle tierra al mar y al igual que en los otros, ha sufrido deformaciones que han deteriorado el pavimento de la pista. Además, el relleno debido a la capilaridad, permite que se filtre pequeñas cantidades de agua hacia la superficie.



**Fotos 6.05 y 6.06** Evolución del relleno, tomadas por Sogreah (1959) a la izquierda y SAN (1964) a la derecha



**Foto 6.07** Estado actual del relleno ubicado entre P 0+030 y P 0+150 (2003)

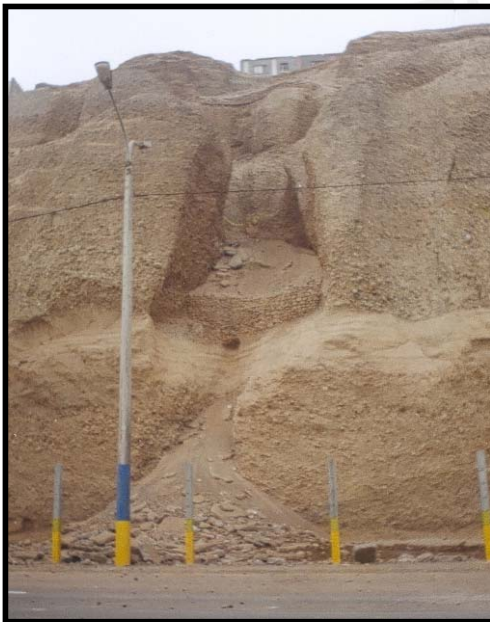
#### **6.2.2.4 Cárcavas e irregularidades debido a la erosión:**

La gran mayoría de las cárcavas antiguas han sido rellenadas y en otros casos han sido truncadas o desaparecidas por el retroceso del talud. Las cárcavas más grandes que existían cercanas al talud fueron aprovechadas para la construcción de los accesos vehiculares de la Av. Brasil y la Av. Bertolotto.

Actualmente existen dos formas características y marcadas en el tramo, las que tienen forma de cárcava y las que tienen forma de cilindros truncados. Las que tienen forma de cárcavas, se encuentran principalmente donde existen pircas y donde las casas están más cerca al talud. Es probable que en un inicio estas se hayan formado por los desagües, dándole la forma de cárcava y de allí hayan sido continuadas por la erosión eólica. La cárcava más resaltante se encuentra ubicada en la progresiva 0+400.

El otro tipo de forma característica es aquella que tiene forma de un cilindro truncado o “medias cañas” que empiezan generalmente en la zona inferior del relleno superior, prolongándose hacia la parte superior del talud.

Algunas de estas llegan casi al pie del talud y se encuentran a lo largo de todo el tramo, sin embargo, se concentran y están más marcadas desde la progresiva 0+150 a la 0+450 aproximadamente. El crecimiento de estas formas hace que el relieve del talud genere mayores problemas de estabilidad.



**Foto 6.08 (izq) y Foto 6.09 (der)**  
Acumulación de material al pie del talud luego de desquinche de la zona superior, progresiva 0+400.

### **6.2.2.5 Estructuras inestables cerca y en el talud:**

#### **6.2.2.5.1 Pircas:**

Existen en el tramo 7 pircas hechas con los cantos rodados de la zona, las cuales están rellenas a su máxima capacidad. Cinco de estas se encuentran en el relleno ubicado a la altura del estadio Chambochumbi, aproximadamente en las progresivas P 0+050, P 0+060, P 0+080, P 0+100 y P 0+130, y las otras dos se encuentran a la altura de la progresiva 0+400. Su inestabilidad se debe a la erosión del suelo que la circunda y le sirve de base, además de estar colmadas a su tope.

#### **6.2.2.5.2 Estructuras de material noble:**

En la progresiva 0+000, se pueden ver por lo menos 4 casas cuyos cercos perimétricos se encuentran justo al borde del acantilado. Igualmente se puede apreciar cerca de la progresiva 0+400 un conjunto de casas cuyas fachadas están siendo alcanzados por el borde superior de talud, y aproximadamente desde la progresiva 0 +



425 a la P 0+500, se pueden apreciar casas cuyos cercos perimétricos y muros han perdido confinamiento y están expuestos a la intemperie.

La más grande de todas estas estructuras, se encuentra a la altura de la progresiva 0+000, que consta de 4 pisos y un sótano que tiene un volado de madera hacia el talud.

Se ha realizado un seguimiento mediante fotografías aéreas al retroceso del talud a lo largo del periodo 1944-2002, en el cual se puede concluir que el talud ha retrocedido en los distintos puntos a un ritmo promedio de 0.67 a 1.07 m por año.

El máximo retroceso ocurrido durante ese periodo en el talud se ha dado en la progresiva 0+200 en el que la corona ha retrocedido 67 m.

De las ecuaciones de retroceso del talud, las que más se ajustan a un modelo matemático es la de la P 0+300 y extrapolándola hasta el 2010 la tendencia indica que el talud retrocedería casi 10 m. con respecto al año 2002.



**Foto 6.10** Vista de perfil de hotel que tiene sus cimentaciones apoyadas en la corona del talud.



**Foto 6.11** Distancia entre el borde de la corona del talud y viviendas ubicadas a la altura de la progresiva 0 + 400.

## CAPITULO 7

### 7.0 Proyecto de estabilización del talud:

#### 7.1 Alternativas para la estabilización del talud:

Como se ha podido apreciar, los problemas son múltiples en el talud, siendo el principal el de la caída de los cantos rodados y derrumbes.

Existen soluciones activas y pasivas para la prevención contra la caída de los cantos rodados y derrumbes. Las medidas activas son aquellas que actúan sobre las causas del fenómeno e impiden su iniciación. Por otro lado, las medidas pasivas son aquellas que disminuyen o evitan los efectos de los problemas en otras infraestructuras sin eliminar la causa de los mismos.

##### 7.1.1 Medidas de excavación y relleno:

La remoción de material presenta una gran cantidad de variantes, que están limitadas por los costos a invertir en la solución. Por ejemplo, se puede remover material, tanto en la corona como en todo el cuerpo del talud, también se pueden disminuir los ángulos de los perfiles del talud, se puede reducir la altura de los taludes, además se pueden formar banquetas o algún tipo de escalonamiento hasta lograr un factor de seguridad aceptable.

Una solución netamente en función de un corte, tendría que reducir el talud no solo para aumentar su estabilidad al deslizamiento, sino también para disminuir la energía de caída de los cantos y evitar derrumbes. Sin embargo, un gran corte afectaría a la gran mayoría de pobladores que viven en la parte superior del talud.

Los cortes localizados en el tramo evitarían el peligro que significan algunos domos y salientes que están a punto de desprenderse del talud. Los desquinches y el recojo de la basura son medidas necesarias de prevención para evitar la acumulación de material en la superficie del talud.

Los rellenos pueden ser ubicados de tal manera que formen una cubierta frente al intemperismo, estabilicen mediante su peso propio zonas críticas del talud, etc. Se puede eludir el problema rellenando una pista más cercana al mar, previo estudio de impacto de la modificación del perfil de la costa, solución que escapa al objetivo del presente trabajo.

Cabe mencionar que un corte o relleno mal realizado, puede empeorar las condiciones de estabilidad del talud además de echar a perder la ligazón natural que existe en el suelo.

##### 7.1.2 Empleo de vegetación:

Se trata de un método preventivo y correctivo (solución activa) de las fallas por erosión, debido a que se colocan barreras físicas que consisten en vegetación sobre o delante de la superficie del talud. Desde el punto de vista estético y de impacto ambiental, la revegetación es una buena alternativa que ha funcionado en otros taludes de la Costa Verde.

Sin embargo, en el tramo existen dificultades para el crecimiento de la vegetación, tales como la verticalidad de los taludes y la cantidad de grava en el suelo. Esto evita que las raíces logren un entramado profundo para generar un agarre que estabilice el talud sin un considerable movimiento de tierras.

El riego en esta zona no debe de realizarse mediante inundación sino por goteo puesto que el agua puede llegar a debilitar las propiedades resistentes del suelo y aumentar su peso, doble efecto negativo que puede hacer colapsar zonas del talud.

La hidrosiembra es un método moderno que consiste en rociar una emulsión sobre el suelo que se desea revegetar. Esta emulsión (aglutinantes, hidroabsorbentes, nutrientes, semillas, agua, etc.) provoca una capa superior en la superficie del talud que favorece la germinación de las semillas.

### **7.1.3 Mallas metálicas:**

El revestimiento del talud con mallas metálicas de triple o doble torsión, es un tratamiento eficaz que ha sido muy utilizado en las carreteras y autopistas de todo el mundo.

Teniendo en cuenta la proximidad de la malla al talud, la densidad de anclado y la forma de colocación se pueden clasificar en mallas colgadas o adosadas al terreno. Las mallas colgadas encauzan el movimiento del material que cae del talud haciendo que disminuya su energía y se acumule al pie del talud, mientras que las mallas adosadas van prácticamente pegadas al talud, de manera que se tenga la mayor cantidad de puntos del talud en contacto con la malla, evitando así que el material de las zonas inestables se muevan de su sitio o que pueda alcanzar determinada velocidad.

Las mallas colgadas requieren complementos en la base del talud como gaviones, bermas o “cunetas” para almacenar el material caído.

### **7.1.4 Pantallas metálicas:**

En taludes naturales de pendiente media, bajo un acantilado de gran altura, resultan muy convenientes las pantallas metálicas para la intercepción de material que puedan caer del acantilado. De acuerdo con la forma de trabajo las pantallas se pueden denominar estáticas o dinámicas.

*Vallas estáticas:* Constituidas con elementos metálicos, se comportan de forma acertada ante impactos de muy baja energía, su principio de funcionamiento está basado en el empleo de soluciones potentes basado en elementos rígidos y de gran inercia que se oponen al paso de las rocas. Para energías superiores a los 50 kJ son inadecuadas y resultan literalmente arrasadas por el paso de las rocas.

*Vallas dinámicas:* Es una barrera que, al igual que la anterior, se coloca perpendicular al eje de la trayectoria probable de las rocas, con el objeto de interceptarlas y evitar que lleguen a la carpeta asfáltica. En este caso se pone una estructura de elevada deformabilidad, gracias a la cual se puede absorber una elevada cantidad de energía sin que los esfuerzos en los diferentes elementos de la misma sean excesivamente elevados.

El conjunto de pantallas metálicas existentes en la pista se pueden complementar con paneles o publicidad reforzada para el impacto, alargándose en forma de medios

túneles, elevándoseles con un parapeto o sino reubicándose en el mismo acantilado, etc.

#### **7.1.5 Concreto y mortero lanzado:**

Las capas de concreto lanzado o shotcrete son usadas para recubrir la superficie y rellenar grietas, en taludes de suelo y roca con el propósito de proteger los materiales de la erosión y desintegración. El concreto y mortero pueden ser proyectados en casi todo tipo de superficie con rapidez. Estos métodos puede ser usado para recubrir las cárcavas más problemáticas, combatir la erosión y evitar la caída de los cantos rodados de una manera activa.

Para evitar los derrumbes y lograr un sostenimiento del talud (sin un gran movimiento de tierras) serían necesarios anclajes, mallas de refuerzo o fibras de acero que permitan resistir esfuerzos estructurales y de temperatura.

Se tiene el inconveniente que la presencia de suelos finos reduce el buen desempeño de ambas soluciones.

#### **7.1.6 Gaviones:**

Los gaviones son cajas de mallas de alambre, de diferentes tamaños que se usan para disminuir las fuerzas destructivas de la erosión. Estas cajas están rellenas, en su mayoría, con piedras. Son elementos flexibles que unidos entre si pueden actuar como una estructura monolítica y que pueden ser colocadas en niveles y franjas.

Permiten el crecimiento de vegetación y son fáciles de construir, además, el propio talud puede proporcionar material para la elaboración de estos elementos.

Si se quisiera estabilizar el talud netamente mediante gaviones, tendría que realizarse un movimiento de tierras previo, además se ser necesarios una fila de gaviones al pie del talud.

#### **7.1.7 Nailing:**

El nailing permite el refuerzo de la tierra mediante la colocación de grouting y barras de acero en perforaciones realizadas en el suelo. Las barras de refuerzo, que necesitan de tratamientos contra la corrosión, trabajan a fricción y desarrollan tensiones de tal manera que se estabiliza la masa de suelo. Es necesario que los refuerzos se adhieran adecuadamente con el suelo. El nailing es usado para la estabilización permanente de los taludes y ha tenido buen desempeño en suelos similares al de la zona.

#### **7.1.8 Muros de contención:**

Los muros de contención son estructuras que soportan la tierra en lugares donde la estabilidad no puede ser mantenida por el talud de suelo por si solo. Son construidos por movimientos de tierra de corte o de relleno.

Dependiendo de su forma y sus características mecánicas, los muros de contención pueden ser clasificados en mampostería de pilar o bloques, de concreto ciclópeo, de gravedad, de semi-gravedad, muro con vigas, de contrafuerte, etc. Estas estructuras necesitan de mantenimiento y drenajes.

La construcción de estos muros en el talud es difícil y son pocos, por ejemplo las pircas, se han desempeñado correctamente en la zona.

#### **7.1.9 Cribwalls:**

Los cribwalls son construidos con madera (generalmente en trabajos temporales), piezas de concreto prefabricado (ASTM C915-79), piezas construidas en el sitio o miembros metálicos. Estas estructuras son, en su mayoría, rellenos con piedras u otros materiales gruesos granulares para crear una estructura que pueda drenar libremente, además de poder contribuir al sembrado de vegetación.

Los cribwalls son flexibles, económicos, pueden ser ensamblados en el sitio y actúan como una sola estructura. Son adecuados para alturas pequeñas a medias – 7 m.- sometidas a empujes moderados.

#### **7.1.10 Pantallas Ancladas:**

Los anclajes en suelos pueden ser usados en combinación con muros, vigas horizontales y bloques de concreto para estabilizar taludes. Los anclajes pretensados de suelos actúan contra el posible plano de falla e incrementan el esfuerzo normal en la superficie potencial de falla.

Una aplicación común de los anclajes es la construcción de pantallas ancladas para estabilizar excavaciones y taludes. Éstas, consisten de muros con uno o mas niveles de anclajes diseñados para restringir las fuerzas asociadas con masas inestables de suelos. La presión del terreno en el muro anclado se transfiere a los tensores, ya sea a través de largueros horizontales o a través de placas de carga en la cabeza de cada anclaje, los cuales deberán alcanzar el estrato de conglomerado firme y estable.

Se puede usar en zonas en las que el relleno es muy grande. Además, esta solución protege el talud contra eventos catastróficos y elimina el efecto del intemperismo en el talud. Sin embargo los costos son bastantes altos y requiere un mantenimiento a largo plazo.

#### **7.1.11. Confinamiento celular:**

Consiste de un conjunto de franjas laminares conectadas entre si mediante soldadura ultrasónica . Las estructuras expandidas forman paneles rectangulares, a manera de un panal de abejas, hechos de celdas individuales. Estas celdas pueden ser rellenas con suelo para revegetación, gravas y concreto.

Se puede colocar el confinamiento celular en franjas horizontales, para formar un cuerpo similar al de un muro de concreto ciclópeo, o paralelo a la superficie, lo que permite evitar la erosión en el talud.

Es un material liviano y flexible, que tiene recubrimiento contra los rayos ultra violeta.

#### **7.1.12. Tierra armada:**

La tierra armada es una estructura de gravedad que consiste en capas alternas de relleno y tirantes de acero conectados a elementos prefabricados que conforman el paramento del muro de retención.

Los muros de tierra armada trabajan asociando el terreno con armaduras de acero, creando una unión permanente entre los dos elementos debido al esfuerzo de rozamiento que se crea en los punto de contacto.

Es una estructura flexible, que puede tener un buen desempeño para solucionar los problemas que ocasionan los grandes rellenos de la parte superior.

#### **7.1.13. Geo-mantas:**

Es una cobertura que permite proteger la erosión del agua y el viento cuando estos problemas son difíciles de ser resueltos de una manera natural. Generalmente, se complementan con vegetación en su superficie. Son susceptibles a la acción directa de los rayos ultra violeta.

En la geometría existente en el talud, se tendrían que hacer instalaciones complementarias para su auto sostenimiento.

Cabe mencionar un geocompuesto (MacMat-R) fabricado a partir de una geomanta pegada a una malla metálica (malla hexagonal de doble torsión), que protege la superficie contra la erosión mediante la geomanta, y evita la caída de piedras mediante la malla metálica. Propuestas al respecto, entre otros, se pueden ver en Maccaferri (2002).

#### **7.1.14 Otras soluciones:**

Además de las técnicas detalladas, cabe mencionar el jet grouting para el reforzamiento del pie o cuerpo del talud, el uso de baterías de pilotes para estabilización de rellenos, vigas prefabricadas, publicidad o biopublicidad a manera de recubrimientos, etc. Existen métodos que son combinación de una o más de las soluciones propuestas, además, generalmente las soluciones están complementadas por una revegetación final.

### **7.2 Análisis de soluciones realizadas en el sitio:**

Existen cerca y dentro del tramo diferentes soluciones que han mitigado, corregido o empeorado los problemas en el talud, como se puede observar en el catalogo de fallas. Dentro del tramo, se han realizado:

- Desquinches que en algunos casos han vuelto el relieve del talud más vertical, y por lo tanto, más inestable.
- Pircas que han tenido un buen desempeño, pero no han recibido el debido mantenimiento.
- Rellenos de diferentes volúmenes.
- Pantallas metálicas de protección contra la caída de los cantos ubicado entre las 2 vías de la pista.
- Limpieza de basura al pie y en el talud.
- Remoción de estructuras que estaban a punto de caer de la parte superior del talud.
- Intentos de revegetación, como por ejemplo las enredaderas ubicadas entre las progresivas 0+250 a 0+350.



**Foto 7.01** Remoción de muros y pavimento de la corona para evitar accidentes progresiva 0+400. 10 de Marzo del 2002. Defensa Civil.

Dentro de otras soluciones aplicadas cercanas al tramo, se pueden mencionar:

- Casi al inicio del tramo, ubicada en la parte superior, se puede ver una vivienda con muros perimétricos con contrafuertes, los cuales han evitado el avance de la erosión de los cimientos de la estructura.
- En el acceso vial de la Av. Brasil a la Costa Verde, hay un muro de contención con contrafuerte, el cual soporta el paso de los autos. A los lados de este, se puede ver que la erosión ha ido avanzando hasta llegar a la estructura de concreto. Este muro ha evitado la caída de la plataforma de la vía y la vereda.



**Foto 7.02 (Izq.)** Muro de contención que soporta el terraplén de la pista. En la **Foto 7.03 (Der.)** de la derecha se puede apreciar el avance de la erosión.

- En la misma bajada, un poco más al norte, se puede apreciar un par de muros de concreto simple y una pirca. Al igual como sucede con el muro de contención, la erosión marca una diferencia entre los bordes y la estructura de concreto, lo que no es tan marcado en la pirca.
- En los taludes inmediatamente al sur del tramo en estudio, en el distrito de San Miguel, existe un banqueteadado, que se proyecta estar complementado por la siembra de pequeños arbustos en las terrazas intermedias. Esto, ha resultado en una geometría menos inestable, pero no se ha solucionado el problema de la caída de cantos rodados.



- En el acceso a la Costa Verde por la Av. Bertolotto, se pueden observar 2 muros de contención. Uno de estos (**Foto 7.04**), ha fallado y en su sección transversal, se puede apreciar que fue construido con cantos rodados de la zona. El relleno que soportaba no era tan grande como para haber hecho fallar al talud de esta manera. Mientras, en el otro muro de contención se puede observar una separación considerable del talud, que a la larga puede llevarlo a la falla.

**Foto 7.04** Muro de concreto colapsado

- En el distrito de Magdalena, ya casi llegando al acceso vial de Marbella, se puede ver que el talud ha sido revegetado, mediante hidrosiembra por la compañía Vamont S.A. En este caso, debido a la configuración del talud, se pudo lanzar la emulsión mediante un cañón rociador obteniéndose una mayor productividad y eficiencia. Sin embargo, se hizo una prueba en un tramo con relieve parecido al tramo en estudio sin éxito debido a que el suelo de la zona tenía demasiada inclinación, contenía demasiados cantos y la emulsión no pudo adherirse al suelo.



**Foto 7.05** Hidrosiembra en Magdalena.



**Foto 7.06** Cribwalls de San Isidro.

- Finalmente, a mediados del año 2003, se colocaron postes con mallas hexagonales de doble torsión para controlar la caída de cantos rodados en el acceso vial de la Av. Brasil a la Costa Verde. Nótese que la altura de los postes es mayor a 8 m. para unos taludes con casi la mitad de altura que la del tramo de estudio (**Foto 7.07**).

En distritos más alejados del tramo y de condiciones distintas, se puede ver soluciones como el sembrado de campanillas (especialmente en Miraflores), nailings y anclajes en taludes del Club Regatas, Cribwalls en San Isidro, grandes movimientos de tierras y pantallas ancladas en Larco Mar, variedades de muros artesanales y concreto, etc.





**Foto 7.07** Colocación de postes en la Costa Verde.

Analizando las soluciones que han funcionado y las que no, se puede concluir que:

- Las estructuras grandes de concreto simple o armado, tienen el problema de ser pesadas y rígidas. Es por esto que las vibraciones y deformaciones que se producen en el talud, provocan que los muros se separen del talud o fallen. Este mismo efecto, genera que el suelo aledaño a las estructuras acelere su intemperización o derrumbe. Las estructura en el talud deben de apuntar a tener flexibilidad como unidad o por componentes para resistir deformaciones y recibir el mantenimiento adecuado.
- Se debe de considerar precauciones contra la degradación por la acción de la brisa marina, rayos del sol y viento tales como cementos u aditivos especiales, recubrimientos de PVC, etc.
- Las pantallas metálicas no han fallado por el impacto de cantos sino por grandes bloques de suelo que se han desprendido del talud. Además, hay gravas que logran pasar por entre los espacios formados por las cocadas de la malla.
- Las soluciones que han funcionado en la Costa Verde, se han presentado en taludes con ángulos menos pronunciados en el perfil, de menor altura o suelos con menores porcentajes de gravas.
- Los desquiches deben ser bien planificados y buscando aumentar el factor de seguridad del talud. Además, se deben de evitar los rellenos y la construcción de estructuras en la corona del talud sin planificación.
- El trazo de la pista y la ampliación de esta, han generado que los problemas del talud se incrementen con el tiempo.
- Las soluciones que se planteen para el talud deben de ser probadas en pequeños tramos y monitoreadas para ver el verdadero desempeño en las difíciles condiciones de la Costa Verde en la zona del distrito de Magdalena.

## CAPITULO 8

### 8.0 Conclusiones y recomendaciones:

#### 8.1 Conclusiones y comentarios:

Los taludes de la Costa Verde en la zona del distrito de Magdalena (dentro del tramo del presente estudio) están constituidos en su mayoría por una grava mal gradada con matriz areno arcillosa, que comúnmente se denomina como el “conglomerado de Lima”. Las gravas que lo conforman son redondeadas (cantos rodados), tienen un T.M.= 10”, un tamaño medio menor de 4” y es susceptible al intemperismo. El talud presenta intercalaciones de finos o lentes, en su mayoría arcillosos, de espesor promedio de 2 m. Estas intercalaciones de finos, no tienen un orden particular, sin embargo, generalmente son horizontales y su potencia disminuye con respecto a la altura.

Los valores que resultan del back análisis para este tramo, son los que más se ajustan con la realidad de lo que realmente resiste el talud para las condiciones presentadas. De todas las iteraciones, el juego de valores que menos se aleja de lo planteado por la bibliografía y cumple con la condición de tener el menor F.S mayor a la unidad es:

**Ángulo de fricción interna  $\phi = 40^\circ$**   
**Cohesión C = 0.80 kg/cm<sup>2</sup> (78.48 Mpa)**

En el seguimiento realizado al talud mediante fotografías aéreas (adjunto en el anexo informático) no se ha podido constatar la presencia de falla por resistencia al corte del talud, sin embargo la erosión y la socavación marina han provocado derrumbes, generando el retroceso del talud.

La geometría del talud y el tipo de suelo encontrado hacen difícil la aplicación de soluciones del tipo activas, pues dificultan los procesos constructivos y elevan los costos. Es por esto que se opta por 2 soluciones del tipo pasivas avocadas directamente a solucionar el principal problema que presenta el talud, que es la caída de cantos rodados.

Debido a que no se encontraron dentro de la bibliografía datos propios del suelo conglomerado para los valores que permiten la simulación computarizada de como va a rebotar un canto a lo largo del talud, se realizó una calibración de estos valores (dentro del rango de la bibliografía). Obteniéndose una rugosidad 0.50, un coeficiente de restitución normal 0.30 y un coeficiente de restitución tangencial 0.80. Del resultado de la evaluación de la caída de cantos rodados a través del talud se puede concluir que las energías de impacto de los cantos rodados es pequeña pero las alturas de rebotes son altas.

La malla como solución pasiva del talud elimina la posibilidad de que escape un canto rodado hacia la pista e inclusive puede encausar derrumbes. No obstante solo atenúa el efecto del intemperismo.

En lo que respecta a revegetación, si bien es cierto que el ángulo que presenta la parte superior permite su aplicación, el tipo de suelo que conforma esta zona, la sedimentación de arena por el efecto del viento y el peligro de un desborde en el regado hacen que sea preferible experimentar una solución en pequeños tramos antes de su aplicación. Cabe recordar que se han realizado intentos de revegetación en la zona pero ninguno logro buenos resultados.

La solución planteada de la combinación de un sistema de tierra armada con un valla estática es una solución pasiva que requiere mantenimiento, es una solución más costosa que la de la malla pero genera una alternativa de aprovechamiento del mismo material que se desprende del talud.

## **8.2 Recomendaciones**

El talud, para efecto de análisis de estabilidad de taludes, ha sido modelado con un gran relleno en la parte superior, estimado principalmente de las fotografías aéreas ortogonales tomadas al talud y la bibliografía encontrada. En los modelos se ha contemplado las potencias de relleno más desfavorables dentro de las estimaciones. Sin embargo, se recomienda hacer sondajes para ver la profundidad real del relleno.

Existen diferentes especulaciones acerca de cuanto puede aportar la “cementación” del talud debido a la presencia de carbonato de calcio. Es por esto que la mejor forma de cuantificar el verdadero aporte de este fenómeno es mediante la realización de ensayos de resistencia al corte (por ejemplo ensayo de corte directo in-situ) eliminando este efecto (mediante ácidos, etc.) y comparar la diferencia entre uno y otro caso

Al estar basado esta trabajo en una zona específica de los taludes de Magdalena, muchos de los planteamientos realizados no se pueden generalizar para toda la Costa Verde, ya sea por falta de representatividad estadística y/o por el tipo de suelo y condiciones de los taludes. No obstante, se pueden lograr una solidez mayor si es que se logra crear una base de datos de ensayos e información acerca de suelos con condiciones parecidas a las encontradas en el tramo de este estudio, para mediante la comparación y análisis de mayor cantidad de evidencias, se pueda avanzar en el estudio del suelo conglomerado de Lima.

Finalmente, al igual que se calibro en campo los valores correspondientes al coeficiente de restitución normal y tangencial para el análisis de caída de cantos rodados a través del talud, se puede realizar en el campo una simulación del comportamiento de las vallas en el talud, construyendo una de estas con postes alejados de 3 a 5 m y lanzando proyectiles a través del talud y de tamaños crecientes hasta que se haga fallar el conjunto debido a la energía de impacto aplicada. Esto permitiría obtener valores del comportamiento de las mallas hexagonales más ajustados a la realidad. Si se realizara este análisis se recomienda el registro de la experiencia mediante 3 filmadoras (frontal, perfil y una toma diagonal o desde la parte superior).

## 9.0 Bibliografía

- Aramburú Menchaca-CORPEI (1972) “Estudio de Pre-factibilidad de defensa del Litoral y la habilitación de nuevas playas de Lima Metropolitana” Lima-Perú.
- ASCE (2002) “Recommended procedures for implementation of DMG Special publication 117 Guidelines for Analyzing and Mitigating Landslide Hazards in California” Los Angeles Section Geotechnical Group.
- Azzoni A., La Barbera G., Zaninetti A. (1995) Analysis and predicting of rockfalls using a mathematical model, Journal of Rock Mechanics, Mineral Science & Geomechanics.
- Cañari Sanchez, Mariela (2001) “Análisis de la estabilidad de taludes de la Costa Verde” Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Carrillo Gil, Arnaldo (1979) “Estabilidad y resistencia del conglomerado de Lima Metropolitana” El Ingeniero Civil, Año I, número 1. Mayo-Junio de 1979.
- CISMID-FIC-UNI (1996) “Foro técnico. La Costa Verde: Diagnóstico, Propuestas y Soluciones” Auditorio del CISMID 17 de Julio de 1996.
- Colorado Department of Transportation ver. 1991,2002 (2002) “Colorado Rockfall Simulation Program” Manual del Programa. Versión 2.1 y 4.0-March 2002.
- García García, Edgar (1984)” Análisis de la estabilidad Estática y Dinámica de los Acantilados de Lima” Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Ingeniería, Lima.
- Geobruigg (1999) “Sistemas para la protección contra la erosión e inestabilidad de taludes y laderas: Redes de cables de Acero Tecco-TD. Para la estabilización superficial de taludes” Manual de Diseño.
- Hidroenergía Consultores (1997) “Estudio de peligro sísmico- Estabilidad de Taludes del Acantilado de la Costa Verde” Lima-Perú.
- Hoek, E., (1987) Rockfall – a program in BASIC for the analysis of rockfall from slopes. Unpublished note, Golder Associates/University of Toronto, Canada.

- Instituto Metropolitano de Planificación (1995) “Plan Maestro de desarrollo de la Costa Verde 1995-2010 Volumen A: Diagnostico” Autoridad del Proyecto Costa Verde.
- Instituto Nacional de Defensa Civil-Comité Distrital de Defensa Civil de Magdalena del Mar 1997-2002 (2002) “Informes técnicos sobre inspecciones técnico-oculares, situacionales y acciones en los acantilados de la Costa Verde en la Jurisdicción del Distrito de Magdalena”.
- INGEMMET(1979) “Proyecto de remodelación de los acantilados de Magdalena del Mar y San Miguel” Dirección de Geotecnia -Departamento de Lima.
- INGEMMET(1997) “Boletín N° 18:Estudio de la seguridad física de los acantilados de la Costa Verde” Serie C. Lima-Perú.
- Martínez Vargas (2001) “Estabilidad de taludes de la Costa Verde” Manual de Campo para Maestría en Ingeniería Civil-Universidad Nacional de Ingeniería, Lima-Perú.
- Maggiolo Robert (1971) “Informe de campo” Informe dirigido a la empresa CORPEI acerca de los trabajos de campo realizados a lo largo de la Costa Verde más álbum fotográfico. Diciembre 1971.
- Maccaferri del Perú S.A.C. (2002) “Proyecto de prevención contra la caída de piedras en la Costa Verde” Departamento Técnico-Lima.
- Maccaferri América Latina (2001) “Estructuras en suelo reforzado. Necesidades soluciones” Manual del sistema Terramesh. Maccaferri do Brasil Ltda. Cód. C010E – 09/01- Victory.
- Ministerio de Fomento-España (1996) “Protección contra desprendimiento de rocas- Pantallas Dinámicas” Dirección general de Carreteras.
- Ministerio de Vivienda y Construcción (1988) “Proyecto especial Costa Verde. Sector : San Isidro-La Punta. Tramo: Magdalena-San Miguel. Acceso Av. Universitaria” Volumen n° 1 Memoria Descriptiva - Suelos- Especificaciones -Calendario. Lima-Perú.

- R Agostini-P. Mazzalai- A.Papetti (1998) "Hexagonal wire mesh for rock-fall and slope stabilization" Office Maccaferri S.p.A.- Bologna,Italy.
- Rico Rodríguez- Del Castillo (2000) "La ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas" México. MX. Limusa. 14a.reimp.
- SOGREAH (1959) "Estudio de la Protección del Litoral de las Bahías del Callao y Miraflores" .
- Sosa Oviedo, Luis Humberto (1992) "Evaluación del Riesgo Geotécnico con Incidencia en la Estabilidad Estática de Taludes para los acantilados de Lima" Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Ricardo Palma, Lima.
- Sedapal (2001) "Evaluación del comportamiento de la Napa de los Acuíferos del río Rímac y Chillón" Equipo de aguas subterráneas. Gerencia de Producción.
- Vivar Romero, German (1997) "Contribución al estudio de los acantilados de la Costa Verde" XI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Trujillo-Perú.
- Walsh (1997) "Shear Strength Attributable to Cementation Versus Soil Suction in Arid Envirmoents" Unsaturated Soil Engiennering Practicem Geotechnical Special Publication N°68" ASCE
- Zúñiga Romero (2004) "Estabilización del talud en la Costa Verde en el Distrito de San Miguel". Tesis de Grado, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú.