

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ**

Escuela de Posgrado



Interacción suelo estructura para pilotes excavados
embebidos en estratos compuestos por mezclas de matriz con
fragmentos o bloques: Caso de estudio en la Costa Verde - Lima.

Tesis para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería Civil con
mención en Gestión de Riesgos Naturales que presenta:

Carlos Eduardo Ortiz Olarte

Asesor:

Guillermo José Zavala Rosell

Lima, 2025

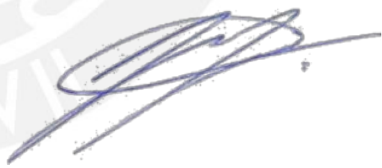
Informe de Similitud

Yo, **Guillermo José Zavala Rosell**, docente de la Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulada **Interacción suelo estructura para pilotes excavados embebidos en estratos compuestos por mezclas de matriz con fragmentos o bloques: Caso de estudio en la Costa Verde - Lima**, del autor **Carlos Eduardo Ortiz Olarte**, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 14%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 22 de julio de 2025.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha:

Lima, 22 de julio de 2025

Apellidos y nombres del asesor: Zavala Rosell, Guillermo José	
DNI: 07885623	Firma 
ORCID: 0000-0002-2077-5001	

RESUMEN

En el presente trabajo de tesis, se analizó el comportamiento de materiales tipo bloques en matriz en laderas con el objetivo de validar el aporte en términos de estabilidad física al implementar pantalla de pilotes excavados (también conocidos como pilas al tener diámetros superiores a 1.0m) a lo largo de los acantilados de la Costa Verde (Lima-Perú) en cuyas coronas se emplazan edificaciones residenciales, comerciales y turísticas que deben mantener condiciones de seguridad admisibles para sus usuarios. En este estudio, se hizo énfasis en el caso del Malecón Castagnola, donde se han presentado desprendimientos de suelo, amenazando la estabilidad de la infraestructura que soporta, por ello se utilizó el método de equilibrio límite para determinar la presión lateral que debe soportar la pila para alcanzar los factores de seguridad mínimos, posteriormente se implementó la metodología Interacción Suelo Estructura (ISE), utilizando la respuesta no lineal del suelo con las curvas P-Y aplicables y de esta manera realizar el dimensionamiento de los pilotes cargados lateralmente.

Los resultados obtenidos (deflexión, esfuerzo cortante y momento flector), mostraron que, al implementar las medidas de contención propuestas ante una posible condición de inestabilidad (pérdida de confinamiento lateral debido a flujos o deslizamientos), la infraestructura localizada en la parte superior podría mantener su condición estable, presentando deformaciones admisibles y disminuyendo la probabilidad de ocurrencia de un estado de falla. La consistencia de estos resultados fue contrastada y validados con modelación mediante elementos finitos con el software Plaxis2D.

Finalmente, con el análisis de sensibilidad realizado, se identifica que los resultados obtenidos para suelos granulares, se ven directamente afectados con la variación del ángulo de fricción interna a volumen constante y el módulo de rigidez inicial del suelo, por lo cual dichos parámetros deben ser analizados con más detalle para mejorar la precisión del análisis.

TABLA DE CONTENIDO

p1. GENERALIDADES	1
1.1. Introducción y Justificación	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. General	2
1.2.2. Específicos	3
1.3. Metodología	3
2. ESTADO DEL ARTE	5
2.1. Caracterización y modelación geotécnica estratos tipo bloque en matriz:	5
2.2. Correlaciones para determinar parámetros de resistencia estratos tipo bloque en matriz	9
2.3. Caso de estudio	12
2.3.1. Geología	16
2.3.2. Geomorfología	18
2.3.3. Geotecnia	19
2.3.4. Detonantes de inestabilidad	28
2.4. Estabilización de laderas con pilotes:	35
2.4.1. Estado límite de resistencia geotécnica - Método de Broms:	41
2.4.1.1. Suelos Puramente Friccionante:	41
2.4.1.2. Suelos Puramente Cohesivos:	46
2.4.2. Estado límite de resistencia geotécnica – respuesta no lineal del suelo método curvas P-Y (FHWA, 2010):	52
2.4.3. Método de análisis mediante Elementos finitos:	55
3. PREDISEÑO DE PILOTES PARA ESTABILIZACIÓN MÉTODO DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA – ESCENARIO 1	56
3.1. Consideraciones	56
3.2. Dimensionamiento de pilotes cargada lateralmente - método de Broms:	57
3.3. Dimensionamiento pilotes cargada lateralmente - Respuesta no lineal del suelo método curvas P-Y:	58
4. PREDISEÑO DE PILOTES PARA ESTABILIZACIÓN MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS – ESCENARIO 2	62
4.1. Consideraciones	62
4.2. Dimensionamiento de pilotes cargados lateralmente Método de Elementos finitos:	62
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	66

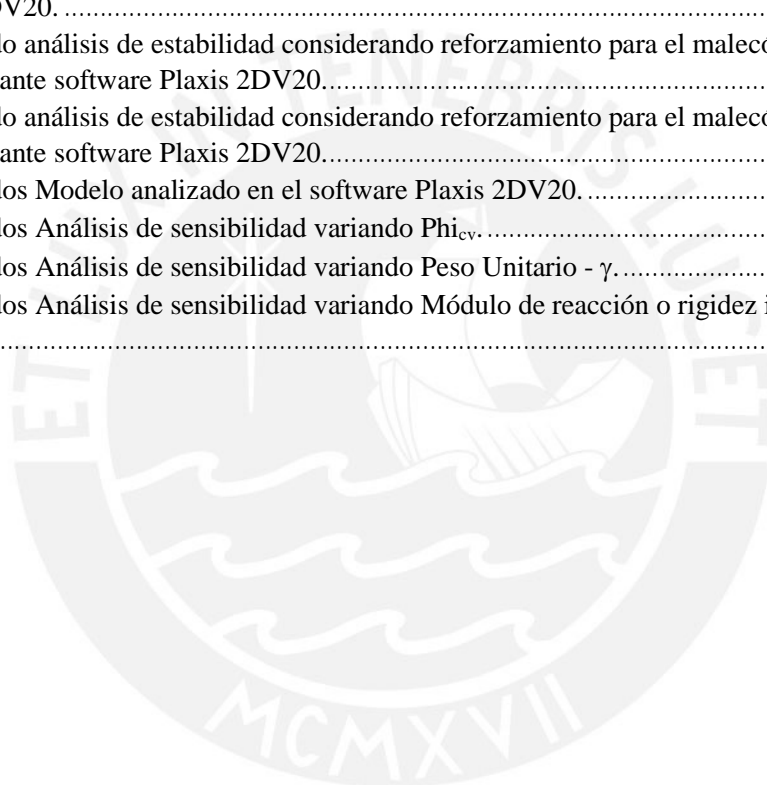
5.1. Análisis de resultados con metodología ISE	66
5.2. Análisis de resultados con elementos Finitos	67
5.3. Análisis de sensibilidad en los resultados	67
6. CONCLUSIONES	71
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73
ANEXOS	76



INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Izq. Imagen en donde se marca los límites aproximados del relleno artificial conformado por desmonte en el malecón Castagnola y Der. Perfil transversal de la zona de derrumbe donde se puede observar la altura del talud, su conformación geológica- Malecón Castagnola (INGEMMET, 2019).....	14
Figura 2 Esquema obra de estabilización proyectada en Malecón Castagnola (Municipalidad de Lima, 2020).....	16
Figura 3. Modelo geológico 3D del distrito Magdalena del Mar - Malecón Castagnola (Ingemmet, 2023).	17
Figura 4 Izq. Mapa de unidades litológica Magdalena del Mar - Malecón Castagnola (INGEMMET, 2019).	18
Figura 4 Izq. Mapa de contexto geomorfológico de la ciudad de Lima (Ingemmet, 2023).....	19
Figura 5 Resultados ensayos de granulometría por tamizado ejecutados en Malecón Castagnola (GSAQ SAC., 2020)	23
Figura 6 Izq. Tomografía de refracción sísmica LR01-MM. Der. Perfil de velocidad de onda de corte Vs LS07-MM - Malecón Castagnola (Bernal & Tavera, 2020).	26
Figura 7 Izq. Resultado Razón Espectral (H/V) MM03-06. Der. Resultado Razón Espectral (H/V) MM04-06 (Bernal & Tavera, 2020).	27
Figura 8 Corte transversal típico de la ladera de la Costa Verde - Martínez Vargas (2007).	29
Figura 9 Levantamiento topográfico Malecón Castagnola - Vista en planta antes de estabilización (Terreno Natural) Fuente: Expediente técnico del Proyecto: 14857-20 (Ver Anexo a).	31
Figura 10 Levantamiento topográfico Malecón Castagnola - Vista en planta después de estabilización (Terreno Natural en las secciones 4-4 y 5-5) Fuente: Expediente técnico del Proyecto: 14857-20 (Ver Anexo a).	31
Figura 11 Levantamiento topográfico Malecón Castagnola - Vista en alzado (Terreno Natural en la sección 5-5) Fuente: Expediente técnico del Proyecto: 14857-20 (Ver Anexo a).	32
Figura 12 Análisis de estabilidad con parámetros geotécnicos iniciales - Estático.	33
Figura 13 Pilotes perforados para estabilización de deslizamientos (Modificado de Reese et al., 1987)...	35
Figura 14 (a) Curva típica p-y. (b) Variación del módulo de reacción (Epy) con respecto a la deflexión (Reese, et al., 2011).	37
Figura 15 Mecanismos de falla para pilotes de contención. a) Falla como pilote corto, b) Falla por rotación de cuerpo rígido y c) Falla por flujo. Fuente: (Kanagasabai et al., 2011).	38
Figura 16 Diagramas de carga, cortante y momento para pila con cabeza libre en suelo granular.	41
Figura 17 Diagramas de carga, cortante y momento para pila con cabeza restringida en suelo granular...	44
Figura 18 Resistencia a carga lateral de pilotes largas en suelos no cohesivos relacionada con la resistencia al momento último.	45
Figura 19 Comportamiento pilotes ante carga lateral - Suelo friccionante según teoría de Broms.....	45
Figura 20 Diagramas de carga, cortante y momento para pila con cabeza libre en suelo cohesivo.	46
Figura 21 Diagramas de carga, cortante y momento para pila con cabeza restringida en suelo cohesivo..	49
Figura 22 Comportamiento de pilotes ante carga lateral - Suelo cohesivo según teoría de Broms.	52
Figura 23. A) Modelo de análisis para pilotes cargadas lateralmente b) curvas de respuesta del suelo p-y (Reese, et al., 2011).	53
Figura 24. Respuesta pila cargada lateralmente en arena con o sin presencia de agua (Reese 1974).	54
Figura 25. Valores representativos de rigidez inicial (kx) para suelos cementados (Reese 1974).	54

Figura 26. Respuesta pila cargada lateralmente en suelos cementados (Reese 1974).	55
Figura 27. Izq. Curvas py suelos arenosos Reese 1974. Der. Curvas py suelos cementados Reese 1974 (Software PyPile).	59
Figura 28. Características geométricas y de resistencia utilizadas para modelar Pilotes en concreto armado (Software PyPile).	60
Figura 29 Modelos analizados Curvas py para suelos arenosos Reese 1974 (Izquierda) así como curvas py para suelos cementados Reese 1974 (Der) - software PyPile.	60
Figura 30 Resultados Modelo analizado en el software PyPile D:1.2m- Cemented Soil.	61
Figura 31 Resultados Modelo analizado en el software PyPile D:1.2m- Sand Reese.	61
Figura 32 Modelo geométrico (sección 5-5) analizado en el software Plaxis 2DV20.	63
Figura 33 Resultado análisis de estabilidad inicial para el malecón Castagnola (sección 5-5) mediante software Plaxis 2DV20.	64
Figura 34 Resultado análisis de estabilidad considerando reforzamiento para el malecón Castagnola (sección 5-5) mediante software Plaxis 2DV20.	64
Figura 35 Resultado análisis de estabilidad considerando reforzamiento para el malecón Castagnola (sección 5-5) mediante software Plaxis 2DV20.	65
Figura 36 Resultados Modelo analizado en el software Plaxis 2DV20.	65
Figura 37 Resultados Análisis de sensibilidad variando Φ_{icv}	68
Figura 38 Resultados Análisis de sensibilidad variando Peso Unitario - γ	69
Figura 39 Resultados Análisis de sensibilidad variando Módulo de reacción o rigidez inicial del suelo – Ex.	70



INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Investigación geológico – geotécnica del Malecón Castagnola	21
Tabla 2-2 Influencia de Sulfatos.	24
Tabla 2-3 Condiciones de exposición especial.	24
Tabla 2-4 Valores máximos registrados en ensayos de durabilidad (contenido de sulfatos y cloruros solubles en muestras de suelos).	25
Tabla 2-5 Resumen registro exploración directa	25
Tabla 2-6 Registro exploración indirecta.....	27
Tabla 2-7 Frecuencia y Periodo predominante	28
Tabla 2-8 Parámetros geotécnicos iniciales.....	30
Tabla 2-9 Resumen Factores de seguridad –parámetros de resistencia inicial	33
Tabla 2-10 Parámetros de resistencia de Diseño.....	34
Tabla 2-11 Compilación de parámetros de resistencia de la Grava de Lima.....	34
Tabla 2-11 Expresiones para estimar el módulo de reacción.....	37
Tabla 3-1 Fuerza distribuida sobre pilotes de contención.....	57
Tabla 3-2 Resistencia ante carga lateral (kN) para $Le=8m$ (método Broms).....	57
Tabla 3-3 Resistencia ante carga lateral (kN) para $Le=10m$ (método Broms).....	57
Tabla 3-4 Resistencia ante carga lateral (kN) para $Le=12m$ (método Broms).....	58
Tabla 3-5 Resistencia ante carga lateral (kN) para $Le=20m$ (método Broms).....	58
Tabla 3-6 Características geométricas principales de pilotes en concreto armado – Software PYPile.	59
Tabla 4-1 Características geométricas principales de pilotes en concreto armado – Software Plaxis2D...	62
Tabla 5-1 Coeficientes de variación propiedades geotécnicas.....	68
Tabla 5-2 Resumen resultados Análisis de sensibilidad variando Φ_{cv}	68
Tabla 5-3 Resumen resultados Análisis de sensibilidad variando Peso Unitario - γ	69
Tabla 5-4 Resumen resultados Análisis de sensibilidad Módulo de reacción o rigidez inicial del suelo – Ex.....	70

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción y Justificación

En la ingeniería geotécnica uno de los objetivos se centra en determinar la resistencia a la falla y deformación del suelo frente a cargas externas; siendo más específico, un caso de análisis interesante es el referido a pantalla de pilotes que actúan como estructuras de contención en laderas conformadas por materiales cuyo comportamiento esfuerzo-deformación presenta un alto nivel de complejidad en el momento de su modelación matemática. Estas estructuras de contención tienen como objetivo mejorar las condiciones de estabilidad y proteger comunidades o infraestructura cercana.

En la presente investigación académica, se tiene interés en analizar el comportamiento de materiales de fundación tipo bloques en matriz o fragmentos en matriz, dada las siguientes razones:

- La caracterización geotécnica (directa e indirecta) tienen importantes limitaciones, bien sea por la complejidad para realizar muestreo inalterado o por el costo de los procedimientos necesarios en laboratorio ya que por ejemplo para realizar cortes directos representativos, estos deben ser ejecutados en muestras cuyo tamaño sea entre 5 y 6 veces el tamaño de la partícula más grande (Coll Calderón, 2018).
- Dada la dificultad en la definición de parámetros geotécnicos (resistencia y rigidez) en este tipo de materiales, es común utilizar los parámetros obtenidos únicamente para la porción de matriz, considerando que el aporte de los bloques o fragmentos no es significativo (Iannacchione & Vallejo, 2000).
- Limitada literatura técnica concerniente a métodos de análisis y carencia de criterios internacionalmente unificados.

Para el caso de interés, pantalla de pilotes localizados en cercanía de laderas, una de las metodologías frecuentemente utilizada en la consultoría geotécnica, consiste en realizar análisis cinemáticos de estabilidad para definir los empujes mínimos que deberán soportar dichas estructuras garantizando la estabilidad global y con ello proceder a realizar el respectivo dimensionamiento geotécnico mediante el uso de la teoría de falla propuesta por Broms 1964 (Poulos & Davis, 1990); sin embargo, en este enfoque, la estructura geotécnica se analiza de forma aislada al suelo (no como un sistema). En este orden de ideas, para lograr un mayor ajuste en los

diseños en el presente trabajo de investigación se considera conveniente utilizar el método de análisis de interacción suelo estructura (ISE), el cual es un modelo matemático afinado que permite determinar las fuerzas internas y desplazamientos a lo largo de la pila considerando la variación de las propiedades geotécnicas e hidráulicas del suelo (Zeevaert*, 1988), contemplando tanto el efecto inercial, representado por el aumento de las solicitaciones transmitidas por la superestructura (cortantes y momento de volcamiento), como el efecto cinemático debido a las diferencias de rigidez entre el suelo y dicha estructura (Achs, 2009)(Romo et al., 2000).

Con respecto al material terreo que se analizará, se ha optado por el denominado “bloque en matriz”, el cual se caracteriza por estar conformado por una mezcla de matriz y partículas con dimensiones superiores (material grueso granular con diámetro de partícula $>3''$ o $>75\text{mm}$), siendo este uno de los suelos más comunes en el borde occidental del continente suramericano, principalmente por: 1. la cercanía con el trazo montañoso generado por el proceso de subducción entre la placa de Nazca con la placa continental, y 2. porque un número importante de ciudades capitales de este continente se localizan sobre depósitos aluviales y fluviales (Verdugo, Ramón; de la Hoz, 2006). Es importante mencionar que, en los análisis geotécnicos para este tipo de materiales, frecuentemente se realizan aproximaciones dado el limitado acceso a los métodos de caracterización requeridos, por ser estos dificultosos y de alto costo (p.e. Corte directo y Triaxiales a gran escala); es por esto que en el marco del presente análisis, se considera un aporte significativo realizar una recopilación del estado del arte y así afianzar el conocimiento relacionado con la correcta caracterización y modelamiento geotécnico de este tipo de materiales.

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Realizar el diseño de pantalla de pilotes excavados (o pilas según sea el caso) considerando solicitaciones estáticas para su implementación como estructuras de estabilización en el caso de estudio Malecón Castagnola en la Costa Verde – Lima, mediante el uso de la metodología de Interacción Suelo Estructura.

1.2.2. Específicos

- A. Establecer un caso de estudio base, para el cual se definirán las condiciones de contorno típicas para el análisis, tal como el esquema adecuado de aplicación de cargas estáticas aplicadas, geometría de la estructura y entorno (topografía), así como gradación del estrato de suelo de interés.
- B. Definir un modelo estratigráfico para representar de forma adecuada el comportamiento del material de fundación del sitio donde se localiza el Malecón Castagnola, mediante el uso de la investigación geotécnica existente y las propuestas de caracterización geotécnica disponibles en la literatura técnica actual referente a estratos compuestos por mezclas de matriz con fragmentos o bloques.
- C. Realizar el dimensionamiento de pilotes para su implementación como estructuras de estabilización, mediante el uso de la metodología de Interacción Suelo-Estructura (Escenario 1).
- D. Realizar el dimensionamiento de pilotes para su implementación como estructuras de estabilización, mediante el uso de la metodología de elementos finitos (Escenario 2).
- E. Evaluar los resultados obtenidos en ambos escenarios, para identificar las ventajas y limitaciones que se tendrán al usar cada metodología, mediante un análisis comparativo.

1.3. Metodología

Para lograr el análisis propuesto, en primera instancia se definirán los métodos de caracterización y modelación, que a buen criterio, describan de la mejor manera el comportamiento de los estratos (no cementados) con una fracción importante de partículas gruesas (grava, fragmentos, bloques), también conocidos como Bimsoils sigla en inglés de Block-in-Matrix-soil (Kalender et al., 2014), para lo cual será necesario estudiar de forma detallada los trabajos de investigación en los que se hayan realizado análisis experimentales y modelación numérica. Esto se considera de gran el interés ya que uno de los pilares del presente estudio, es concebir el mejor modelo de análisis para un material cuyo comportamiento geomecánico depende directamente del tamaño y proporción de las partículas que lo conforman, las cuales al ser independientes pero íntimamente interrelacionadas entre sí (Lambe, 1972), deberán ser suficientemente analizadas para que el

modelo matemático a utilizar represente de forma adecuada el comportamiento real del suelo y el nivel de predictibilidad aumente.

Con esta información, se definirán los parámetros geotécnicos de resistencia y deformación necesarios, tales como: distribución granulométrica, densidad, módulo de rigidez del suelo -G y distorsión angular – γ (Constantino & Paulín, 1996), así como ángulo de fricción interna y cohesión. Esto se realizará siguiendo la metodología de caracterización geotécnica más recomendable para suelos tipo “bloques en matriz” contemplando diferentes tipos de ensayos aplicables y los métodos para la definición de parámetros de resistencia, más significativos para el tipo de suelo de interés como lo son retrocálculo, variación de propiedades físicas y métodos analíticos (Iannacchione & Vallejo, 2000).

Al definir la caracterización geotécnica, se procederá al segundo pilar del presente trabajo investigativo, el cual se centra en el dimensionamiento geotécnico de los pilotes utilizando tanto la metodología tradicional como la de interés para el presente estudio. Para esto se tendrán dos etapas, la primera en la cual se realizará el predimensionamiento de pilotes por análisis de Broms para cabezal restringido y cabezal libre en suelos granulares y la segunda donde se realizará el predimensionamiento de pilotes con la metodología ISE, en la cual se ha demostrado que para encontrar la solución del sistema se requiere asumir una distribución de módulos de reacción (constantes de resortes) y realizar un proceso iterativo que converja en una distribución de esfuerzos y deformaciones iguales en ambos elementos (Zeevaert*, 1988). Se usarán las licencias académicas del software SAP2000 y Plaxis 2D de la PUCP, con los cuales se calcularán, por una parte, las deformaciones de la estructura y por otra la deformación del suelo, cuya diferencia servirá para corregir los módulos de reacción asumidos hasta alcanzar la compatibilidad de deformaciones buscada. Adicional a lo anterior, con los resultados de diseño, se propone utilizar análisis de sensibilidad con el fin de determinar cuáles son los parámetros de mayor importancia y de mayor variabilidad.

Finalmente, se compararán las dimensiones obtenidas con las metodologías de diseño indicadas anteriormente, se valorará la confiabilidad de ambos diseños, y se determinará el impacto en los resultados al utilizar el método de interacción suelo estructura para el caso de estudio analizado, relacionando la cantidad de recursos (tiempo/dinero) que se requieren invertir con el detalle

alcanzado en los resultados; también, se pretende generar curvas o ábacos de diseño, los cuales podrán ser considerados para el caso en que no sea posible aplicar dicho método (por limitaciones en tiempo o dinero) y así mejorar en lo posible los resultados en el ámbito de la consultoría geotécnica.

2. ESTADO DEL ARTE

Tras la revisión de investigaciones disponibles, a continuación, se presenta una breve síntesis de la literatura técnica revisada y la cual se considera relevante para el objetivo del presente trabajo de grado:

2.1. Caracterización y modelación geotécnica estratos tipo bloque en matriz:

Las principales características de los estratos compuestos por una porción de partículas con menor tamaño (matriz granular o cohesiva) y otra porción de partículas con mayor diámetro (p.e. gravas, fragmentos, bloques), se enlistan a continuación:

- Mediante la ejecución de ensayos triaxiales sobre suelos compuestos por matriz arenosa y gravas, se ha encontrado que el esfuerzo de resistencia al corte es controlado: 1) de forma total por la componente de fricción generada por las partículas de mayor tamaño si su proporción de peso es $>70\%$, 2) de forma parcial por la componente de fricción generada por las partículas de mayor tamaño si la proporción se encuentra entre 49% y 70% o 3) de forma total por la componente de fricción generada por las partículas de menor tamaño si la proporción de fragmentos o bloques es $<49\%$ (Vallejo, 2001).
- El material que compone la matriz reduce el contacto puntual entre los fragmentos, con lo cual se previene la rotación o reorientación (Vallejo, 2001).
- En mezclas de suelos principalmente granulares, parámetros como la angularidad, la rugosidad y el tamaño de las partículas, son los que mayor influyen en la porosidad del suelo (Vallejo, 2001).
- Generalmente, en rellenos estructurales se ha evidenciado que el uso de mezclas de suelos granulares con valores de coeficientes de uniformidad (C_u) superiores a 5.0, son requeridos para lograr la mayor densidad seca mediante compactación mecánica (Bolton et al., 1991).
- En un análisis de laboratorio desarrollado por profesores de la Universidad de Cambridge, donde se ejecutaron ensayos triaxiales ($d=70\text{mm}$) en suelos matriz soportados compuestos

por una matriz arenosa con tamaños de partícula entre 0.1mm a 2.0mm, y una porción de gravas tan resistentes o más friables que la matriz y con tamaños de partícula entre 3.35mm y 5.6mm, se determinó:

- i. Para mezclas adecuadamente compactas, con una proporción en peso para la grava de 15%, se pueden presentar disminuciones de hasta 1.5° en el ángulo de fricción interna con respecto al registrado para la matriz arenosa.
- ii. Para mezclas adecuadamente compactas, con una proporción en peso para la grava de 30%, se pueden presentar aumentos de hasta 3.0° en el ángulo de fricción interna con respecto al registrado para la matriz arenosa.

Estos efectos en el ángulo de fricción interna de las mezclas analizadas, fueron explicados por los autores indicando, por un lado, que incluir una proporción menor (15%) de partículas tamaño grava genera una alteración en el empaquetado en el entorno de las partículas de mayor dimensión (posibilitando su rotación o reorientación), y por otro lado, incluir una proporción mayor (30%) de partículas tamaño grava generan un reforzamiento interno de la matriz de suelo atrapada entre las partículas tamaño grava (Bolton et al., 1991).

- Para los Autores (Iannacchione & Vallejo, 2000), los métodos para determinar la resistencia al corte de estratos compuestos por suelo y fragmentos de roca, puede clasificarse en:
 - i. Retrocálculo: en el cual, utilizando software de estabilidad cinemática, se analizan las propiedades geométricas como pendiente del talud, tipo de material, espesor, densidad y localización del plano de falla, definidas “in-situ”, de los taludes que presentaron falla, y así estimar los rangos de los parámetros que influyen en la resistencia al corte los cuales pudieron generar un factor de seguridad unitario y alcanzar dicho estado.
 - ii. Variación de propiedades físicas, en donde se busca definir un modelo adecuado para considerar las partículas de mayor tamaño, utilizando alguno de los siguientes criterios:
 - Método de la granulometría paralela (MGP) o curvas homotéticas, requiere ensayar una muestra “equivalente”, con partículas de menor tamaño (máx. d:3.8cm) y fácil caracterización en laboratorio, la cual tendrá una

granulometría homotética o paralela a la del material grueso de interés (Verdugo, Ramón; de la Hoz 2006 pag.206).

Para lograr esta granulometría homotética, se debe escalar la granulometría del material grueso granular de interés, aplicándole un factor de reducción geométrico constante (también conocido como radio de similitud - s) a cada fracción de tamaño, y de esta forma lograr un paralelismo completo; los resultados disponibles de análisis experimentales han corroborado la efectividad del MGP para gravas fluviales con radios de similitud $s < 25$ (Dorador, 2018).

Diferentes investigaciones han demostrado que este método tiene como principales requerimientos, que la granulometría homotética no tenga una proporción de finos superior al 12% y que tanto las partículas finas como gruesas, presenten propiedades de forma, dureza, rugosidad y densidades mínima-máxima similares (Iannacchione & Vallejo, 2000)(Verdugo, Ramón; de la Hoz, 2006).

- Método de la matriz introducido por (Siddiqi, 1984) y en el cual se retira del análisis las partículas sobredimensionadas y solamente se analiza la matriz de suelo del entorno, asumiendo que las partículas de roca en matriz de material granular no generan efecto alguno en las características de resistencia y deformación de la mezcla. Esto es válido cuando menos del 40% de la mezcla corresponde a partículas rocosas, las cuales tendrán un contacto muy reducido con otras partículas similares y por ende la resistencia estará determinada principalmente por la matriz; por el contrario, en el caso en que más del 65% de la mezcla corresponde a partículas rocosas, el contacto entre ellas determina la resistencia de la mezcla.
- iii. Métodos empíricos: propuesto por los profesores (Barton, & Kjærnsli, 1981), para estimar el esfuerzo de corte para rellenos compuestos por roca para represas. Este método, es válido para estratos con alta concentración de fragmentos de roca en contacto y ha sido utilizado principalmente en el diseño de represas.

iv. Métodos analíticos: como el propuesto para mezclas compuestas por matriz de suelo granular y una fracción de hasta 30% de partículas gruesas, en donde se ha identificado que el material presenta valores de ángulo de fricción muy similares al correspondiente a la matriz sola; en cambio, este parámetro de resistencia presenta un incremento casi lineal con el contenido de material grueso para mezclas con fracciones entre 30% y 50% (Irfan & Tang, 1992). Estos resultados obtenidos por los investigadores T.Y. Irfan y K.Y. Tang y otros, consideran las siguientes fuentes de información:

- Literatura técnica disponible referente a trabajos experimentales y métodos de predicción de resistencia en coluviones y otros suelos heterogéneos.
- Análisis de estabilidad mediante retro-cálculo, con información obtenida de campo para 18 secciones representativa de ladera en coluviones localizados en Hong Kong.
- Registros de laboratorio de 12 cortes directos y 8 ensayos triaxiales (d=76mm y 100mm), ejecutados sobre muestras reconstituidas compactadas a una densidad homogénea, conformadas por matriz y una porción de partículas gruesas (principalmente fragmentos de roca triturada con dimensiones desde 5.0mm hasta 28.0mm y en algunos casos esferas de acero de 12.5mm de diámetro).

Con lo anterior, los investigadores de la Oficina de ingeniería geotécnica del departamento de Ingeniería Civil del Gobierno de Hong Kong presentan el siguiente modelo que permite realizar una cuantificación directa del efecto del contenido de partículas gruesas (entre 30% y 50%) en análisis de estabilidad:

$$\tau_m = c_m^0 + \sigma'_n \tan[\phi_m^0 + \Delta\phi]$$

Ec 1

Donde:

c_m^0 = Cohesión del suelo sin considerar la fracción de partículas gruesas.

σ'_n = Esfuerzo normal

ϕ_m^0 = Ángulo de fricción interna del suelo sin considerar la fracción de partículas gruesas.

$\Delta\phi = (C_n - 30\%) \alpha$

C_n = Fracción de partículas gruesas (en %)

α =Constante definida por el material analizado, la cual depende de la forma y tamaño de las partículas de material grueso. Según los datos analizados, los autores Irfan y Tang, proponen $\alpha = 40$.

- Para mezclas no saturadas compuestas por matriz de suelo arcilloso y una fracción de hasta 30%-40% de fragmentos de roca (“flotante” dentro de la matriz), el material presenta valores de ángulo de fricción muy similares a los determinados para la matriz; por el contrario, para mezclas de este mismo material con fracción de fragmentos rocosos mayor a 30%-40%, se produce el contacto entre fragmentos de roca generando valores altos para el ángulo de fricción interna y bajos para la cohesión (Iannacchione & Vallejo, 2000).

2.2. Correlaciones para determinar parámetros de resistencia estratos tipo bloque en matriz

Con el fin de introducir diferentes correlaciones cuyo objetivo es determinar parámetros de resistencia como el ángulo de fricción interna o cohesión de estratos compuestos por mezclas de matriz y bloques, tomando como respaldo la estrecha relación entre estas propiedades geomecánicas y la proporción volumétrica de bloques (Volumetric Block Proportion - VBP) (Kalender et al., 2014).

Relación volumétrica de Bloques (VBP): Dada la relación geométrica entre las medidas lineales (longitud) o de área (superficial) con las medidas volumétricas, es posible determinar la proporción VBP (Kalender et al., 2014), por ejemplo determinando la cantidad de intersecciones de bloques en los testigos extraídos de sondeos geotécnicos. Para esto en la literatura se recomienda que la longitud total del sondeo sea como mínimo 10 veces la dimensión máxima de bloques.

Las correlaciones encontradas en la literatura técnica disponible se describen a continuación:

Sonmez y Kasapoglu (Sonmez et al., 2010), propusieron un modelo empírico, con el fin de evaluar preliminarmente el comportamiento geomecánico de estratos compuestos por matriz y fragmentos rocosos, tomando como referencia la base de datos de reportes investigativos y ensayos de laboratorio de bimrocks (artificiales-no cementados) disponibles, mediante lo cual concluyen en las siguientes expresiones:

$$\phi_{Bimrock} = \phi_{matriz} \left[1 + \frac{1000 \left\{ \frac{\tan(\alpha)}{\tan(\phi_{matriz})} - 1 \right\}}{1000 + 5^{\frac{1-VBP}{15}}} \right] \left(\frac{VBP}{VBP + 1} \right)$$

Ec 2

$$c_{Bimrock} = \left[\frac{A - A^{\frac{VBP}{100}}}{A - 1} USC_{matriz} \right] \left[\frac{1 - \sin(\phi_{matriz})}{2 \cos(\phi_{matriz})} \right]$$

Ec 3

Donde:

$\phi_{Bimrock}$ = Ángulo de fricción interna del estrato bimrock (°).

ϕ_{matriz} = Ángulo de fricción interna de la matriz (°).

α = Ángulo de reposo para bloques (°).

USC_{matriz} = Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz.

VBP = Proporción volumétrica de bloques (%)

$c_{Bimrock}$ = Cohesión del estrato bimrock.

A = Variable de borde ($0 \leq A \leq 500$). Los autores recomiendan los siguientes valores: $A=0$, casi nada de adhesión entre el bloque y la matriz con bloques redondeados que lo rodea. $A=10$, adhesión débil entre el bloque y la matriz con bloques semiredondeados que lo rodea. $A=50$, adhesión moderada entre el bloque y la matriz con bloques semiangulares que lo rodea. $A=500$, adhesión fuerte entre el bloque y la matriz con bloques angulares que lo rodea.

Kalender y Sonmez (Kalender, Sonmez, & Medley, 2014), proponen un modelo predictivo del comportamiento geomecánico de estratos compuestos por matriz y fragmentos rocosos, tomando como base una serie de pruebas experimentales en testigos conformados por matriz arcillosa con fragmentos de andesita, así como los resultados de una extensa base de datos de reportes investigativos y ensayos de laboratorio de bimrocks (artificiales-no cementados) desarrollados por diferentes autores, mediante lo cual concluyen en las siguientes expresiones:

$$\phi_{Bimrock} = \phi_{matriz} \left[1 + \frac{1000 \left\{ \frac{\alpha}{\phi_{matriz}} - 1 \right\}}{1000 + 5^{\frac{100-VBP}{15}}} \right] \left(\frac{VBP}{VBP + 1} \right)$$

Ec 4

$$c_{Bimrock} = \left[\frac{A - A^{\frac{VBP}{100}}}{A - 1} USC_{matriz} \right] \left[\frac{1 - \sin(\phi_{matriz})}{2 \cos(\phi_{matriz})} \right]$$

Ec 5

Donde:

$\phi_{Bimrock}$ = Ángulo de fricción interna del estrato bimrock (°).

ϕ_{matriz} = Ángulo de fricción interna de la matriz (°).

α = Ángulo de reposo para bloques (°).

USC_{matriz} = Resistencia a la compresión uniaxial de la matriz.

VBP = Proporción volumétrica de bloques (%)

$c_{Bimrock}$ = Cohesión del estrato bimrock.

A = Variable de borde ($0.1 \leq A \leq 500$). Los autores indican que las tendencias más conservadoras se obtienen con un valor de $A=0.1$; así mismo, con el fin de evitar la división por cero, considerar el valor unitario de A como 0.999.

Vallejo y S. Lobo-Guerrero (Vallejo & Lobo-Guerrero, 2012), Tomando como base la teoría de material de relleno de refuerzo propuesta por Guth (1945), analizaron el comportamiento geomecánico de mezclas entre matriz de suelo y partículas de mayor tamaño (grava-fragmentos más resistentes) cuyos resultados provienen de:

- Ensayos de corte directo en laboratorio ejecutados sobre muestras compuestas por suelo tamaño arena (diámetro promedio 0.3mm) y algo de gravas (fragmentos que no interactúan entre si, con diámetro promedio de 10mm).
- Simulaciones de ensayos de corte directo, realizadas con el método de elementos discretos (Discret Element Method – DEM), considerando material granular con partículas de mayor tamaño.

Con cuyos resultados, validaron que la siguiente expresión, basada en la propuesta de Guth, modela satisfactoriamente la variación del esfuerzo de corte con relación a la concentración volumétrica de partículas de mayor tamaño (semejante al VBP).

$$S_c = S_m [1 + 2.5C_f]$$

Ec 6

Donde:

S_c = Resistencia al corte de mezclas entre matriz de suelo y partículas de mayor tamaño.

S_m = Resistencia al corte de mezclas de matriz de suelo.

C_f = Concentración por volumen de partículas de mayor tamaño (semejante al VBP).

Correlación entre parámetros de resistencia al corte y propiedades granulométricas (Nanclares Arango, 2018); Dentro de la evaluación realizada en su trabajo experimental con ensayos en campo y laboratorio, ejecutados sobre muestras de suelo de origen aluvial principalmente grueso tamaño grava, con algunas partículas cuyos tamaños oscilan entre 75mm y 200mm, presenta resultados que relacionan ecuaciones constitutivas y parámetros de resistencia como función de diámetro característicos, coeficientes de uniformidad - C_u , y coeficientes de curvatura - C_c , las cuales

fueron analizadas para determinar las que presentarán mejor correlación, llegando a las siguientes expresiones:

Resultados obtenidos mediante ensayo de Corte Directo

PARÁMETRO DE RESISTENCIA	ECUACIÓN
Fricción	$\phi = 0,3855 * D_{60} + 39,513$
Cohesión (kPa)	$C = 1,7709 * D_{60} + 82,976$ $C = 30,141 * \ln(Cu) + 74,702$

Resultados obtenidos mediante ensayo Triaxial (Consolidado Drenado)

PARÁMETRO DE RESISTENCIA	ECUACIÓN
Fricción	$\phi = 2,256 * \ln(D_{60}) + 22,414$ $\phi = 4,8669 * \ln(Cu) + 22,391$
Cohesión (kPa)	$C = -9,8983 * Cu + 141,26$ $C = -126,38 * Cc + 242,84$

En el desarrollo del trabajo de investigación, se identifica que estas correlaciones aplican para relación volumétrica de Bloques (30%-50%).

2.3. Caso de estudio

A lo largo de la costa de la ciudad de Lima, podemos observar el extenso depósito fluvioaluvial del río Rimac, gracias a una sucesión de paredes naturales con pendientes casi verticales, llamados acantilados de la Costa Verde, los cuales se han formado producto de la erosión marina. En dichos acantilados, se evidencia directamente la composición del mencionado depósito, la cual está caracterizada por intercalaciones de cantos rodados, arenas finas y arenas limosas (León et al., 2015), y que presentan características similares a las de interés del presente estudio.

Es importante mencionar que en los últimos años, los tramos de los acantilados de la Costa Verde pertenecientes a los distritos de Magdalena del Mar, Miraflores, Barranco, San Isidro y Chorrillos, han sido clasificado como zonas críticas (León et al., 2015), debido a recurrentes procesos de inestabilidad, propiciados en primera instancia por que los materiales que conforman estos acantilados se encuentran generalmente sueltos en superficie, y por la acción de factores externos (detonantes) como la precipitación, el viento y eventos sísmicos.

Adicionalmente, en la corona de estos acantilados, y desde hace más de 60 años, se ha venido desarrollando un constante proceso de ocupación urbana caracterizado por la reconfiguración mediante rellenos antrópicos, la ejecución de áreas de esparcimiento público (malecones, parques,

áreas deportivas, entre otros), la operación de sistemas de riego de jardines (los cuales comúnmente presentan fugas) saturando el suelo superficial, la construcción de edificaciones generalmente cimentadas superficialmente y en muchos casos, localizadas en la corona de las laderas cerca al borde de la zona con cambio abrupto de pendiente (terrenos escarpados) como se evidencia en la Fotografía 1.



Fotografía 1 Edificaciones construidas en la corona de laderas – Costa verde Lima.

Por lo anterior, se procedió con la revisión de información referente a procesos de remoción en masa en los acantilados mencionados, encontrándose varios sectores de especial interés, dentro de los cuales resaltamos específicamente el que se emplaza en cercanía del Malecón Castagnola distrito de Magdalena (E.274271, N.8661893), en donde el día 08 de Agosto de 2019, se registró un derrumbe de aproximadamente 225m³ del material de relleno con el cual se conformó el acantilado en este sector afectando principalmente la circulación de la vía (circuito de playas) localizada en el pie del acantilado como se puede observar en la Fotografía 2 y Figura 1 (INGEMMET, 2019).



Fotografía 2 Vista frontal del acantilado de interés 08-08-2019 (Fuente El comercio).

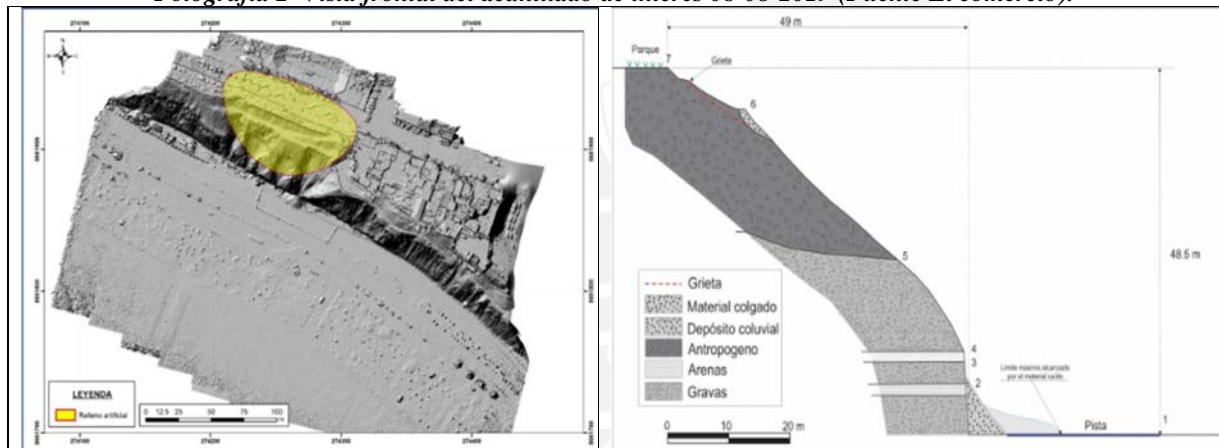


Figura 1 Izq. Imagen en donde se marca los límites aproximados del relleno artificial conformado por desmonte en el malecón Castagnola y Der. Perfil transversal de la zona de derrumbe donde se puede observar la altura del talud, su conformación geológica- Malecón Castagnola (INGEMMET, 2019).

Confirmando que el caso mencionado presenta una estratificación característica compuesta por un material granular tipo bimsoil, cuya descripción en el estudio geofísico oficial realizado indica “La zona del acantilado en el distrito de Magdalena del Mar, con una longitud aproximada de 2.2 km, está conformado por depósitos aluviales provenientes del río Rímac, compuestos por gravas (bolonería) soportadas en matriz areno limosa y lentes de arenas (parte media de acantilado)” (Bernal & Tavera, 2020).



Fotografía 3 Izq. Vista aerea del acantilado de interés 08-08-2019 (Fuente El comercio).



Fotografía 4 Vista frontal del acantilado de interés – posterior al proceso de remoción 16-12-2020 (Altura del Malecón Castagnola) (Republica, 2020).

En este lugar se realizaron estudios de ingeniería de detalle, en los cuales se ejecutó un programa de caracterización geotécnica en campo y laboratorio con el objetivo de evaluar la estabilidad global, así como las obras requeridas para garantizar dicha condición, dando como la necesidad de

ejecutar terrazas de 6.5 metros de altura y adecuaciones con una inversión cercana a los 7 millones de soles (Municipalidad de Lima, 2020).

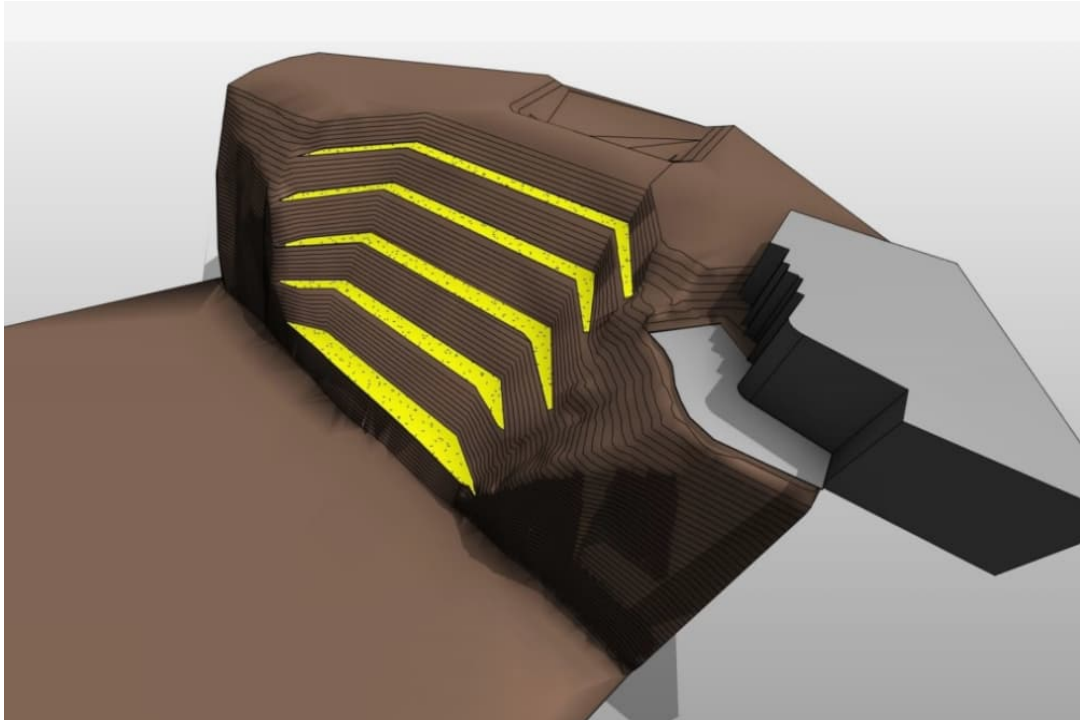


Figura 2 Esquema obra de estabilización proyectada en Malecón Castagnola (Municipalidad de Lima, 2020).

2.3.1. Geología

El conglomerado de Lima, cuyo espesor sobrepasa los 400m de profundidad, presenta un aspecto uniforme clasificado como conglomerado de cantos rodados, gravas y arenas íntimamente mezcladas, que en su totalidad son de origen ígneo (Carrillo Gil, 1979).

La descripción geológica disponible indica que en el sector analizado se tiene afloramientos de las siguientes 3 unidades de origen sedimentario que han sido acumulados desde el pleistoceno (INGEMMET, 2019):

- Depósito aluvial (Qpl-al): conformados por el transporte de material de los ríos Chillón, Rímac y Lurín, que alcanza espesores de hasta 600 m, compuestos por conglomerados con contenido de gravas y bloques de rocas volcánicas principalmente, con matriz tamaño arena y arcilla; superficialmente se evidencian secuencias de gravas con intercalaciones de bancos de arena de color amarillento, así como algunos niveles de arcilla.

- Depósito marino (Qh-m): conformados principalmente por arenas de grano medio a fino, de color gris amarillento, y en menor proporción limos no consolidados de color gris claro conteniendo restos de conchas marinas y gravas retrabajadas y acumuladas por el oleaje del mar.
- Depósito antropógeno (Qh-ant): en el sitio de interés, generados sin un proceso de transformación industrial, conformado por materiales productos excedentes de construcción y material aluvial removidos en la ejecución de excavaciones.

En la **Figura 3**Figura 4 se presenta el modelo geológico 3D, en la Figura 4 la distribución en planta de las unidades descritas y en la Fotografía 5 se evidencia la granulometría expuesta en el sector de interés.

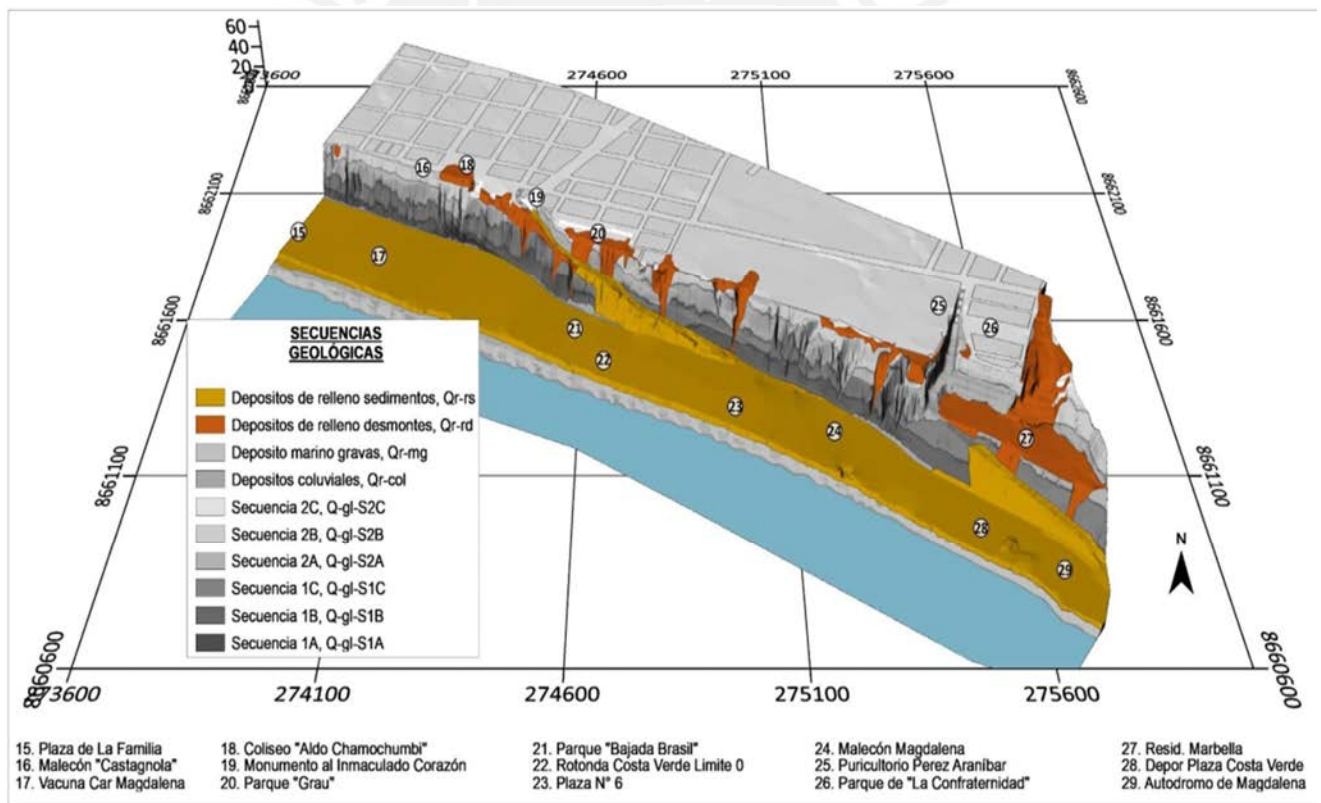


Figura 3. Modelo geológico 3D del distrito Magdalena del Mar - Malecón Castagnola (Ingemmet, 2023).

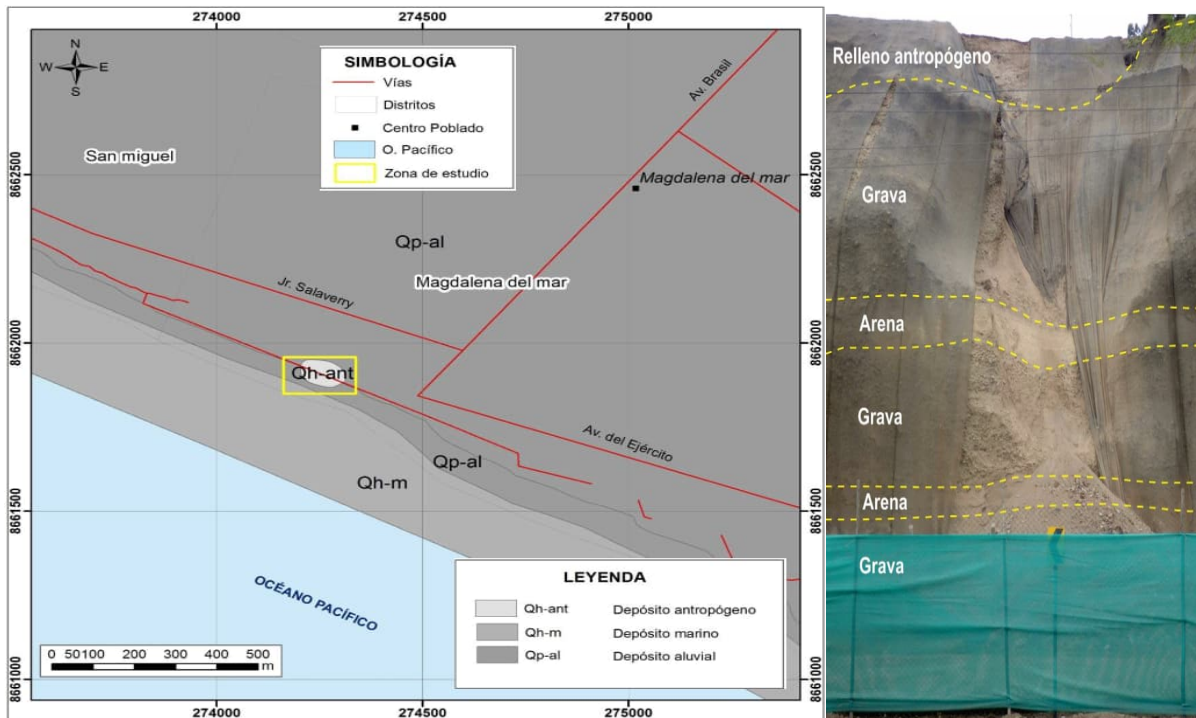


Figura 4 Izq. Mapa de unidades litológica Magdalena del Mar - Malecón Castagnola (INGEMMET, 2019).

Fotografía 5 Der. Vista frontal del acantilado de interés se evidencian niveles de grava y arena, así como el material antropógeno de la parte superior del talud (INGEMMET, 2019).

2.3.2. Geomorfología

Según Martínez Vargas (2007), algunas de las principales características geomorfológicas de la zona costera de Lima (Vargas, 2007):

- ✓ Las geoformas que conforman la zona donde se localiza Lima, son básicamente deltas de los abanicos del Río Rímac y Chillón.
- ✓ Los abanicos del río Rímac están compuestos por 1. gravas y cantos rodados formadas por rocas ígneas (principalmente granodioritas) y 2. Horizontes de material con mayor grado de alteración los cuales pueden considerarse como estratos arenosos.
- ✓ Estas geoformas, presentan terrazas y cauces antiguos sepultados, evidenciando una importante evolución del valle a lo largo del tiempo, en la **Figura 5** se presenta la distribución de terrazas identificadas en el área metropolitana de la ciudad de Lima.

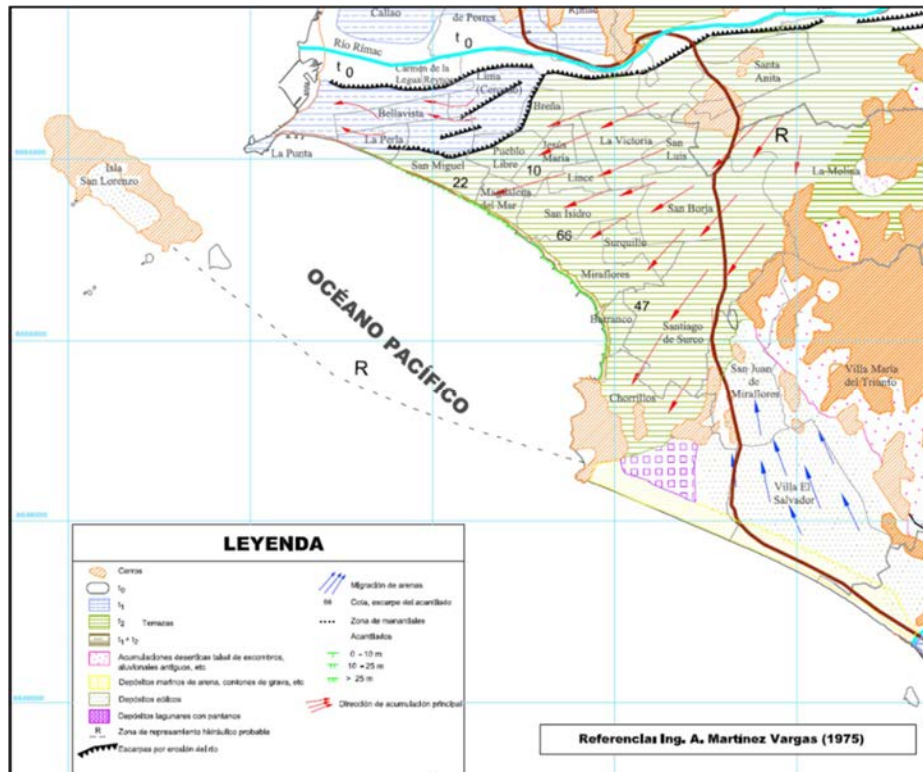


Figura 5 Izq. Mapa de contexto geomorfológico de la ciudad de Lima (Ingemmet, 2023).

- ✓ La presencia de escarpes en los acantilados de la Costa Verde, muestran una posible influencia de la erosión marina.

2.3.3. Geotecnia

Para la caracterización geotécnica se utilizó la investigación geotécnica del área de interés identificadas en la revisión de documentación técnica disponible, la cual se describe a continuación y se detalla en la Tabla 2-1:

- ✓ Levantamiento geológico detallado de la zona, con la finalidad de identificar y comprender las principales características de origen y formación de las unidades geológicas y geomorfológicas.
- ✓ 10 calicatas con profundidades de hasta 6.0m, con la finalidad de identificar el perfil estratigráfico y extraer muestras de material para realizar ensayos en laboratorio que permitan determinar características de resistencia y deformación.

- ✓ 16 ensayos de cono Peck con profundidades de hasta 16.0m, registrando valores de resistencia in-situ y muestreando material en profundidad para las zonas con resistencia moderada a baja.
- ✓ 5 líneas de refracción sísmica de 55m de longitud en superficie para obtener perfiles sísmicos del suelo hasta 30m, registrando velocidades de onda de compresión (V_p) y clasificando la rigidez de los estratos según las velocidades registradas.
- ✓ 2 ensayos análisis multicanal de ondas de superficie (MASW por sus siglas en inglés) y análisis multicanal de Microtemores (MAM por sus siglas en inglés) donde se tomaron registros de velocidades de onda de corete (V_s), así como el cálculo de otros parámetros elásticos, que permiten detallar la descripción de los estratos relacionándolos con exploración directa y la geología del sector.
- ✓ 1 tomografía de resistividad eléctrica – ERT, que permite determinar el nivel freático en el momento de ejecución del ensayo.
- ✓ 3 secciones gravimétricas, que permite inferir la densidad y por ende perfil estratigráfico del terreno hasta profundidades de 60m aproximadamente.
- ✓ 2 razones espectrales, que permiten determinar la frecuencia predominante y el periodo Natural de terreno.

Tabla 2-1 Investigación geológico – geotécnica del Malecón Castagnola

ID	Tipo	Coordenadas 18S WGS-84				Fuente	Información de interés	
		Este	Norte	Este	Norte			
Información Topográfica								
Levantamiento						(SIGRID 2020)	Curvas de nivel - DEM	
Información geología-geomorfología								
Informe Técnico A6930	Informe técnico	274200	8662000	274400	8661800	(Ingemmet 2019)	Unidades litoestratigráficas Pendiente del terreno / Unidades geomorfológicas Descripción derrumbe en el Malecón Castagnola	
		Inicio		Fin				
ID	Tipo	Este	Norte	Este	Norte	Profundidad Investigación (m)	Fuente	Parámetro
Exploración geotécnica Directa								
C-1 (CP-11)	Calicatas - Cono Peck*	274309.9	8661926.1			4 (Cono 5.2)	Expediente técnico del Proyecto: 14857-20 "Reparación de estabilizadores de suelo en los acantilados del Circuito de playas de la Costa Verde, Distrito de Magdalena del Mar".	Cohesión - C (Kg/cm ²), Ángulo de Fricción interna ϕ (°), coeficiente de presión lateral de tierras - K, Peso unitario - γ (Ton/m ³)
C-2 (CP-10)	Calicatas - Cono Peck*	274291.9	8661951.7			4 (Cono 9.5)		
C-3 (CP-9)	Calicatas - Cono Peck*	274272.4	8661938.3			6.2 (Cono 10.8)		
C-4 (CP-12)	Calicatas - Cono Peck*	274253.8	8661946.8			4 (Cono 5.1)		
C-5 (CP-16)	Calicatas - Cono Peck*	274226.3	8661960.6			4 (Cono 2.4)		
C-6 (CP-15)	Calicatas - Cono Peck*	274324.8	8661924.8			4 (Cono 2.65)		
C-7 (CP-2)	Calicatas - Cono Peck*	274281.1	8661915.3			1.2 (Cono 16.05)		
C-8 (CP-3)	Calicatas - Cono Peck*	274266.3	8661921.2			1.2 (Cono 15.6)		
C-9 (CP-4)	Calicatas - Cono Peck*	274247.7	8661929.0			1.2 (Cono 14.7)		
C-10 (CP-8)	Calicatas - Cono Peck*	274243.0	8661918.2			1.2 (Cono 13.3)		
C-11 (CP-7)	Calicatas - Cono Peck*	274262.3	8661910.2			1.2 (Cono 14.7)		
C-12	Calicatas	274279.6	8661906.0			1.0		
CP-1	Cono Peck	274301.4	8661908.1			10.2		
CP-5	Cono Peck	274291.0	8661911.8			10.2		
CP-6	Cono Peck	274279.6	8661906.0			14.4		
CP-13	Cono Peck	274311.8	8661906.2			4.8		
CP-14	Cono Peck	274219.8	8661939.3			2.7		
LS-1	LRS	274430.0	8661975.0	274302.0	8661902.0	30.0	Velocidad onda de compresión - Vp	
LS-2	LRS	274216.0	8661944.0	274322.0	8661910.0	30.0	Velocidad onda de compresión - Vp	

ID	Tipo	Coordenadas 18S WGS-84				Fuente	Información de interés
		Este	Norte	Este	Norte		
LS-3	LRS	274245.0	9662008.0	274219.0	8661938.0	30.0	Velocidad onda de compresión - Vp
C-3	Calicatas	274273.0	8661898.0			3.0	Ciudades Sostenibles C (Kg/cm ²), ϕ (°), γ (Ton/m ³)
DPSH - 03	DPSH	274254.0	8661923.0			7.2	
Exploración geotécnica Indirecta (Geofísica)							
LR01-MM	LRS	274214.0	8661938.0	274303.0	8662189.0	65.00	(I.G.P. 2020) Velocidad onda de compresión - Vp
LR02-MM	LRS	274602.0	8661684.0	274651.0	8661789.0	65.00	(I.G.P. 2020) Velocidad onda de compresión - Vp
LS03-MM	MASW - MAM	274247.0	8661777.0	274185.0	8661804.0	35.0	(I.G.P. 2020) Velocidad onda de corte - Vs
LS07-MM	MASW - MAM	274230.0	8661937.0	274293.0	8661914.0	90.0	(I.G.P. 2020) Velocidad onda de corte - Vs
LE01-MM	LE	273983.0	8662031.0	274300.0	8661900.0	80.0	(I.G.P. 2020) Nivel freático
LG01-MM	SG	273983.0	8662031.0	274300.0	8661900.0		(I.G.P. 2020) Estratigrafía
MM03-06	H/V	274222.0	8661949.0				(I.G.P. 2020) Frecuencia predominante y
MM04-06	H/V	274284.7	8661943.1				(I.G.P. 2020) Periodo Natural de terreno

* En estos ensayos sobre estratos cuya condición natural del suelo se encuentra alterada por la excavación, se espera un aumento en las desviaciones en los resultados obtenidos; esto teniendo en cuenta experiencias prácticas en geotécnica, así como lo indicado en la norma E.050 en donde explícitamente no recomienda realizar este ensayo en el fondo de excavaciones, debido a la pérdida de confinamiento. En el desarrollo del modelo geológico geotécnico, se dio mayor relevancia a los resultados de ensayos que se ejecutaron con la menor alteración del suelo insitu

Convenciones

DPSH	Penetración dinámica super pesada
LRS:	Línea de refracción sísmica
MASW- MAM:	Análisis multicanal de ondas superficiales - microtremores
LE:	Tomografía de resistividad eléctrica - ERT
SG:	Sección gravimétrica
H/V:	Razones espectrales

A continuación, se describen los resultados de la caracterización geotécnica evaluada:

Exploración Directa

Distribución Granulométrica:

Se realizaron 10 ensayos de granulometría por tamizado para profundidades entre 1.5m hasta 6.2m (ver Figura 6), en cuyos resultados se puede apreciar dos tipos de granulometrías; el primer tipo con un menor porcentaje de partículas gruesas relativamente bien gradadas (líneas azules) y un segundo tipo (líneas negras) con contenido de partículas gruesas superior al 60% con clasificación GC-GP según U.S.C.S., cuya distribución es similar a los husos granulométricos obtenidos de 266 ensayos de granulometría distribuidos por el área metropolitana de Lima (Sanchez Rodriguez & Maria, 2016).

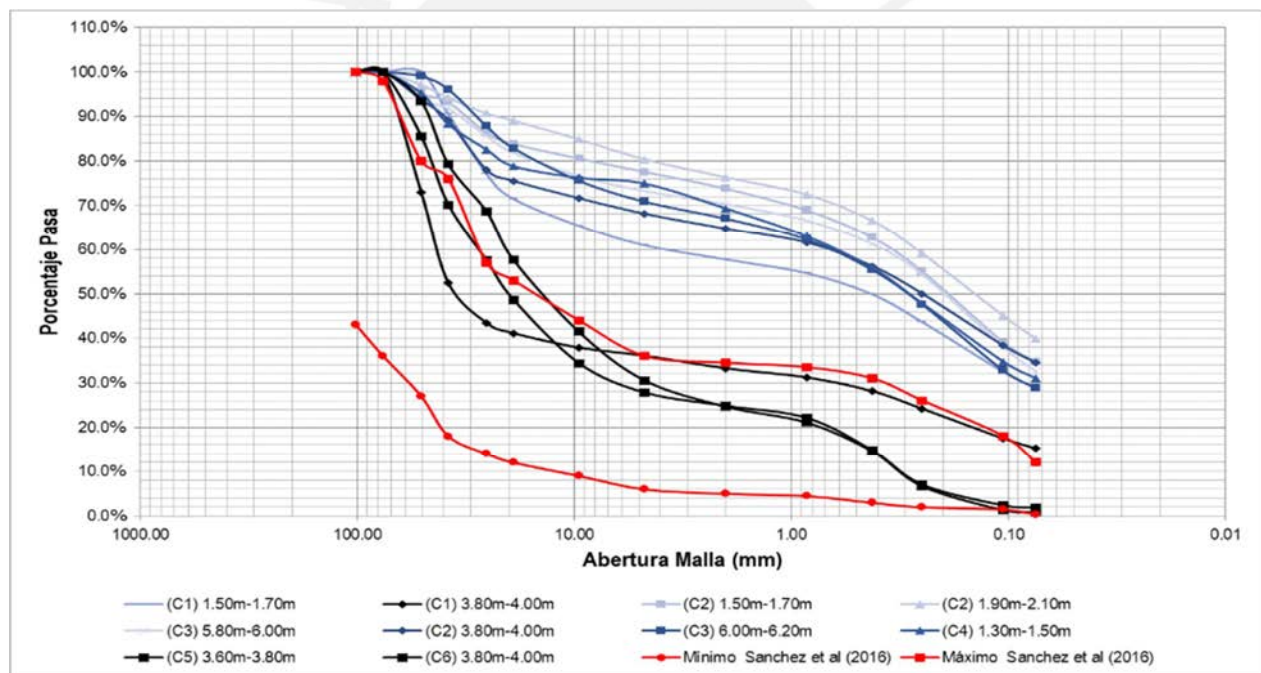


Figura 6 Resultados ensayos de granulometría por tamizado ejecutados en Malecón Castagnola (GSAQ SAC., 2020)

Los resultados presentados en la Figura 5 han sido limitados a un tamaño de partícula de 10 cm, sin embargo, considerado lo mostrado por (Sanchez Rodriguez & Maria, 2016) se debe considerar que, a profundidades superiores a 6.0m es posible encontrar partículas con tamaño superior por ejemplo fragmentos o bloques.

Análisis de agresividad del suelo.

Con base en la norma ACI 318, para la protección de concretos reforzados a diferentes agentes externos e internos que afectan la durabilidad de este, se definen los siguientes parámetros de evaluación y rangos tanto para el uso de tipo de cemento, como las características mínimas que la mezcla de concreto debe cumplir. La evaluación se basa en las normas “*Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05)*”, el cual es un documento del Instituto Americano del Concreto (2005).

Sulfatos: Se define un rango de afectación debido a la contaminación por concentraciones de sulfatos en el suelo de fundación y en el agua, mínimo de acuerdo con la Tabla 2-2.

Tabla 2-2 Influencia de Sulfatos.

EXPOSICIÓN A SULFATOS	SULFATOS SOLUBLES EN AGUA (SO ₄) PRESENTES EN EL SUELO, % PESO	SULFATOS (SO ₄) EN EL AGUA, ppm	TIPO DE CEMENTO	RELACIÓN AGUA CEMENTO (A/C)	RESISTENCIA DEL CONCRETO (MPa)
Insignificante	$0.0 \leq SO_4 < 0.1$	$0.0 \leq SO_4 < 150$	I	0.50	21
Moderada	$0.1 \leq SO_4 < 0.2$	$150 \leq SO_4 < 1500$	II	0.50	28
Severa	$0.2 \leq SO_4 < 2.0$	$1500 \leq SO_4 < 10000$	V	0.45	31
Muy severa	$2.0 < SO_4$	$10000 < SO_4$	V + Puzolanas	0.45	31

Fuente: ACI 318S-05

Exposición especial: Se define la clasificación de acuerdo con la exposición a condiciones de humedad o saturación y afectación por cloruros en el suelo de fundación como se muestra en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3 Condiciones de exposición especial.

DESCRIPCIÓN	EXPOSICIÓN	DE IONES CLORUROS (CL) SUELO, % PESO	TIPO DE CEMENTO	RELACIÓN AGUA CEMENTO (A/C)	RESISTENCIA CONCRETO (MPa)
Concreto sin humedad o saturación y sin o con presencia de cloruros	Insignificante	-	I	0.5	21
Concreto con humedad o saturación y sin o con presencia de cloruros	Moderada	$Cl < 0.1$	I	0.5	28
Concreto con humedad o saturación y con presencia de cloruros	Severa	$Cl \geq 0.1$	-	0.4	35

Fuente: ACI 318S-05

Con la finalidad de valorar la agresividad del suelo, se realizaron ensayos de contenido de sulfatos y cloruros en muestras alteradas (según normas NTP 339.178:2002 y NTP 339.177:2002 respectivamente), cuyos resultados se muestran en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4 Valores máximos registrados en ensayos de durabilidad (contenido de sulfatos y cloruros solubles en muestras de suelos).

ID	Sumergencia	Cloruros (ppm Cl-)	Cloruros (%peso)	Sulfatos (ppm Cl-)	Concreto Diseño		
					Tipo de cemento	Relación agua/cemento	Resistencia del concreto [MPa]
C-1 (CP-11)	SECA	708	<0,1	6241	V	0.45	31
C-2 (CP-10)	SECA	242	<0,1	4149	V	0.45	31

Con base en los resultados obtenidos que se muestran en la Tabla 2-4, se registraron suelos con valores de sulfatos y cloruros dentro del rango considerado como exposición severa, por lo cual se recomienda que los concretos a utilizar contemplen cemento Tipo V o equivalente con relación agua cemento de 0.45 y una resistencia específica a la compresión (f'_c) de 31MPa, siguiendo los lineamientos de la norma internacional ACI318.

El resumen de los resultados de la caracterización en laboratorio y del procesamiento de la información de campo, se presentan en la Tabla 2-5.

Tabla 2-5 Resumen registro exploración directa

PARÁMETRO	GRAVA ARENOSA MEDIANAMENTE DENSA			GRAVA ARENOSA DENSA / COMPACTA		
	Valores			Valores		
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Promedio	Máximo
Descripción	Estrato conformado por capa Grava arenosa con algo de arcilla (finos de baja plasticidad), suelta, seca y de color marrón, así como arena arcillosa con grava, color marrón con presencia de piedras y bolones subredondeados de 6" tamaño máximo. Presencia de escombros de construcción (plásticos, vidrio, concreto).			Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plumizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa. Con presencia de piedras y bolones redondeados de 12" tamaño máximo. Típico del depósito del río Rimac.		
Clasificación USCS	GC/GM			GP		
Variación en Profundidad	0m-16m			3m-50m		
Porcentaje de Gravas, %G [%]	20.0%	42.0%	64.0%	69.0%	70.5%	72.0%
Porcentaje de Arenas, %S [%]	21.0%	32.5%	44.0%	26.0%	28.0%	30.0%
Arena Gruesa N.10 - N.4 [Fracción del %S]	7.3%	10.5%	13.7%	11.6%	15.8%	19.9%
Arena Media N.40 - N.10 [Fracción del %S]	22.0%	26.3%	30.5%	33.7%	36.2%	38.6%
A. Fina N.200 - N.40 [Fracción del %S]	56.6%	63.7%	70.7%	46.4%	48.1%	49.8%
Porcentaje de Finos, %F [%]	15.0%	27.5%	40.0%	1.0%	1.5%	2.0%
Humedad natural, w_n [%]	4.4%	7.2%	10.0%	0.5%	0.8%	1.0%
Limite Líquido, LL - (Fracción Fina)	22.0	23.5	25.0	-	-	-
Limite Plástico, LP - (Fracción Fina)	13.0	13.5	14.0	N.L.	N.L.	N.L.
Índice de plasticidad, IP -(Fracción Fina)	9.0	10.0	11.0	N.P.	N.P.	N.P.
Peso Unitario total, γ_t [Tn/m ³]	1.8	1.9	1.9	2.0	2.1	2.2
Cohesión, c [kPa]	23.0	34.0	45.0	10.0	40.5	71.0
Ángulo de fricción interna, ϕ' [°]	30.4	32.8	35.1	34.0	38.8	43.5

Fuente: Expediente técnico del Proyecto: 14857-20 (Ver Anexo a).

Adicionalmente, con el fin de considerar parámetros elásticos en el análisis del perfil estratigráfico del sector de interés, se compilaron los ensayos geo-sísmicos o exploración indirecta disponibles en cercanía, lo cual se describe a continuación:

Exploración Indirecta – Geofísica

Tomografía de refracción sísmica y análisis MASW y MAM:

Para el sitio de interés se tuvo acceso a los resultados de ensayos de tomografía de refracción sísmica (LRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales y de Microtremores (MASW y MAM), en los cuales se presentan los perfiles de velocidad de onda compresional (V_p) y de corte (V_s). En la Figura 7 se presenta el perfil de velocidad de onda de compresión V_p resultado de la tomografía de refracción sísmica y el perfil de velocidad de ondas de corte resultado de los ensayos MASW-MAM 1D ejecutados (Bernal & Tavera, 2020).

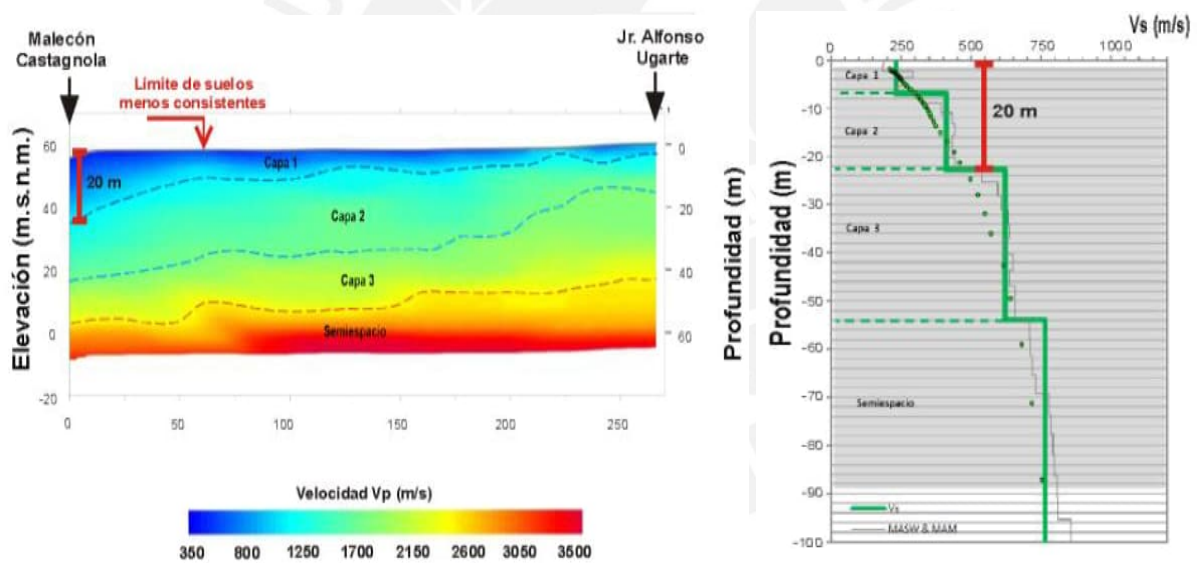


Figura 7 Izq. Tomografía de refracción sísmica LR01-MM. Der. Perfil de velocidad de onda de corte V_s LS07-MM - Malecón Castagnola (Bernal & Tavera, 2020).

Considerando las líneas de refracción sísmica y los ensayos MASW (Bernal & Tavera, 2020), es posible identificar que en la zona se tiene un primer estrato de baja rigidez que se extiende hasta los primeros 7.0m, que muestra valores de V_s cercanos a 230m/s y V_p que oscilan entre 350 y 1000m/s; seguido a esto se tiene un estrato homogéneo hasta los 23m de profundidad donde se evidencia un aumento de la rigidez del suelo, alcanzando valor de V_s de 400m/s y V_p que oscilan

entre 1000-1800m/s. Posteriormente, se tiene una capa de aproximadamente 30m de espesor, con mayor consistencia ya que alcanza Vs de 620m/s y Vp entre 1800-2400.

El resumen de los resultados de la exploración indirecta se presenta en la Tabla 2-6:

Tabla 2-6 Registro exploración indirecta

Prof. (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Vs30 (m/s)	Descripción (relación con exploración directa y geología)
0-7	350-1100	231	367	GRAVA ARENOSA MEDIANAMENTE DENSA: Estrato conformados por capa Grava arenosa con algo de arcilla. Estrato moderadamente rígido en superficie, parámetro que se incrementa en profundidad.
7-33.	1100-1800	411		GRAVA ARENOSA DENSA / COMPACTA: Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plumizo.
33-50	1800-2400	622		GRAVA RIGIDA: Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plumizo. Estrato rígido.
>50	2400-3500	764		GRAVA MUY RIGIDA: Estrato muy rígido o roca blanda - Semi espacio

Relaciones espectrales (H/V):

En la periferia del área de estudio (aprox. A 40m) se realizaron dos registros de relaciones espectrales, los cuales se presentan en la Figura 8.

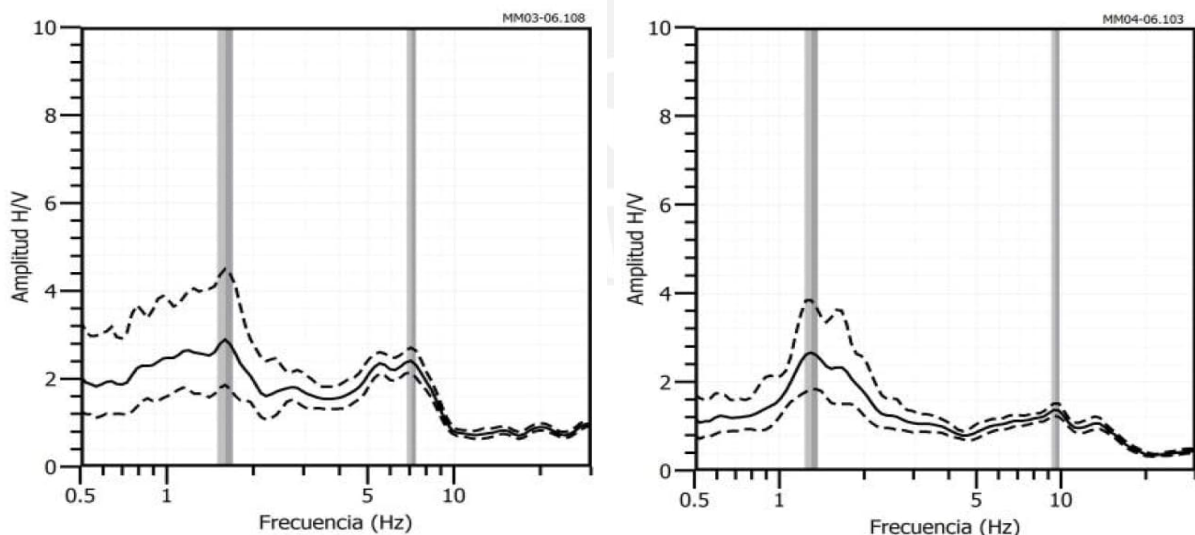


Figura 8 Izq. Resultado Razón Espectral (H/V) MM03-06. Der. Resultado Razón Espectral (H/V) MM04-06
(Bernal & Tavera, 2020).

Nota: Valor medio en línea gruesa y desviación estándar en líneas discontinuas

Tabla 2-7 Frecuencia y Periodo predominante

ID	Frecuencia predominante <2.0 Hz - F0 (Hz)	Periodo natural - T0 (seg)	Amplitud (H/V)
MM03-06	1.59	0.63	2.8
MM04-06	1.29	0.78	2.6

Estos resultados nos permiten caracterizar la respuesta dinámica del suelo analizado (identificando la frecuencia predominante del mismo está entre 1.3 y 1.59 hz asociada un periodo natural que estará entre 0.63 y 0.78 segundos); así mismo, permite estimar la amplificación esperada ante sollicitaciones sísmicas (entre 2.6 y 2.8 considerada moderadas al ser <3 veces) (Bernal & Tavera, 2020).

Dentro del estudio (Bernal & Tavera, 2020), se recomienda considerar los siguientes criterios para analizar los resultados del método de relaciones espectrales:

- Las bajas frecuencias o periodos largos son debidas a la presencia de depósitos profundos.
- Las frecuencias altas o periodos cortos son debidos a depósitos superficiales blandos y de poco espesor.

2.3.4. Detonantes de inestabilidad

En la literatura técnica disponible, se han identificado análisis cuyo objetivo principal es la definición de las características más representativas para la evaluación de estabilidad de los acantilados de la Costa Verde, de los cuales podemos rescatar:

- ✓ (Carrillo Gil, 1979) indica que, en gran parte de los casos estudiados, se tiene un mecanismo de falla planar (sin momentos que tiendan a causar rotación de la masa movilizada), cuya superficie es paralela a la superficie del talud. Así mismo dicho mecanismo presenta dos grietas de tensión verticales que pueden estar o no llenas de agua; la primera localizada entre 2 y 4m desde la corona del talud y la segunda entre 10 y 20m.
- ✓ (Vargas, 2007) indica que, en muchas de los sitios con procesos de inestabilidad en los acantilados de la Costa Verde, se ha identificado preexistencia de eventos geomorfológicos como depósitos eólicos sepultados por sedimentos fluviales o aluvionales. En algunas zonas del litoral, se han propuesto distribuciones estratigráficas heterogéneas y superficies de falla (planares y compuestas) como la presentada en la Figura 9.

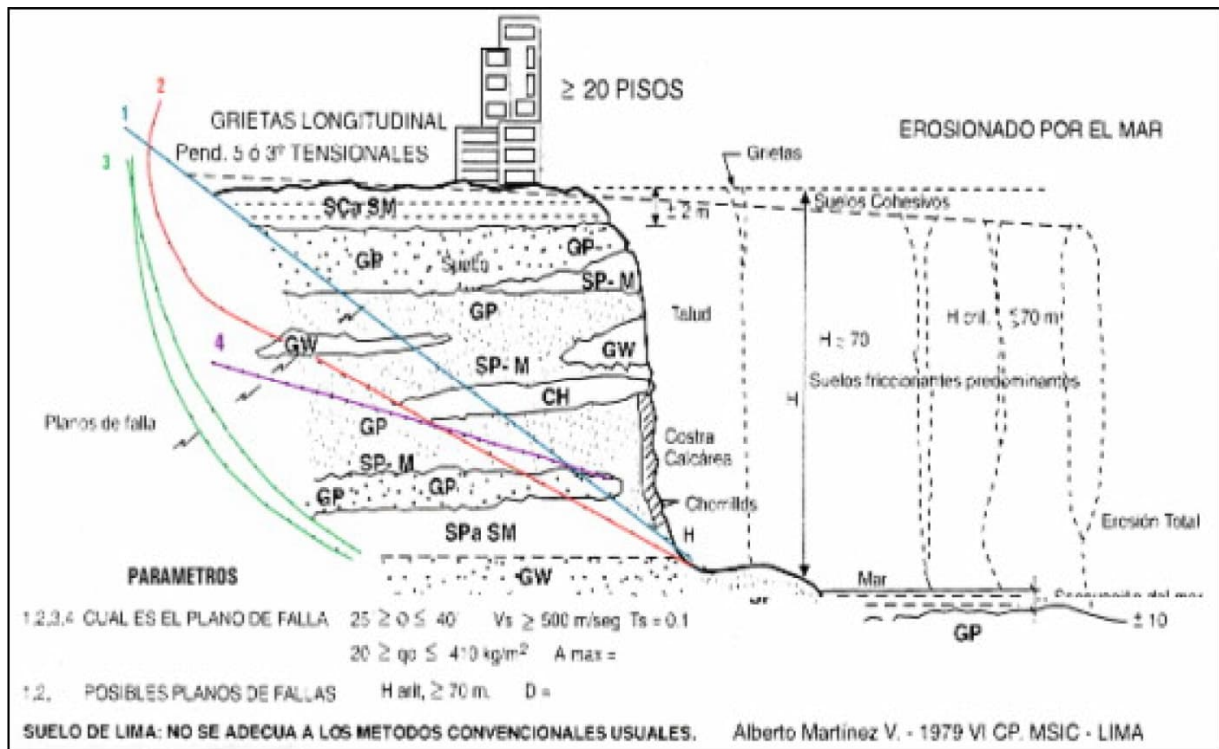


Figura 9 Corte transversal típico de la ladera de la Costa Verde - Martínez Vargas (2007).

En términos generales, los principales factores que aportan a las condiciones de inestabilidad de los acantilados de la Costa Verde, tal como lo indica autores como Villacorta et al (2015) Guzman et al (1998) Carrillo Gil (1994), son los siguientes:

- ✓ Pendiente, tanto de laderas naturales como taludes de corte que en algunos casos se encuentran entre 60° y 90° con respecto a la horizontal.
- ✓ Estratos que en superficie presentan baja compacidad con alta humedad, principalmente por flujos subsuperficiales generado por filtraciones del sistema de agua y desagüe.
- ✓ Presencia de lentes de material finos poco consolidados en forma de capas intercalados en el conglomerado.
- ✓ Presencia de rellenos antrópicos en la corona y pie de laderas.
- ✓ Efecto del retroceso del litoral debido a la erosión marina.
- ✓ Efecto de vibración del suelo debido a sismos severos.

Parámetros geotécnicos iniciales.

Teniendo en cuenta la investigación geotécnica descrita anteriormente, así como los parámetros de resistencia definidos para la grava de Lima extraídos de la literatura técnica disponible (Ver Anexo A “Parámetros Grava Lima”), se definieron parámetros iniciales del modelo geológico geotécnico propuesto en el presente trabajo de grado, los cuales se presentan en la Tabla 2-8:

Tabla 2-8 Parámetros geotécnicos iniciales

PARÁMETROS INICIALES	GRAVA ARENOSA MEDIANAMENTE DENSA	GRAVA ARENOSA DENSA / COMPACTA	GRAVA RIGIDA	GRAVA MUY RIGIDA	ARENA FINA MEDIO DENSA
Descripción	Estrato conformado por capa Grava arenosa con algo de arcilla (finos de baja plasticidad), suelta, seca y de color marrón, así como arena arcillosa con grava, color marrón con presencia de piedras y bolones subredondeados de 6" tamaño máximo.	Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plumizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa. Con presencia de piedras y bolones redondeados de 12" tamaño máximo.	Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plumizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa. Con presencia de piedras y bolones redondeados de 12" tamaño máximo.	Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plumizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa.	Arena fina a media, con contenido variable de limo y arcilla, medianamente densa a densa.
Variación en Profundidad	0m-16m	16-36m	36m-45m	>45m	Variable
Clasificación USCS	GC/GM	GC/GM	GC/GM	GC/GM	SP
Peso Unitario total, γ_t [kN/m ³]	19	21	22	22	19
Cohesión, c [kPa]	23	28	35	40	20
Ángulo de fricción interna, ϕ' [°]	39	44	42	40	35
Módulo de Young E [kN/m ²]	1.200E+05	1.500E+05	1.000E+06	1.500E+06	-
Módulo de Poisson, ν [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	-

Análisis de sensibilidad.

Con el fin de validar la coherencia de los parámetros de resistencia considerados inicialmente (Tabla 2-8) y definir los parámetros de diseño a utilizar en el presente trabajo de grado, se realizó un análisis de sensibilidad, el cual tomo como base la topografía levantada por el consultor GCAQ a escala 1:250 (Figura 10), y en el cual se procedió a realizar la evaluación de estabilidad mediante la teoría de equilibrio límite, utilizando las secciones 4-4 y 5-5 que se muestran en la Figura 11 y Figura 12 respectivamente, considerando que este sector es de especial interés debido a la sobrecarga externa dada la existencia de edificaciones en la parte alta de la ladera estudiada.

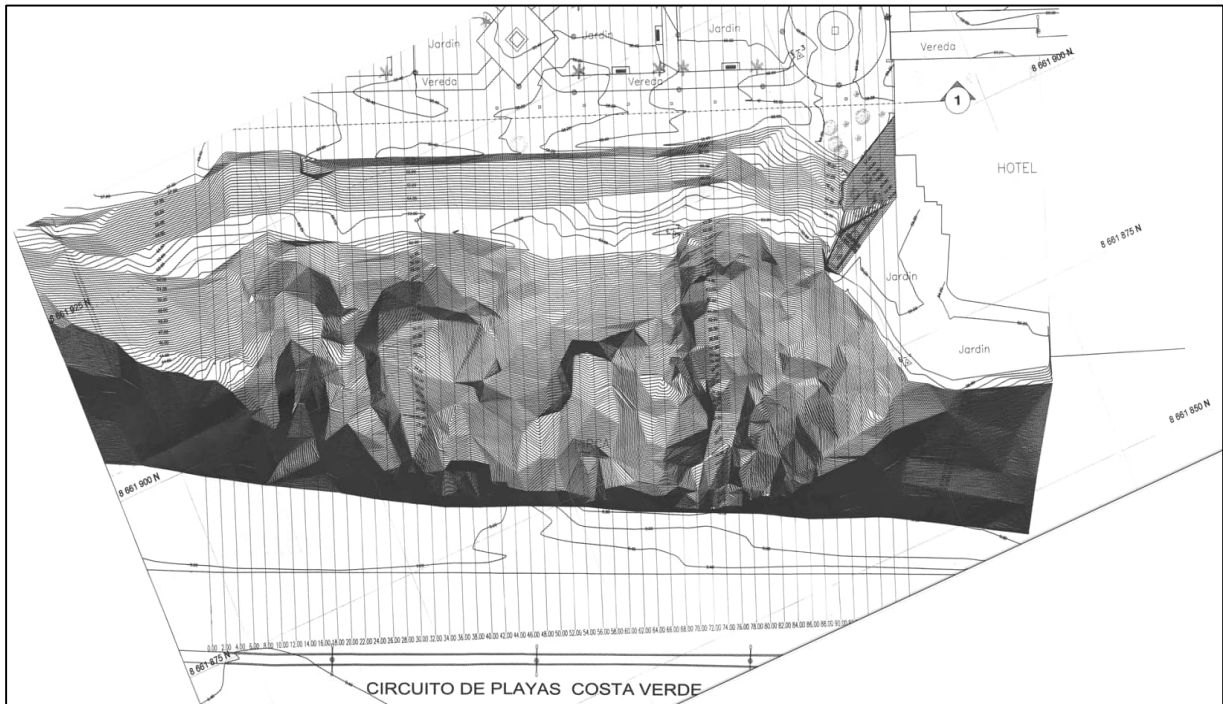


Figura 10 Levantamiento topográfico Malecón Castagnola - Vista en planta antes de estabilización (Terreno Natural) Fuente: Expediente técnico del Proyecto: 14857-20 (Ver Anexo a).

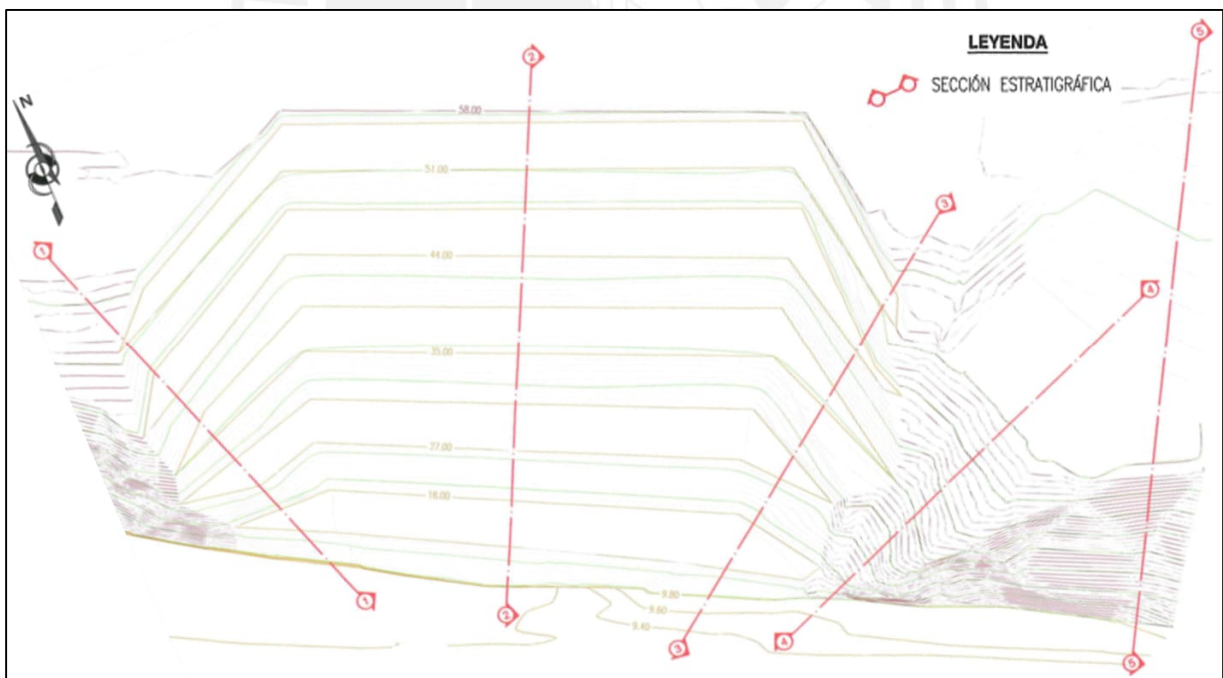


Figura 11 Levantamiento topográfico Malecón Castagnola - Vista en planta después de estabilización (Terreno Natural en las secciones 4-4 y 5-5) Fuente: Expediente técnico del Proyecto: 14857-20 (Ver Anexo a).

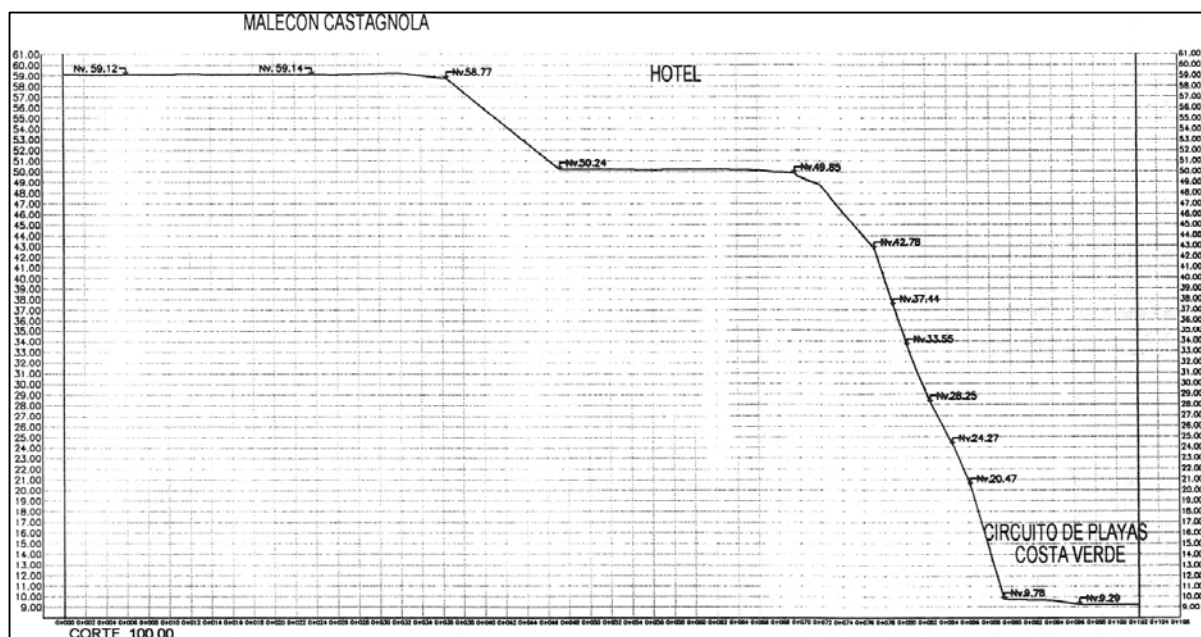


Figura 12 Levantamiento topográfico Malecón Castagnola - Vista en alzado (Terreno Natural en la sección 5-5)
Fuente: Expediente técnico del Proyecto: 14857-20 (Ver Anexo a).

El análisis de sensibilidad se realizó mediante la herramienta Slide de Rocscience Inc., empleando los métodos de Bishop, Janbu corregido y Spencer bajo las siguientes hipótesis:

- ✓ El material analizado presentará una superficie de falla cuya resistencia al corte puede ser correctamente descrita con el modelo Mohr Coulomb.
- ✓ Superficie de falla en bloque y circular (solamente condiciones finales).
- ✓ Presión hidrostática mediante el coeficiente ru variando entre 0.0 y 0.2. Estos valores se estimaron considerando que uno de los principales aspectos generadores de procesos de inestabilidad es la infiltración superficial generada por fugas en los sistemas de acueducto o el riego no controlado de las áreas verdes muy comunes en la parte alta de los acantilados estudiados.
- ✓ Se realizaron los análisis en condición estática, sin considerar el efecto del sismo debido a que en la literatura disponible (reportes oficiales de Ingemmet) no hay evidencia que permita relación la actividad sísmica con la falla de la ladera.
- ✓ Se incluyó las solicitaciones correspondientes a las cargas transmitidas por las estructuras localizadas en la corona de los acantilados de la costa Verde.

Utilizando los parámetros de resistencia iniciales (Tabla 2-8), se obtuvieron los factores de seguridad para diferentes escenarios los cuales se presentan en la Tabla 2-9.

Tabla 2-9 Resumen Factores de seguridad –parámetros de resistencia inicial

Condición		Sobrecarga	Sección de análisis	Sismo Considerado	Factor de seguridad	
					Falla Local	Falla Global
ID	Descripción					
1	Estática Falla Circular (Considera sobrecarga a compresión)	q _v = q _H =	4-4	NO	1.604	1.273
			5-5		1.206	1.034
2	Estática Falla Bloque (Considera sobrecarga a compresión)	q _v = q _H =	4-4	NO	3.054	2.59
			5-5		1.206	1.076

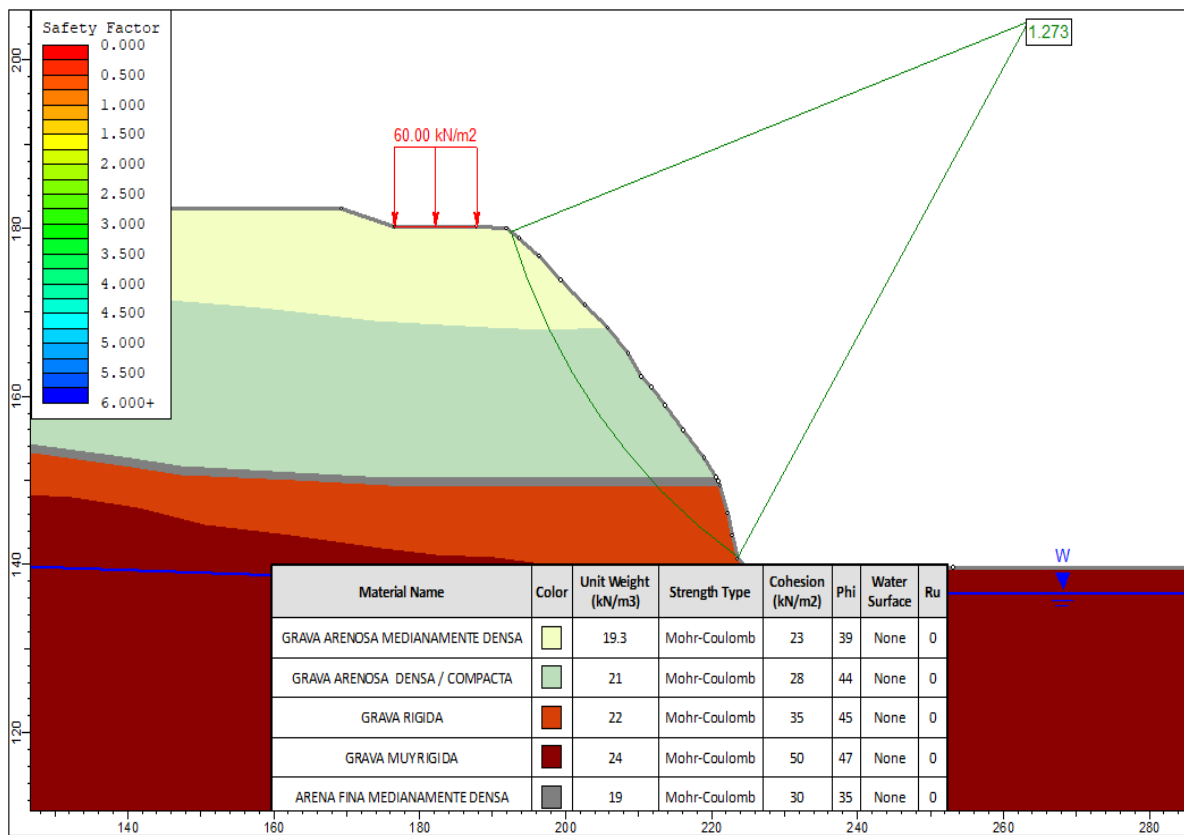


Figura 13 Análisis de estabilidad con parámetros geotécnicos iniciales - Estático.

En el Anexo b, se presentan los archivos slim (Slide de Rocscience Inc., versión 6.0) con las modelaciones realizadas, así como el resumen de los resultados.

Los parámetros presentados en la Tabla 2-8, fueron determinados como los mínimos requeridos para que las secciones de análisis (4-4, 5-5) presenten un factor de seguridad superior a la unidad, contemplando el escenario estático y falla circular, al considerarlo como un escenario característico y de mayor nivel de ocurrencia.

Tabla 2-10 Parámetros de resistencia de Diseño

PARÁMETROS INICIALES	GRAVA ARENOSA MEDIANAMENTE DENSA	GRAVA ARENOSA DENSA / COMPACTA	GRAVA RIGIDA	GRAVA MUY RIGIDA	ARENA FINA MEDIO DENSA
Descripción	Estrato conformado por capa Grava arenosa con algo de arcilla (finos de baja plasticidad), suelta, seca y de color marrón, así como arena arcillosa con grava, color marrón con presencia de piedras y bolones subredondeados de 6" tamaño máximo.	Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plumizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa. Con presencia de piedras y bolones redondeados de 12" tamaño máximo.	Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plumizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa. Con presencia de piedras y bolones redondeados de 12" tamaño máximo.	Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plumizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa.	Arena fina a media, con contenido variable de limo y arcilla, medianamente densa a densa.
Variación en Profundidad	0m-16m	16-36m	36m-45m	>45m	Variable
Clasificación USCS	GC/GM	GC/GM	GC/GM	GC/GM	SP
Peso Unitario total, γ_t [kN/m ³]	19	21	22	22	19
Cohesión, c [kPa]	30	35	38	40	30
Ángulo de fricción interna, ϕ' [°]	35	40	40	38	35
Ángulo de dilatación, ψ [°]	6	8	10	10	
Módulo de Young E [kN/m ²]	1.200E+05	1.500E+05	1.000E+06	1.500E+06	-
Módulo de Poisson, ν [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	-

Los parámetros de resistencia indicados en la Tabla 2-10, están dentro del rango de resultados obtenidos en campo y laboratorio por diferentes autores, como se puede confirmar en la y en el Anexo A del presente trabajo de grado.

Tabla 2-11 Compilación de parámetros de resistencia de la Grava de Lima

Referencia	Clasificación SUCS	Cohesión, c [kPa]		Ángulo de fricción interna a volumen constante, ϕ'_{vc} [°]		Tipo de ensayo
		Min	Max.	Min	Max.	
(Carrillo Gil, 1979)	GP	40.0	80.0	36.0	42.0	
(Carrillo Gil, 1979)	GP	33.0	47.0	34.0	38.0	CD-B
(S. Sanchez, 2015)	GP	10.0	64.0	34.0	43.5	CD-B
Banco de la Vivienda Cercado de Lima (Cañari, 2001))	GP	40.0	40.0	40.0	40.0	CD-B
Beneficencia de Lima Cercado de Lima (Cañari, 2001)	GP	60.0	60.0	37.0	37.0	CD-B
Malecón de la Marina Miraflores (Cañari, 2001)	GP	55.0	55.0	39.9	39.9	CD-B
Intercambio Vial Cercado de Lima (Cañari, 2001)	GM	15.0	15.0	34.0	34.0	CD-B
(Alva 2008)		10.0	27.0	35.0	43.5	CD-B
Hotel Larcomar (Alva 2009)	GP	10.0	20.0	35.0	40.0	CD-B
(L. Raygada 2011)		20.0	35.0	40.0	40.0	CD-B
(Malecón La Marina - CISMID 1997)	GP	55.0	55.0	40.0	40.0	CD-B
(Grava de Lima - Geofrontier 2018)	GP	43.0	71.0	42.3	50.0	CD-B
Ate Vitarte CISMID, 2014	GP	50.0	50.0	48.5	48.5	CD-B
Ate Vitarte CISMID, 2014	GP	57.0	57.0	40.0	40.0	CD-B
Ate Vitarte Geo-Frontier, 2015	GW	79.0	79.0	48.3	48.3	CD-B

Referencia	Clasificación SUCS	Cohesión, c [kPa]		Ángulo de fricción interna a volumen constante, ϕ'_{ve} [°]		Tipo de ensayo
Ate Vitarte Geo-Frontier, 2015	GP	60.0	60.0	46.7	46.7	CD-B
Ate Vitarte Geo-Frontier, 2015	GW	60.0	60.0	46.0	46.0	CD-B
Ate Vitarte Geo-Frontier, 2015	GP	55.0	55.0	44.0	44.0	CD-B
Ate Vitarte Geo-Frontier, 2015	GP	47.0	47.0	49.5	49.5	CD-B
Barranco Granados, 2006	GP	46.0	46.0	44.0	44.0	CD-B
Barranco Ciudad Sost, 2014	GM,GP	16.0	16.0	39.0	39.0	TX
Barranco Granados, 2006	ML-CL	40.0	40.0	20.0	20.0	TX
Breña Geo-Frontier, 2015	GP	43.0	43.0	49.2	49.2	CD-B
Magdalena del Mar Díaz, 2008	GP	78.5	78.5	40.0	40.0	CD-B
Magdalena del Mar Ciudad Sost, 2014	GP-GM	20.0	20.0	35.0	35.0	TX
Magdalena del Mar Oviedo	GP	60.0	60.0	39.0	39.0	CD-B
Magdalena del Mar CISMID, 2017	GP	78.5	78.5	40.0	40.0	TX
Magdalena del Mar CISMID, 2017	GP	24.5	24.5	46.0	46.0	CD-B
San Miguel Ciudad Sost, 2014	GP-GM	90.0	90.0	22.3	22.3	TX
San Miguel Geo-Frontier, 2015	GW	24.0	24.0	41.0	41.0	CD-B
San Miguel Geo-Frontier, 2015	GP	37.0	37.0	44.7	44.7	CD-B
San Miguel Geo-Frontier, 2015	GP	27.0	27.0	47.7	47.7	CD-B

Nota: TX: Ensayo de Compresión Triaxial, CD-B: Ensayo de Corte Directo In-Situ o Gran Escala

2.4. Estabilización de laderas con pilotes:

Uno de los usos para elementos como pilotes, pilas o micropilotes, es actuar como elementos de resistencia a esfuerzos laterales en laderas inestables; este caso se esquematiza en la Figura 14, donde se muestra como parte de los esfuerzos provenientes de la masa de suelo movilizada, son contrarrestados por la parte inferior de los pilotes aumentando el factor de seguridad para el análisis de estabilidad (FHWA, 2010).

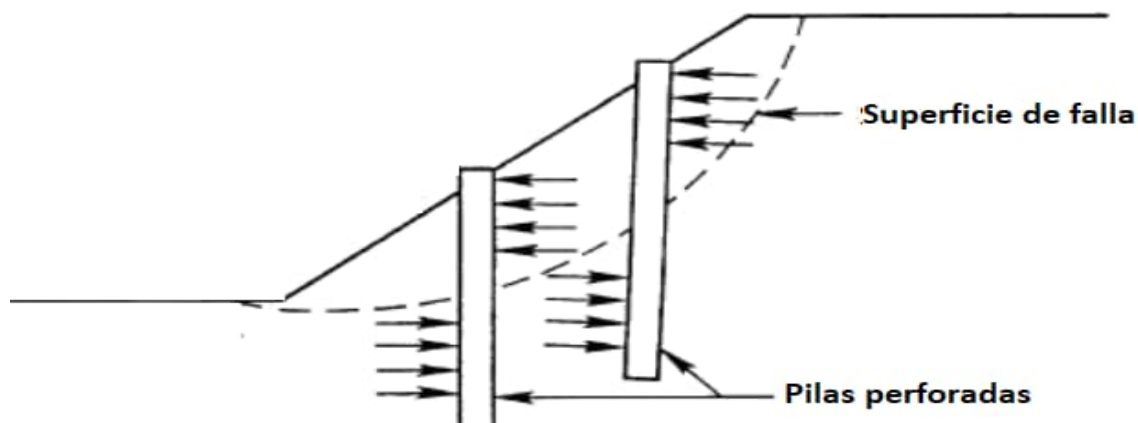


Figura 14 Pilotes perforados para estabilización de deslizamientos (Modificado de Reese et al., 1987) (FHWA, 2010).

Diferentes autores, proponen que para este caso los pilotes deben considerarse como elementos pasivos debido a que están sometidos a cargas laterales a lo largo la longitud por encima de la superficie de falla generadas por la presión de tierras del suelo movilizado (Cheng , Y., & Lau, 2014) y que la porción de pila bajo la superficie de falla debe diseñarse de tal forma que pueda resistir la carga lateral aplicada sin alcanzar deflexiones ni momentos flectores excesivos.

Según lo anterior, el proceso de diseño, deberá considerar los siguientes chequeos (FHWA, 2010):

- Estado límite de resistencia geotécnica, donde se evalúa que la pila tenga dimensiones (diámetro y una profundidad de empotramiento) adecuadas para resistir las cargas aplicadas sin llegar a la falla (volcamiento).
- Estado límite de resistencia estructural, donde se evalúa que la pila tenga dimensiones y reforzamiento suficientes para resistir las solicitaciones de diseño a las cuales estará sometida (esfuerzos axiales, cortantes y momentos flectores).
- Estado límite de servicio, donde se evalúa que la pila bajo las condiciones de carga de servicio presente deformaciones laterales dentro del margen permisible.

A continuación, se indican los aspectos principales para tener en cuenta en el análisis:

Respuesta del suelo: Un parámetro que depende de las propiedades del suelo analizado y que se utiliza para analizar pilotes cargados lateralmente, es el módulo de reacción (E_{py}), el cual se define como la resistencia que presenta el suelo a una profundidad determinada de la pila dividida por la deflexión de la pila en dicho punto, y puede ser calculado como la pendiente de la línea secante a la curva carga-deformación (p - y). En la Figura 15, se evidencia que para una profundidad dada, el módulo E_{py} es constante a pequeñas deformaciones y decrece en tanto aumenta la deformación (Reese, et al., 2011).

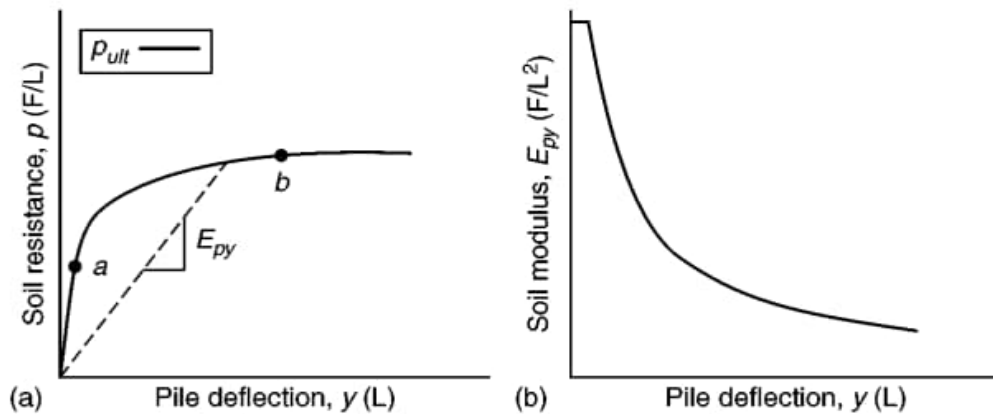


Figura 15 (a) Curva típica p-y. (b) Variación del módulo de reacción (E_{py}) con respecto a la deflexión (Reese, et al., 2011).

En diferentes investigaciones, se han propuesto las siguientes expresiones para estimar el módulo de reacción dependiendo de las características del suelo:

Tabla 2-12 Expresiones para estimar el módulo de reacción

Tipo de suelo	Expresión recomendada	Fuente
Arcillas	$E_{py} = a_1 c_u (MN/m^3)^*$	(Poulos & Davis, 1990)
Arcillas sobre consolidadas	$E_{py} = 2N (MPa/m)^{**}$	(Poulos & Davis, 1990)
Arenas	$E_{py} = N_h z^{***}$	(Poulos & Davis, 1990)
Arenas sueltas y secas	$E_{py} = 0.95 a 2.8 (MN/m^3)$	(Terzagui)
Arenas medianamente densas y secas	$E_{py} = 3.5 a 10.9 (MN/m^3)$	(Terzagui)
Arenas densas y secas	$E_{py} = 13.8 a 27.7 (MN/m^3)$	(Terzagui)

*La constante a_1 típicamente presenta valores entre 150 y 400 Fuente: Poulos and Davis 1980 – Banerjee and Davis 1978.

** N 45 del ensayo SPT.

*** Para arenas sueltas, medianamente sueltas y densas, se tiene 1.5, 5.0 y 12.5MPa/m respectivamente para valores típicos de N_h . Fuente: (Decourt 1991).

Mecanismos de falla: Se han identificado los tres posibles modos de falla que se describen a continuación (Kanagasabai et al., 2011):

- Falla como pila corta, considerando que la pila no logra un empotramiento suficiente en suelo estable. Se asume que la pila arrastrada por la masa de suelo movilizad, cuya superficie de falla ocurre cerca a la profundidad de empotramiento del elemento de contención, por lo tanto, el empuje de tierras en la pila sobre la superficie de falla no alcanza el valor último (valor desconocido).
- Falla por rotación de cuerpo rígido (intermedia), con dos puntos en los cuales la dirección del movimiento relativo pila-suelo cambia, uno abajo y otro arriba del plano de falla. Se

asume que el suelo falla en toda la profundidad de la pila y tanto la distribución de esfuerzo de corte como momento flector pueden ser calculadas.

- c) Falla por flujo, en donde la pila alcanza una profundidad suficiente bajo la superficie de falla que le permite una condición de empotramiento y experimenta un deslizamiento (flujo) de suelo alrededor de la sección superior de la pila. La presión lateral por metro que ejerce el suelo sobre la pila y el momento flector pueden ser calculados solamente en la porción que se encuentra sobre la superficie de falla mediante el uso de ciertas consideraciones de equilibrio límite.

En la Figura 16, se representan los posibles mecanismos de falla descritos anteriormente:

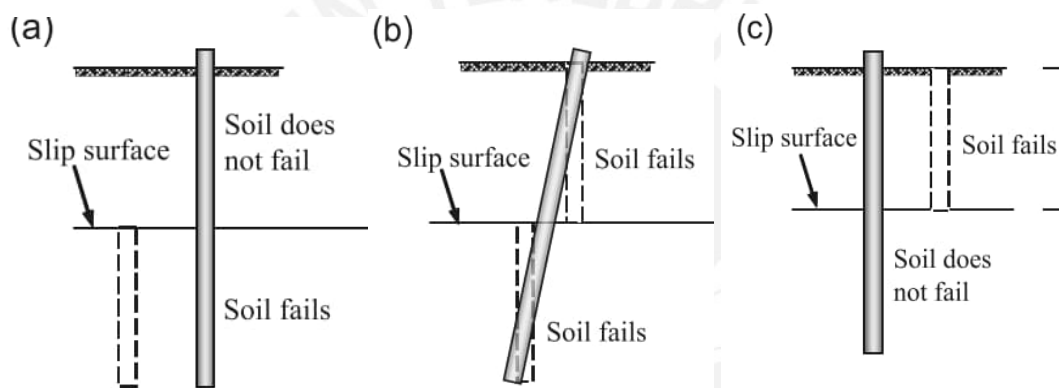


Figura 16 Mecanismos de falla para pilotes de contención. a) Falla como pilote corto, b) Falla por rotación de cuerpo rígido y c) Falla por flujo. Fuente: (Kanagasabai et al., 2011)

Así mismo, en la aplicación de pilotes de estabilización de laderas, se ha demostrado que: i. se requieren diámetros relativamente grandes (>1m) para resistir los esfuerzos de corte y momento, ii. El espaciamiento centro a centro requerido normalmente está entre 2 y 4 veces el diámetro de la pila y iii. Se requiere reforzamiento considerable para evitar que la pila llegue a la fluencia (Poulos & Davis, 1990).

Presión Lateral actuando sobre los pilotes- P: (Ito T., Matsui, T., & Hong W, 1981) mediante un análisis de equilibrio límite indican que para estimar la fuerza lateral sin afectar las condiciones de estabilidad de toda la ladera, se asume que el material llega a un estado plástico (que satisface el criterio de fluencia Mohr-Coulomb), solo en la zona de contacto del material movilizado con el

elemento de contención (p.e Pila). Para diseñar dichos elementos de contención, estos autores proponen utilizar una fuerza lateral (p) considerando una condición en la cual la resistencia al corte a lo largo de la superficie de falla se reduce drásticamente por el desplazamiento del material movilizado, y cuya magnitud se puede estimar integrando la expresión Ec 7 a lo largo de la profundidad del suelo movilizado:

$$p(z) = cA \left[\frac{1}{N_\phi \tan \phi} \left\{ e^{\left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} \right) N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right)} - 2\sqrt{N_\phi} \tan \phi - 1 \right\} + \frac{2 \tan \phi + 2\sqrt{N_\phi} + \frac{1}{\sqrt{N_\phi}}}{\sqrt{N_\phi} \tan \phi + N_\phi - 1} \right] - c \left(D_1 \frac{2 \tan \phi + 2\sqrt{N_\phi} + \frac{1}{\sqrt{N_\phi}}}{\sqrt{N_\phi} \tan \phi + N_\phi - 1} - \frac{2D_2}{\sqrt{N_\phi}} \right) + \frac{\gamma z}{N_\phi} \left\{ A e^{\left(\frac{D_1 - D_2}{D_2} \right) N_\phi \tan \phi \tan \left(\frac{\pi}{8} + \frac{\phi}{4} \right)} - D_2 \right\}$$

Ec 7

Donde

$$N_\phi = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right);$$

$$A = D_1 \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^{\sqrt{N_\phi} \tan \phi + N_\phi - 1};$$

D_1 es la separación centro a centro entre pilotes
 D_2 es la separación entre pilotes

Según reportan (Ito T., Matsui, T., & Hong W, 1981), la expresión Ec 7 fue desarrollada para pilotes rígidas, sin embargo puede ser aplicable en pilotes flexibles considerando que la deformación del suelo alrededor del elemento es pequeña y en consecuencia el efecto de la deformación no es relevante. Así mismo, según registros analizados de pilotes de estabilización ante deslizamientos que han sido instrumentadas, la ecuación Ec 7 provee resultados adecuados de la presión generada por el material movilizado, con mayor precisión para la condición de cabezal restringido. Es importante indicar que autores como (Poulos & Davis, 1990) han encontrado que la ecuación Ec 7 para determinar la presión lateral última (p_y), solamente es válida para un limitado rango de espaciamientos entre pilotes (2 a 3 veces el diámetro), en los casos con mayor o menor espaciamiento, se recomienda el uso de las siguientes expresiones:

Tipo de suelo	Expresión recomendada	Fuente
Arcillas – suelo estable	$p_y = N_p c_u^*$	(Poulos & Davis, 1990) Ec 8
Arenas – suelo estable	$p_y = a k_p \sigma'_{vo} **$	(Poulos & Davis, 1990) Ec 9
Arcillas – suelo movilizado	$p_y = 0.5 N_p c_u^*$	(Poulos & Davis, 1990) Ec 10
Arenas – suelo movilizado	$p_y = 0.5 a k_p \sigma'_{vo} **$	(Poulos & Davis, 1990) Ec 11

* N_p varía linealmente entre 2 (en la superficie de terreno) y 9 a una profundidad de 3.5 veces el diámetro de la pila.

** a es una constante cuyo valor oscila entre 3 y 5, $k_p = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right)$, σ'_{vo} es la presión normal efectiva.

Para el presente análisis se utilizarán las siguientes consideraciones:

- Realizar una evaluación desacoplada de estabilidad, analizando por separado la ladera (estabilidad utilizando el método de equilibrio límite) y los pilotes de reforzamiento (escenario 1: metodología p-y y escenario 2: metodología Interacción Suelo-Estructura).
- Inicialmente se analizará la estabilidad de la ladera de estudio en la condición actual (sin reforzamiento) determinando el factor de seguridad en condición estática y la superficie de falla crítica (representando la masa de suelo susceptible a moverse);
- Posteriormente se determinará la fuerza que deberán soportar la pantalla de pilotes de contención para alcanzar los factores de seguridad aplicables según normativa vigente.
- Finalmente, se realiza el diseño de los pilotes, que estarán unidos en la parte superior por una viga de amarre, por lo cual se considera el caso de cabezal restringido.

El dimensionamiento de pilotes de estabilización o elementos de contención (cargados lateralmente), puede realizarse siguiendo los lineamientos definidos en el siguiente procedimiento de diseño (FHWA, 2010):

- I. Definir perfil estratigráfico.
- II. Establecer diámetro y longitud inicial para evaluar comportamiento ante sollicitaciones laterales.
- III. Analizar el estado límite de resistencia geotécnica usando las sollicitaciones mayoradas (cargas de diseño),
- IV. Si la pila es estable ante falla como pilote corto, se procede al paso V, caso contrario, aumentar la longitud de la pila y reevaluar desde paso II.
- V. Analizar preliminarmente del estado límite de resistencia estructural por flexión usando las sollicitaciones mayoradas (cargas de diseño).
- VI. Si el momento de resistencia se alcanza entre el 1% y 2% del área transversal del reforzamiento longitudinal, se procede al paso VII, caso contrario, aumentar el diámetro de la pila y reevaluar desde paso II.
- VII. Analizar el estado límite de servicio, calculando las deformaciones utilizando las sollicitaciones sin mayorar (cargas de trabajo),

- VIII. Si las deformaciones son admisibles, se procede al paso IX, caso contrario, aumentar el diámetro de la pila y reevaluar desde paso II.
- IX. Definir dimensiones mínimas (diámetro y longitud) con base en el análisis realizado.

2.4.1. Estado límite de resistencia geotécnica - Método de Broms:

La propuesta del profesor Broms (1964-1965) cuyo objetivo es predecir la carga que desarrolla el momento flector último, considera la pila como un elemento rígido y que la solución requerida se puede encontrar utilizando las ecuaciones de la estática para una distribución de resistencia última del suelo tal que se alcanza el equilibrio del elemento. Para este caso, las soluciones de las ecuaciones planteadas permitirán determinar el ancho (diámetro) y la longitud de la pila para una carga esperada (Reese, et al., 2011). Para este análisis, el autor propone formulación independiente para suelos homogéneos puramente friccionales y para suelos homogéneos puramente cohesivos, generando los siguientes esquemas de carga:

2.4.1.1. Suelos Puramente Friccionante:

En este caso, se propone una distribución triangular cuya pendiente se puede calcular como $K_p \cdot YZd$.

- ❖ Resistencia a carga lateral - Suelos granulares (Drenado)
Análisis de Cabeza Libre - Caso Drenado. Broms, Reese (1983) (Poulos & Davis, 1990).

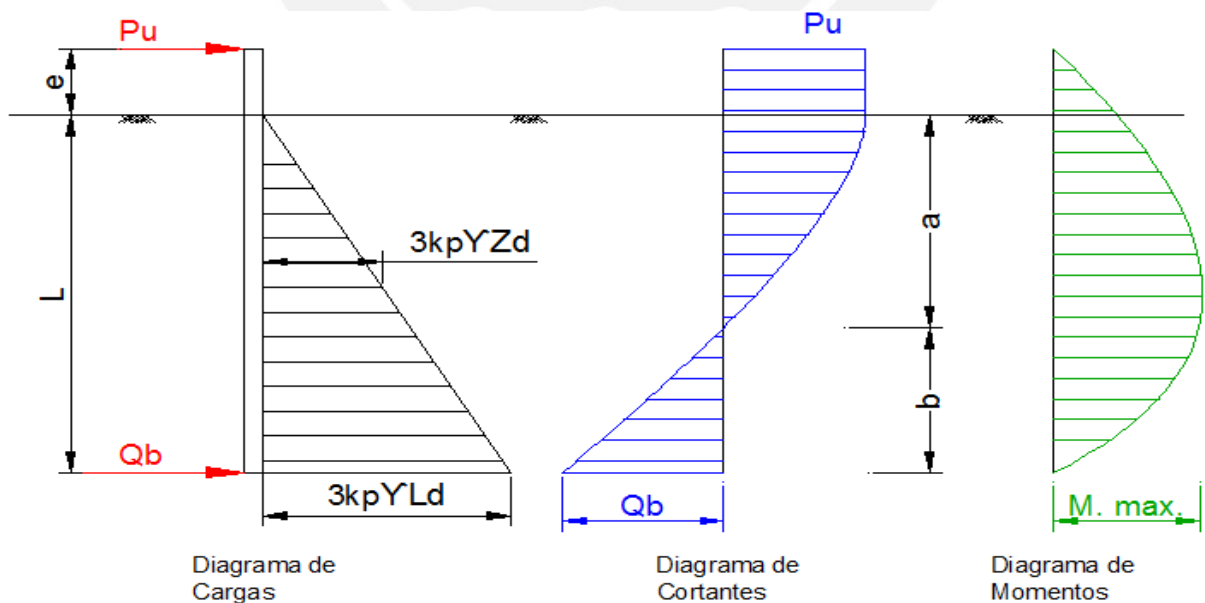


Figura 17 Diagramas de carga, cortante y momento para pila con cabeza libre en suelo granular.

Actuando como Pilote Corto

Se calcula la resultante de carga lateral última y admisible mediante la Ec. 1 y Ec. 2 respectivamente.

$$P_{ult} = \frac{\gamma_s D_s L_{ec}^3 K_p}{2 * (e + L_{ec})}$$

Ec. 1

La resistencia admisible a la carga lateral calculada en comportamiento como pilote corto, estaría dada por la siguiente expresión:

$$P_{adm} = \frac{P_{ult}}{F.S.}$$

Ec. 2

En este caso se recomienda un F.S. de 2.5.

Actuando como Pilote Largo

Se calcula la profundidad donde el esfuerzo cortante es cero y por ende el momento flector es máximo con la Ec. 3:

$$f = x_0 = 0.816 \sqrt{\frac{P_u}{k_p \gamma_s D_p}}$$

Ec. 3

Se calcula el momento máximo con la expresión Ec. 4.

$$M_{max} = Q_u (e + 0.67x_0)$$

Ec. 4

Según el método de Broms expuesto en Prakash 1990, con este valor se calcula la resultante de carga lateral última y permisible con las ecuaciones Ec. 5 y Ec. 9:

$$Q_u = \frac{M_u}{e + 0.549 \left(\frac{Q_u}{k_p \gamma_s D_p} \right)^{0.5}}$$

Ec. 5

Donde M_u puede calcularse para una pila en concreto, con base en las Ec. 6, Ec. 7 y Ec. 8, referidas al documento "Behavior of piles and pile groups under lateral load, Reese 1983".

$$B_{equiv} = \sqrt{A_p}$$

Ec. 6

Se calcula el área de acero requerido con la siguiente expresión.

$$A_s = 0.01B_{equiv} * (B_{equiv} - 6) \quad (cm)$$

Ec. 7

Y el momento de fluencia estaría dado por:

$$M_u = M_y = \frac{0.33B_{equiv}(B_{equiv} - 6)^2}{100} \quad (tn)$$

Ec. 8

La resistencia a carga lateral admisible calculada como pilote largo estaría dada por la Ec. 9:

$$P_{adm} = \frac{P_{ult}}{F.S.}$$

Ec. 9

En este caso se recomienda un F.S. de 1.5.

Finalmente se toma como resistencia a la carga lateral el valor menos de los resultados obtenidos para comportamiento como pilote corto y como pilote largo.

Análisis de Cabeza Restringida - Caso Drenado. Broms, Reese (1983) (Poulos & Davis, 1990).

Según lo expuesto por Broms (1983), para el caso de pilotes en suelo granular (condición drenada), se deberá revisar el comportamiento como pilote corto, intermedio y largo, utilizando las expresiones que se muestran a continuación:

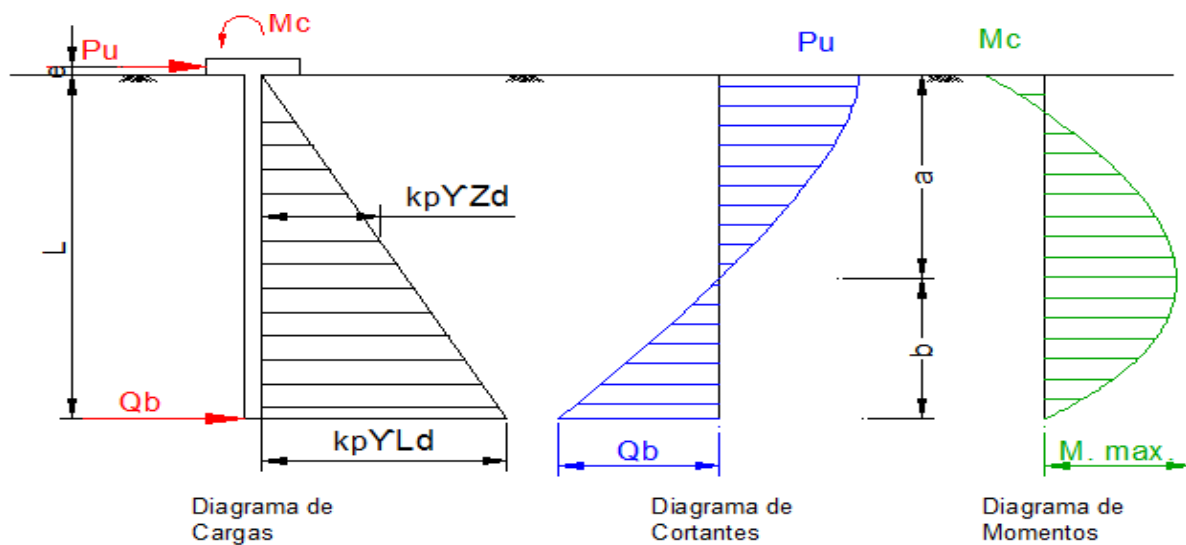


Figura 18 Diagramas de carga, cortante y momento para pila con cabeza restringida en suelo granular.

Actuando como Pilote Corto

En este caso, la falla dependerá netamente de la resistencia del suelo ante una deformación horizontal del pilote, y la resultante de carga lateral última se calcula mediante la Ec. 10.

$$P_{ult} = 1.5Y'_s L_e'^2 D_p K_p$$

Ec. 10

Actuando como Pilote intermedio

Para este caso de análisis se asume que el pilote en tanto aumenta su longitud, presenta una superficie de falla a una profundidad de transición, debida a la rotación en la parte alta del elemento; según Broms, para este comportamiento del pilote, la resistencia a la carga lateral está dada por la Ec. 11.

$$P_{ult} = \frac{M_y}{L} + 0.5Y'_s D_p K_p L_e'^2$$

Ec. 11

Actuando como Pilote Largo

En tanto aumenta la longitud del pilote se tiene un comportamiento como pilote largo, en donde se deben evaluar os superficies de falla, una debida al momento negativo en la parte alta del elemento y otra debida al momento flector máximo positivo aplicado a una profundidad fo (ver Ec. 3) donde el esfuerzo cortante es nulo. En el presente análisis se utilizan las propuestas por

Broms que se muestran en la Figura 19, curva que es aproximadamente descrita por la ecuación Ec. 12.

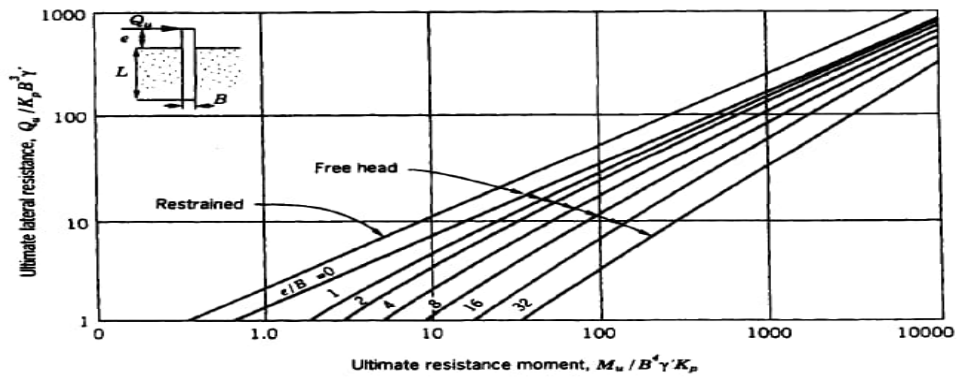


Figura 19 Resistencia a carga lateral de pilotes largas en suelos no cohesivos relacionada con la resistencia al momento último.

$$\frac{P_{ult}}{\gamma'_s D_p^3 K_p} = 2.966 \left[\frac{M_u}{\gamma'_s D_p^4 K_p} \right]^{0.706}$$

Ec. 12

En la Figura 20, se presenta el comportamiento de pilotes ante carga lateral en suelo friccionante, con base a la teoría de Broms.

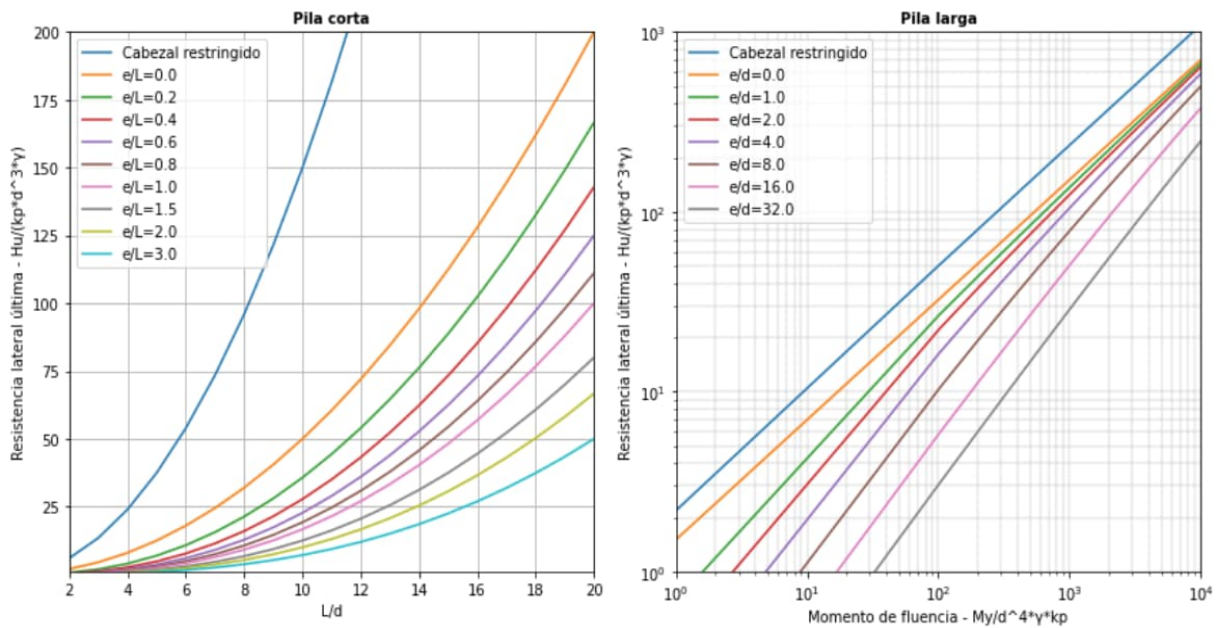


Figura 20 Comportamiento pilotes ante carga lateral - Suelo friccionante según teoría de Broms.

En el Anexo c, se presenta un código desarrollado en Python, en donde se programaron las expresiones propuestas por Broms para el análisis de pilotes cargadas lateralmente, y se validó que los resultados encontrados son coherentes con los propuestos por el autor (Prakash & Sharma, 1990).

2.4.1.2. Suelos Puramente Cohesivos:

Para este caso se asume que la resistencia del suelo, que se puede asumir como una carga uniformemente distribuida con magnitud aproximada de $9c_u$, se comienza a ejercer a una profundidad crítica igual a $1.5d$; lo anterior, debido a la degradación de las propiedades del suelo por acción de la instalación del pilote.

❖ Resistencia a carga lateral - Suelos Finos (No Drenado)

En la Figura 21 y Figura 22, se muestra el esquema de la distribución de solicitaciones y reacciones del pilote en suelos puramente cohesivos.

Análisis de Cabeza Libre - Caso No Drenado. Broms, Reese (1983) (Poulos & Davis, 1990).

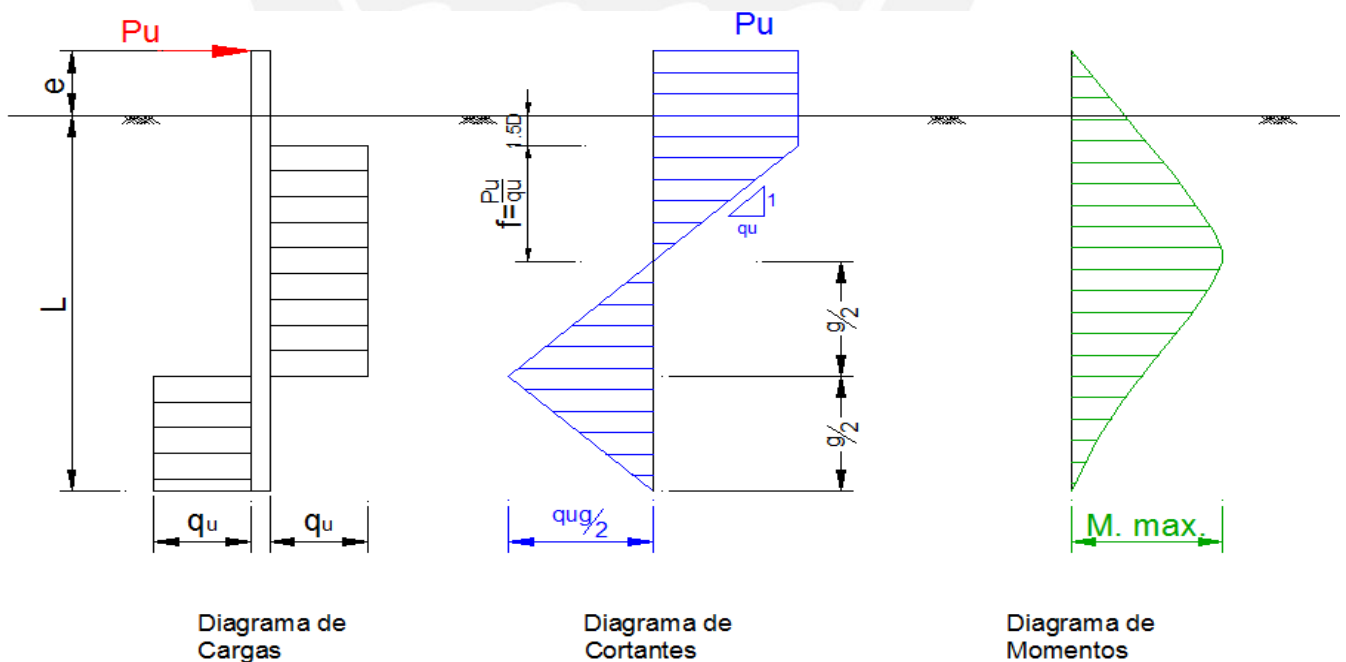


Figura 21 Diagramas de carga, cortante y momento para pila con cabeza libre en suelo cohesivo.

Actuando como Pilote Corto

Conociendo según Broms (1965), que la reacción de suelo cohesivo sobre pilotes cargados lateralmente está dada por la Ec. 13.

$$q_u = 9c_u$$

Ec. 13

Integrando el diagrama de esfuerzo cortante desde la cabeza del pilote hasta una profundidad $Z=e+1.5D+f$, donde dicho esfuerzo es cero y por ende el momento es máximo, se tiene:

$$M_{\max} = P_{\text{ult}}(e + 1.5b + f) - \frac{q_u D f^2}{2}$$

Ec. 14

Donde según la Figura 21, f está dada por la siguiente ecuación:

$$f = \frac{P_u}{9c_u D}$$

Ec. 15

Reemplazando la Ec. 15 en la Ec. 14 y simplificando se tiene:

$$M_{\max} = P(e + 1.5b + 0.5f)$$

Ec. 16

Así mismo, al integrar el diagrama de cortante desde una profundidad $Z= e+1.5D+f+0.5g$, se tiene:

$$M_{\max} = 2.25c_u D g^2$$

Ec. 17

Las ecuaciones Ec. 14 y Ec. 15, se obtienen del análisis de los diagramas de carga y cortante presentados en la Figura 21.

Integrando el diagrama de cortante a lo largo de la profundidad Z , se tiene la siguiente expresión:

$$P_u^2 + (36c_u D e + 27c_u D^2 + 18c_u D L)P_u - 81c_u^2 D^2 (L - 1.5D)^2 = 0$$

Ec. 18

Ecuación de donde se puede obtener el valor de P_u , resolviendo con la ecuación general de raíces cuadráticas.

La resistencia admisible a la carga lateral calculada en comportamiento como pilote corto, estaría dada por la siguiente expresión:

$$P_{adm} = \frac{P_{ult}}{F.S.}$$

Ec. 19

En este caso se toma un F.S. de 2.5.

Actuando como Pilote largo

Según lo propuesto por Broms (1965), en suelos cohesivos el pilote fallaría por fluencia del fuste en una profundidad $Z=1.5D+f$, donde se aplica el momento máximo por reacción del suelo; es por esta razón que el análisis como pilote largo se lleva a cabo resolviendo la ecuación Ec. 16, sustituyendo en ella la ecuación Ec. 15 y tomando como momento máximo el momento de fluencia M_y (ver Ec. 8), obteniendo:

$$M_u = M_{max} = M_y = P_u \left(e + 1.5b + \frac{P_u}{18c_u D} \right)$$
$$\frac{P_u^2}{18c_u D} + P_u (e + 1.5b) - M_y = 0$$

Ec. 20

Del mismo modo que en el caso del comportamiento como pilote corto, se obtiene la ecuación cuadrática Ec. 20, que al resolverla entrega la carga lateral última para comportamiento como pilote largo.

La resistencia a carga lateral admisible calculada como pilote largo estaría dada por la Ec. 21:

$$P_{adm} = \frac{P_{ult}}{F.S.}$$

Ec. 21

En este caso se toma un F.S. de 1.5.

Finalmente se toma como resistencia admisible a la carga lateral el valor menor de los resultados obtenidos para comportamiento como pilote corto y como pilote largo.

Análisis de Cabeza Restringida - Caso No Drenado. Broms, Reese (1983) (Poulos & Davis, 1990).

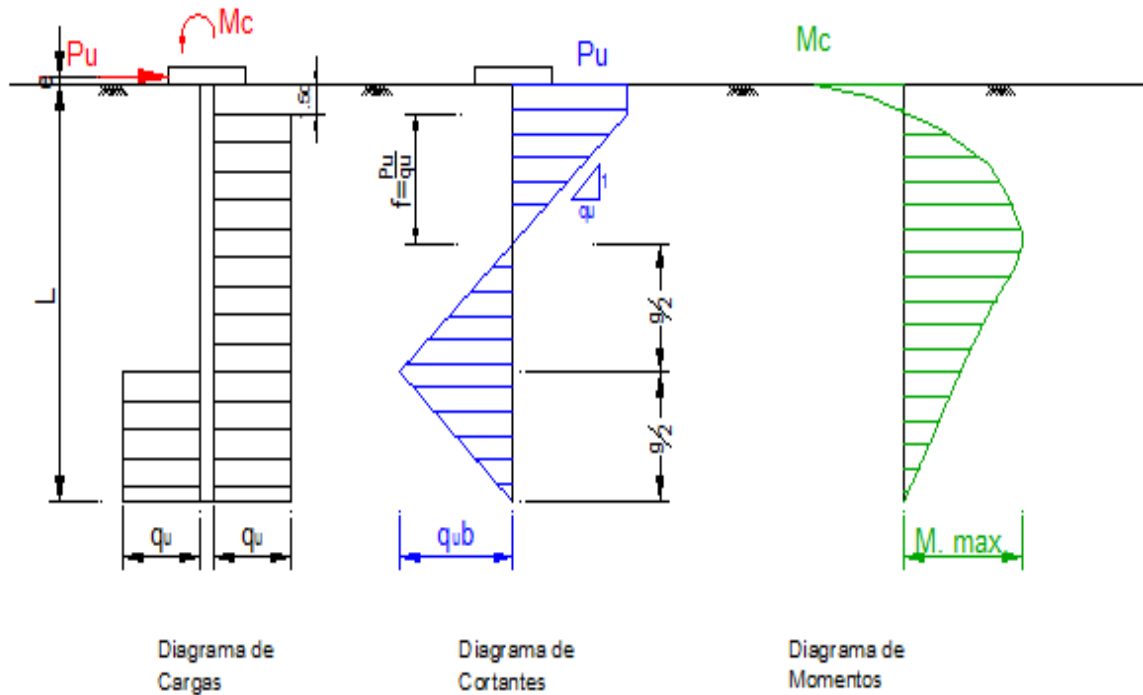


Figura 22 Diagramas de carga, cortante y momento para pila con cabeza restringida en suelo cohesivo.

Actuando como Pilote Corto

En este caso de análisis, Broms describe que la falla consiste en un movimiento horizontal igual a lo largo del elemento deformando el suelo, el cual generará una reacción desde una profundidad $1.5D_p$ hasta la longitud de transición entre comportamiento como pilote corto y pilote largo. La resistencia a la carga lateral y la longitud de transición en este caso se calcula mediante la Ec. 22 y Ec. 24 respectivamente.

$$P_{ult} = 9c_u D(L_{Trans} + 1.5bD)$$

Ec. 22

$$M_{max} = 4.5c_u D (L_{Trans}^2 - 2.25D^2)$$

Ec. 23

La longitud de transición se obtiene igualando las expresiones Ec. 22 y Ec. 26.

$$L_{trans} = \frac{[18c_u D (10.125c_u D^3 + M_y)]^{0.5}}{9c_u D}$$

Ec. 24

Actuando como Pilote Intermedio

Según el pilote alcanza la longitud de transición definida por la Ec. 24, Broms propone que el elemento presentará una superficie de falla en la parte alta, generando una función de momento flector definida por la siguiente expresión y su reducida presente en la Ec. 25.

$$M_{max} = P_{ult} (1.5D + f) - f(9c_u D) \left(\frac{f}{2}\right) - M_y$$

$$M_{max} = P_{ult} (1.5D + 0.5f) - M_y$$

Ec. 25

Con el fin de obtener una expresión para el cálculo de la resistencia última a carga lateral en este análisis, se realiza la solución simultánea de las ecuaciones de equilibrio de momentos con respecto a una profundidad de transición de comportamiento de pilote intermedio a pilote largo del pilote y fuerzas en dirección horizontal, asumiendo que el suelo solamente genera reacción en uno de sus costados debido a que la longitud de transición no alcanza la profundidad donde se espera la reacción del suelo en el otro costado del pilote. A continuación, se presenta dicho desarrollo matemático:

Equilibrio de momentos con respecto a la profundidad L_{trans} :

$$P_{ult} L_{Trans} - 9c_u D (L_{Trans} - 1.5D) \frac{(L_{Trans} - 1.5D)}{2} - M_y = 0$$

Equilibrio de fuerza en dirección horizontal con respecto a la profundidad L_{Trans} :

$$P_{ult} - 9c_u D (L_{Trans} - 1.5D) = 0$$

Con lo anterior se obtiene la ecuación Ec. 26, con la cual se calcula la resistencia a la carga lateral como pilote intermedio.

$$P_{ult} = \frac{M_y}{0.5L + 0.75Dp}$$

Ec. 26

Actuando como Pilote largo

Para este comportamiento se propone un mecanismo de falla donde el pilote presenta rotura en el punto donde se tiene el momento máximo; este mecanismo de falla dependerá netamente del momento de fluencia de la sección transversal, es decir $M_{max} = M_y$. Por lo anterior, y tomando como referencia la Ec. 25, la resistencia a carga lateral calculada como pilote largo está dada por la Ec. 27, que debe ser solucionada de forma iterativa.

$$P_{ult} = \frac{2M_y}{1.5D + \frac{P_{ult}}{18Dc_u}}$$

Ec. 27

Algunos de los beneficios del método propuesto por Broms, son (Reese, et al., 2011):

- ✓ Se modela (de forma aproximada) el comportamiento de pilotes cargadas lateralmente.
- ✓ El método puede ser utilizado en dimensionamiento geotécnico. Los resultados obtenidos, se pueden considerar como el punto de partida para realizar un análisis con el método p-y, y permiten validar su aplicabilidad coherencia.

En la Figura 23, se presenta el comportamiento de pilotes ante carga lateral en suelo cohesivo, con base a la teoría de Broms.

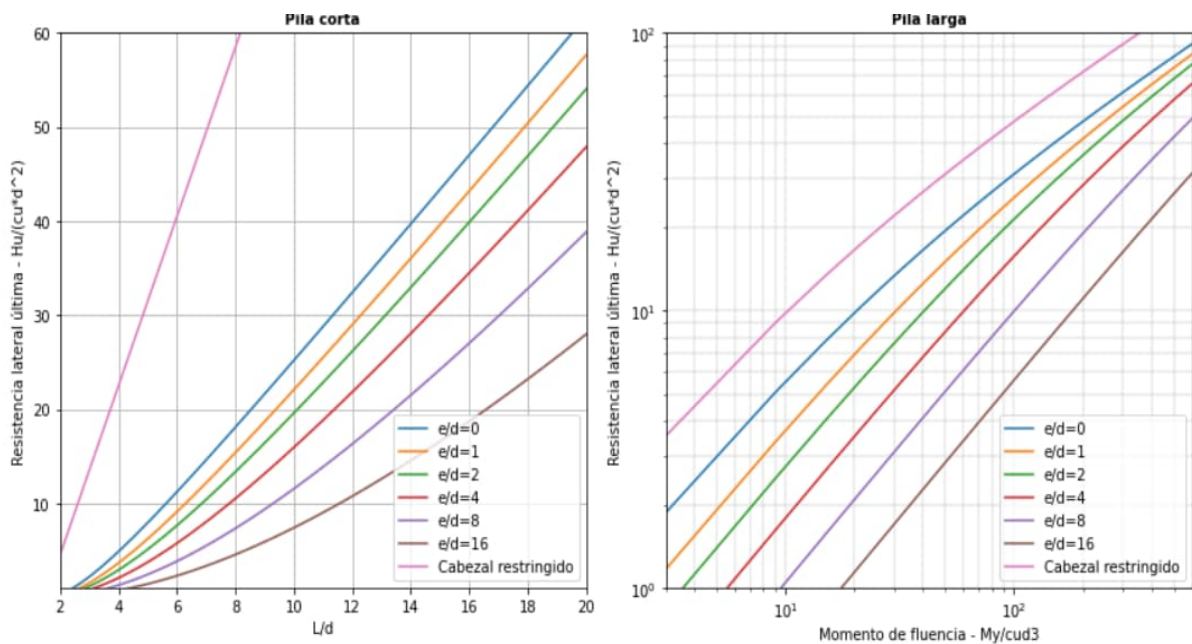


Figura 23 Comportamiento de pilotes ante carga lateral - Suelo cohesivo según teoría de Broms.

En el Anexo c, se presenta un código desarrollado en Python, en donde se programaron las expresiones propuestas por Broms para el análisis de pilotes cargados lateralmente, y se validó que los resultados encontrados son coherentes con los propuestos por el autor (Prakash & Sharma, 1990).

2.4.2. Estado límite de resistencia geotécnica – respuesta no lineal del suelo método curvas P-Y (FHWA, 2010):

Para evaluar la respuesta de pilotes perforados, sometidas a cargas laterales se recomienda utilizar el método p-y, el cual modela la pila como viga elástica no lineal y utiliza una serie de resortes no lineales para modelar la resistencia del suelo. Con esto, el método p-y permite realizar un análisis de interacción suelo-estructura, en el cual se requiere satisfacer tanto las ecuaciones de equilibrio de la pila como la compatibilidad entre deflexión y reacción del suelo.

En la Figura 24, se presenta el modelo físico de análisis para el método p-y, en el cual se considera la cabeza de pila sometida a cargas externas y la reacción del suelo como una serie de resortes a lo largo de la profundidad analizada. En este caso, para una profundidad “x” dada, la reacción “p” del suelo (fuerza de resistencia por unidad de longitud a lo largo de la pila) es una función no lineal

de la deflexión lateral “y”, definida por una curva que considera la resistencia al corte y módulo de elasticidad del suelo, la profundidad del nivel freático, el diámetro de la pila y el tipo de carga aplicada (monotónica o cíclica).

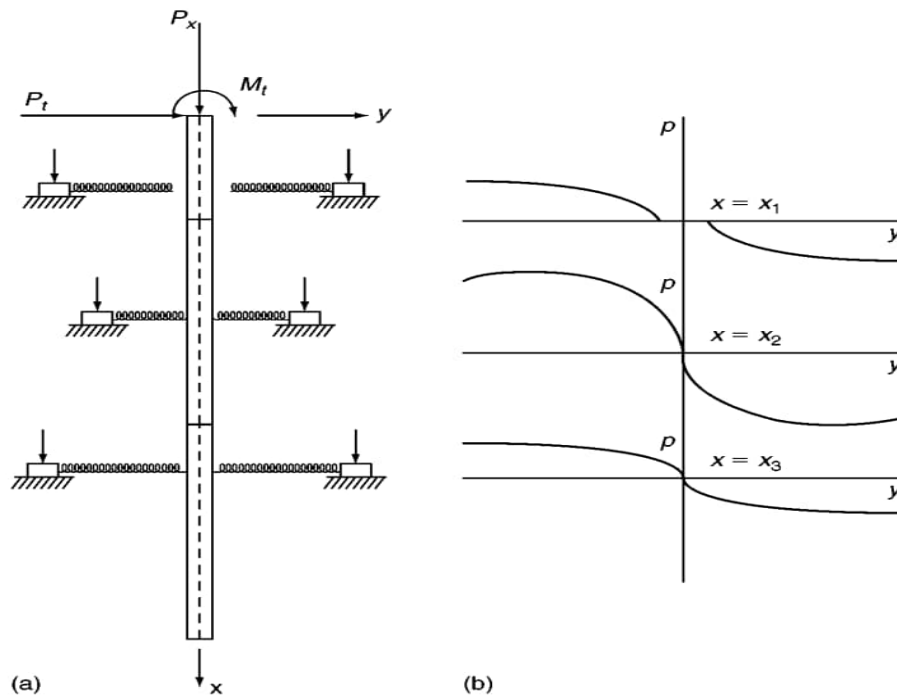


Figura 24. A) Modelo de análisis para pilotes cargadas lateralmente b) curvas de respuesta del suelo p-y (Reese, et al., 2011).

Algunos de los modelos (curvas p-y) para suelos granulares desarrollados en base a resultados experimentales (ensayos de carga instrumentados), se presentan a continuación:

Curvas p-y propuesta por Reese, et al. en 1974 (tomada del software PyPile) para suelos arenosos sobre o abajo del nivel freático, en la cual se requiere conocer el ángulo de fricción interna, el peso unitario (total para suelos secos y sumergido para suelos bajo nivel freático) y el módulo de reacción k_{py} , tomando como referencia los siguientes valores:

Densidad relativa	k_{py} (MN/m ³)		
	Suelta	Medianamente densa	Densa
Arena sumergida	5.4	16.3	34
Arena No sumergida	6.8	24.4	61

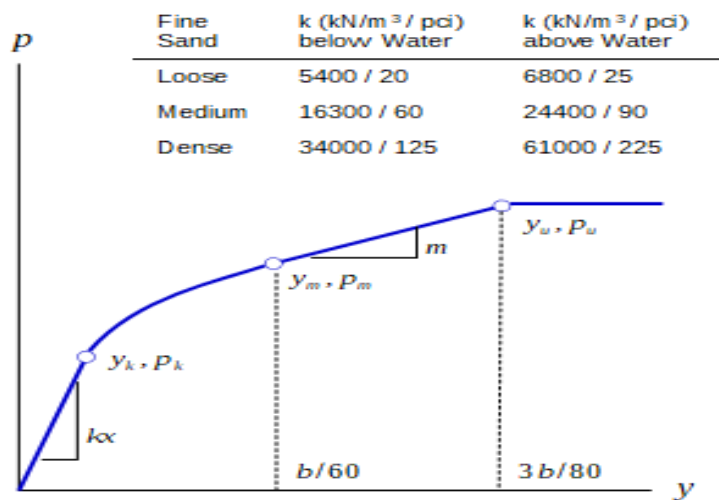


Figura 25. Respuesta pila cargada lateralmente en arena con o sin presencia de agua (Reese 1974).

Curvas p-y propuesta por Reese, et al. en 1974 para suelos cementados, en la cual se requiere conocer el ángulo de fricción interna, la cohesión, el peso unitario y el módulo de reacción o rigidez inicial ($k_x = k_c + k_\phi$), tomando como referencia los siguientes valores:

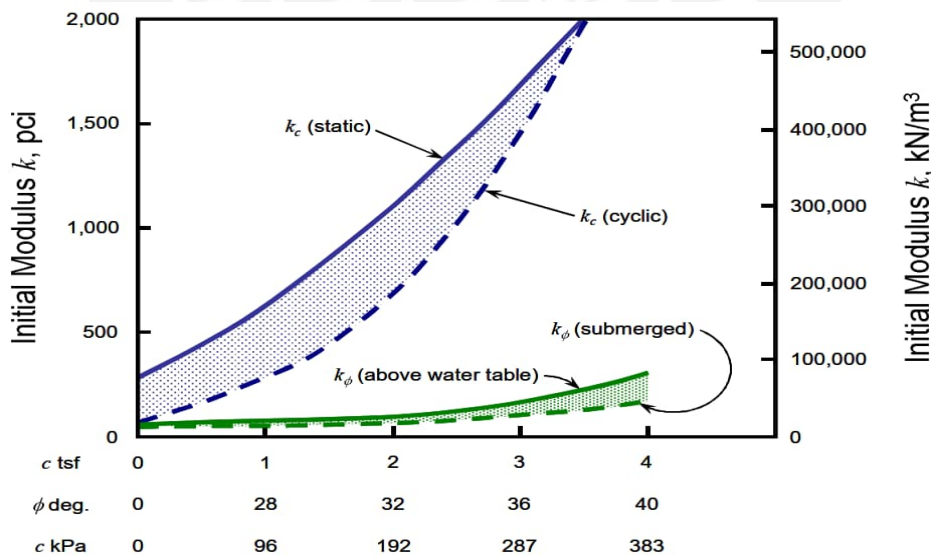


Figura 26. Valores representativos de rigidez inicial (k_x) para suelos cementados (Reese 1974).

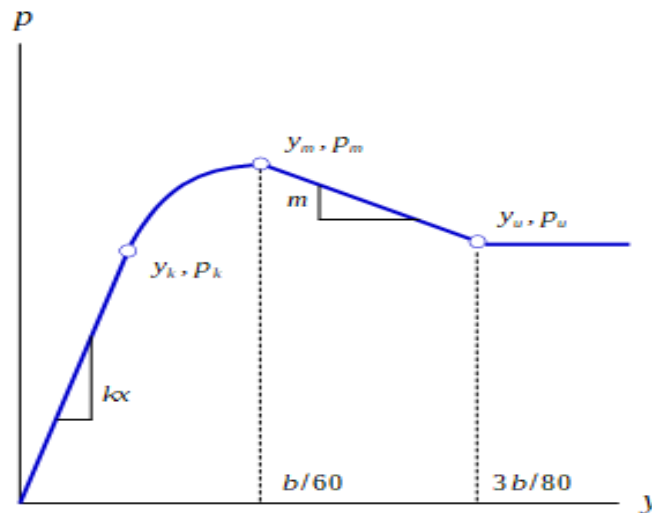


Figura 27. Respuesta pila cargada lateralmente en suelos cementados (Reese 1974).

2.4.3. Método de análisis mediante Elementos finitos:

Dentro de las técnicas de la geomecánica computacional, se utilizará la herramienta de elementos finitos (FEM), la cual se basa en la teoría del medio continuo, donde se consideran ecuaciones de equilibrio (fuerza-esfuerzo), compatibilidad de deformaciones y ecuaciones constitutivas para resolver el análisis de materiales.

Para poder definir la fluencia de los materiales en el medio continuo, se necesita definir los criterios de falla a utilizar, los cuales establecen la combinación del tensor de esfuerzos que generan una superficie de falla; en el presente estudio, se utilizará el Criterio de falla Mohr Coulomb, que corresponde a un modelo elástico perfectamente plástico basado en la línea de falla propuesta por Coulomb (1776) y la representación de esfuerzos en el plano propuesta por Mohr (1982), en el cual la resistencia depende del nivel de confinamiento y está gobernada principalmente por la cohesión y el ángulo de fricción interna (Potts, D., & Axelsson, 2002).

3. PREDISEÑO DE PILOTES PARA ESTABILIZACIÓN MÉTODO DE INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA – ESCENARIO 1

3.1. Consideraciones

- a. Se utiliza el método de equilibrio límite, para determinar un factor de seguridad mínimo – FoS (Siglas del término en inglés Factor of Safety), en donde se predefinen superficies de potencial falla y se identifica la que genera el menor valor entre la relación de resistencias con respecto a las solicitaciones aplicadas (Momentos o fuerzas).
- b. Se realiza el predimensionamiento de pilotes en condición estática considerando la teoría de falla propuesta por Broms y una condición de cabezal libre (sin restricción de movimiento en la parte superior del pilote).
- c. En este caso, se implementó un análisis de equilibrio límite para determinar la presión lateral por unidad de longitud que debe proveer la pila para alcanzar los factores de seguridad mínimos requeridos según normativa, para garantizar la estabilidad de la ladera. Estos análisis de estabilidad se realizaron bajo las siguientes consideraciones
 - Se considera un comportamiento rígido plástico perfecto, en el cual no se evalúan deformaciones.
 - Del análisis inicial de estabilidad, se definió la superficie de falla crítica local en condición estática, la cual se tomó como referencia para definir la zona estable y la geo-masa movilizada.
 - Los análisis se limitaron a estabilizar los 15m superficiales, considerando una baja probabilidad de superficies de falla que abarquen una altura superior para las laderas analizadas.
 - Se definió que la estructura de contención estará al borde de la corona de la ladera. En este punto, la superficie de falla tiene una profundidad de 5.3m.
 - Los métodos de análisis a considerar son Bishop, Janbu corregido y Spencer.
 - El nivel freático no afectará los análisis de estabilidad.
 - Se realizó análisis de sensibilidad variando la presión resistente para obtener el valor mínimo del factor de seguridad de acuerdo con la norma E.050.

En la Tabla 3-1, se muestran las fuerzas laterales distribuidas que deberán soportar los pilotes de contención en la longitud embebida en el material movilizado para garantizar que los análisis de estabilidad de las laderas den como resultado un factor de seguridad mínimo de 1.25.

Tabla 3-1 Fuerza distribuida sobre pilotes de contención

Método de análisis	Fuerza lateral (kN/m)	Longitud Sobre la que Actúa el Empuje (m)	Carga Lateral Equivalente (KN)
Bishop simplificado	33.35	5.3	176.8*Dp
Janbú simplificado	32.20	5.3	170.7*Dp

Nota 1: Dp corresponde al diámetro de la pila

Nota 2: La Longitud Sobre la que Actúa el Empuje, corresponde a la profundidad de superficie de falla mas probable determinada con el análisis de estabilidad por equilibrio límite.

3.2. Dimensionamiento de pilotes cargada lateralmente - método de Broms:

Mediante el código desarrollado para evaluar carga lateral en pilotes con el método de Broms (Ver Anexo c), se obtuvieron los resultados de resistencia presentados en la Tabla 3-2 a Tabla 3-4 , considerando diferentes mecanismos de malla y diferentes longitudes efectivas (Le=empotramiento de la pila).

Tabla 3-2 Resistencia ante carga lateral (kN) para Le=8m (método Broms)

Pilote corto-Cabeza libre	1963.29	2454.11	2944.93	3435.75	3926.57
Pilote largo-Cabeza libre	29.68	58.67	101.45	160.22	237.05
Pilote corto-Cabeza restringida	8098.56	10123.2	12147.8	14172.5	16197.1
Pilote largo-Cabeza restringida	57.09	111.97	192.21	301.59	443.55
Diámetro	0.8	1	1.2	1.4	1.6

Tabla 3-3 Resistencia ante carga lateral (kN) para Le=10m (método Broms)

Pilote corto-Cabeza libre	3244.62	4055.77	4866.92	5678.08	6489.23
Pilote largo-Cabeza libre	29.68	58.67	101.45	160.22	237.05
Pilote corto-Cabeza restringida	12654	15817.5	18981	22144.5	25308
Pilote largo-Cabeza restringida	57.09	111.97	192.21	301.59	443.55
Diámetro	0.8	1	1.2	1.4	1.6

Tabla 3-4 Resistencia ante carga lateral (kN) para $Le=12m$ (método Broms)

Pilote corto-Cabeza libre	4859.14	6073.92	7288.7	8503.49	9718.27
Pilote largo-Cabeza libre	29.68	58.67	101.45	160.22	237.05
Pilote corto-Cabeza restringida	18221.8	22777.2	27332.6	31888.1	36443.5
Pilote largo-Cabeza restringida	57.09	111.97	192.21	301.59	443.55
Diámetro	0.8	1	1.2	1.4	1.6

Tabla 3-5 Resistencia ante carga lateral (kN) para $Le=20m$ (método Broms)

Pilote corto-Cabeza libre	14671.3	18339.1	22007	25674.8	29342.6
Pilote largo-Cabeza libre	29.68	58.67	101.45	160.22	237.05
Pilote corto-Cabeza restringida	50616	63270	75924	88578	101232
Pilote largo-Cabeza restringida	57.09	111.97	192.21	301.59	443.55
Diámetro	0.8	1	1.2	1.4	1.6

3.3. Dimensionamiento pilotes cargada lateralmente - Respuesta no lineal del suelo método curvas P-Y:

Con el software de acceso libre PyPile, se realiza el análisis con el método p-y, el cual permite generar diagramas de fuerza cortante, momento flector y deflexiones laterales en los pilotes analizados. Para este caso, se tomaron las siguientes consideraciones:

- Se evaluaron las dimensiones requeridas para soportar las cargas laterales
- Como condiciones de borde en la cabeza del pilote consideran carga lateral definidas en el numeral 1, momento aplicado y fuerza axial nula.
- Se consideran los parámetros de resistencia y rigidez del suelo presentados en la Tabla 2-5 y Tabla 2-8.
- Se utilizaron las curvas p-y propuestas por Reese aplicables a suelos arenosos (dependen netamente del ángulo de fricción interna) y a suelos cementados (dependen del ángulo de fricción interna y cohesión), las cuales se muestran en la Figura 28.

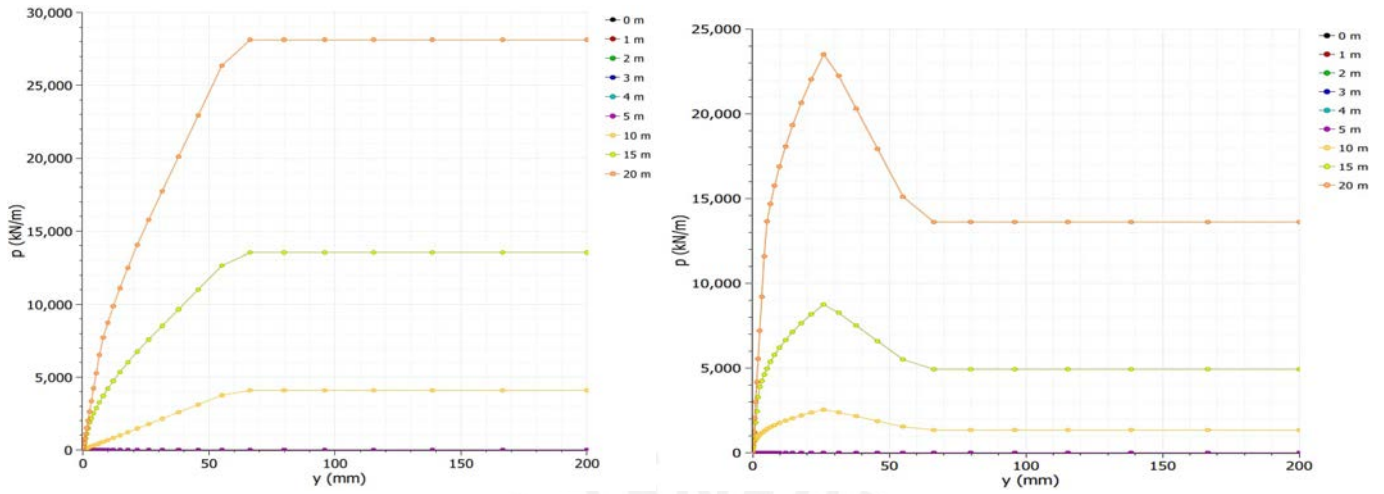


Figura 28. Izq. Curvas py suelos arenosos Reese 1974. Der. Curvas py suelos cementados Reese 1974 (Software PyPile).

- Se limitará la deformación de la cabeza del pilote a 2.54cm.
- Se consideró la ecuación Ec. 28, para definir el momento de plastificación (fluencia) para un elemento tipo pila en concreto.

$$M_y = \frac{0.33\sqrt{A_p}(\sqrt{A_p} - 6)^2}{10}$$

Ec. 28

- Las características de los pilotes modelados se presentan en la Tabla 3-6 y Figura 29.

Tabla 3-6 Características geométricas principales de pilotes en concreto armado – Software PYPile.

	Material del Pilote	Unidad	Concreto armado	Concreto armado	Concreto armado	Concreto armado
D	Diámetro	[m]	1.00	1.20	1.40	1.60
A_p	área del pilote	[m ²]	0.79	1.13	1.54	2.01
f'_c	Esfuerzo de resistencia a compresión del pilote	[kN/m ²]	21000	21000	21000	21000
E_p	Módulo de Elasticidad del pilote (E.060)	[kN/m ²]	5.39E+08	5.39E+08	5.39E+08	5.39E+08
M_y	Momento de plastificación (fluencia) aproximado para un elemento tipo pila en concreto	[kN-m]	1996.45	3533.87	5707.94	8628.89
I	Inercia	[m ⁴]	0.05	0.10	0.19	0.32
	EA	[kN/m]	4.23E+08	6.09E+08	8.29E+08	1.08E+09
	EI	[kN/m ²]	2.64E+07	5.48E+07	1.02E+08	1.73E+08

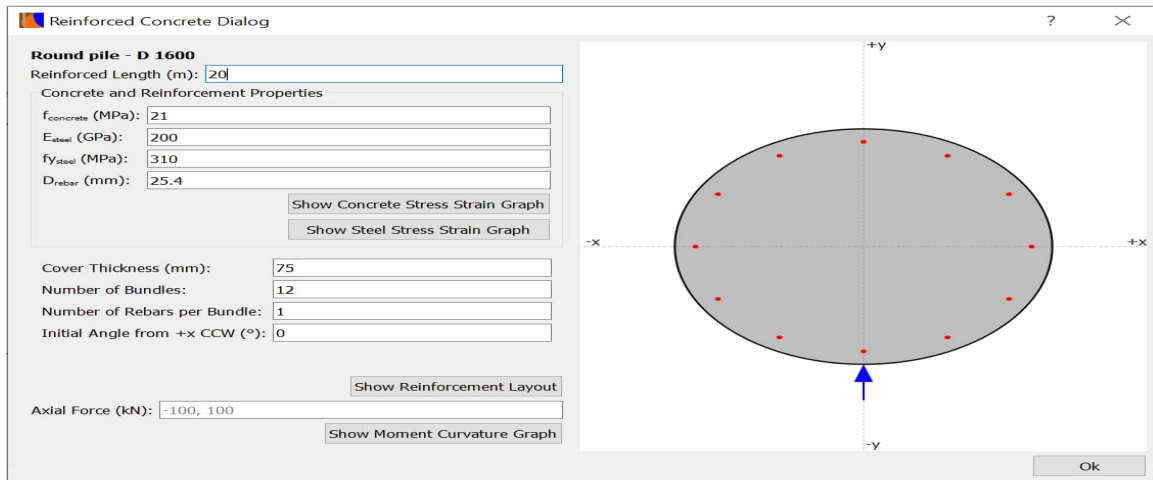


Figura 29. Características geométricas y de resistencia utilizadas para modelar Pilotes en concreto armado (Software PyPile).

En la Figura 30 se presentan los perfiles estratigráficos analizados en el software PyPile, utilizando Curvas py para suelos arenosos Reese 1974 (Izquierda) así como curvas py para suelos cementados Reese 1974 (Der); en la Figura 31 y Figura 32 se presentan los diagramas de deflexión, esfuerzo cortante y momento flector a lo largo de los pilotes analizados.

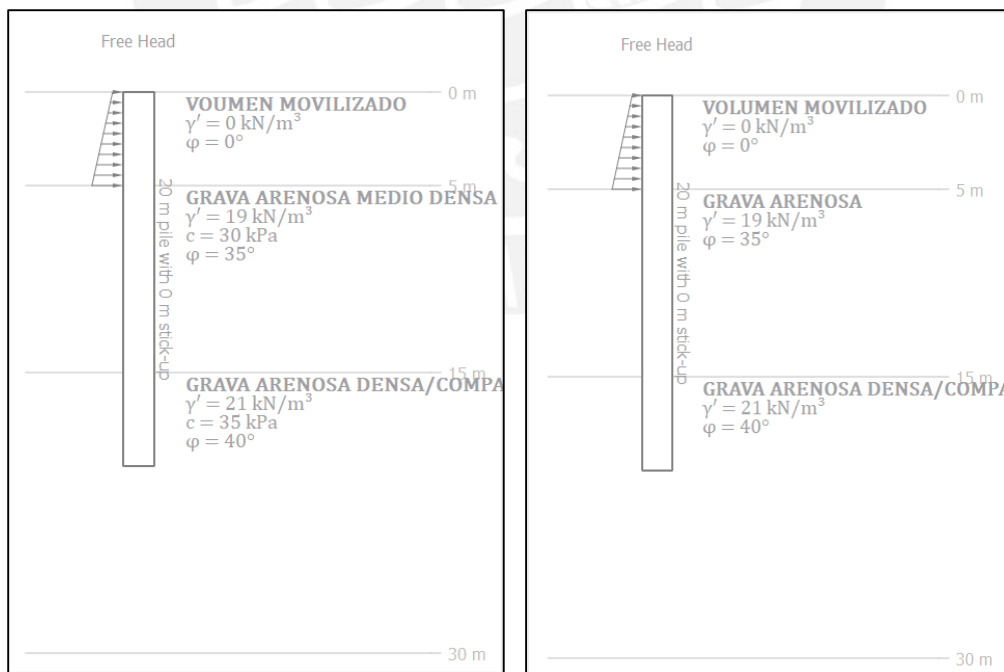


Figura 30 Modelos analizados Curvas py para suelos arenosos Reese 1974 (Izquierda) así como curvas py para suelos cementados Reese 1974 (Der) - software PyPile.

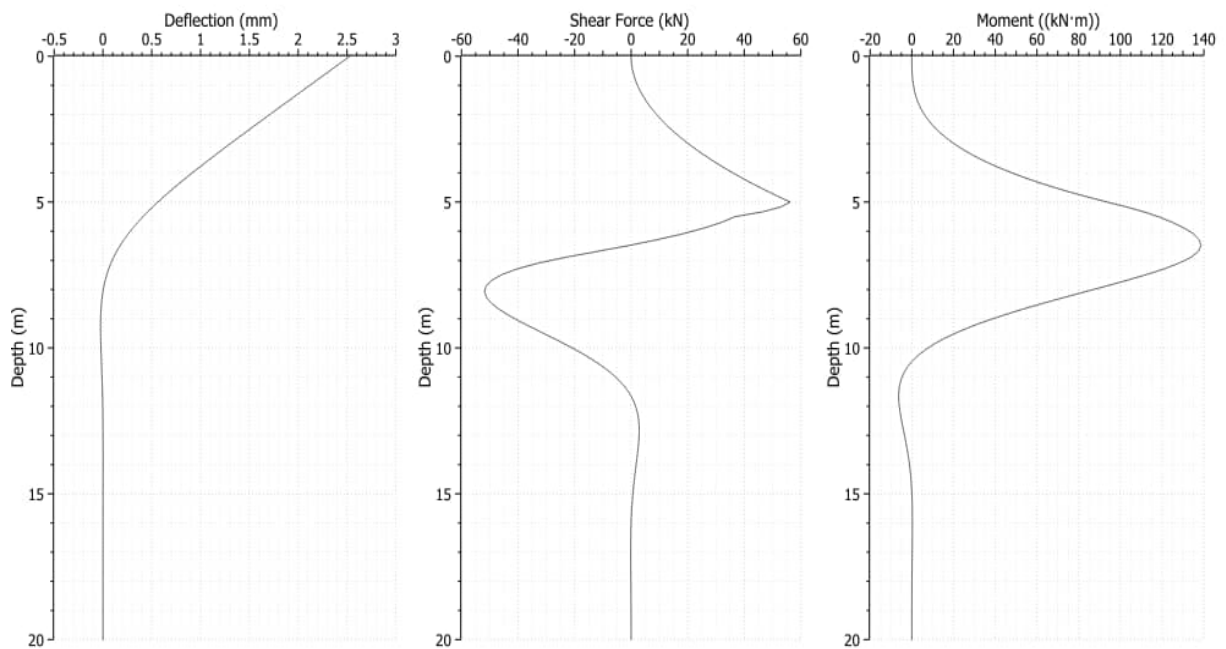


Figura 31 Resultados Modelo analizado en el software PyPile D:1.2m- Cemented Soil.

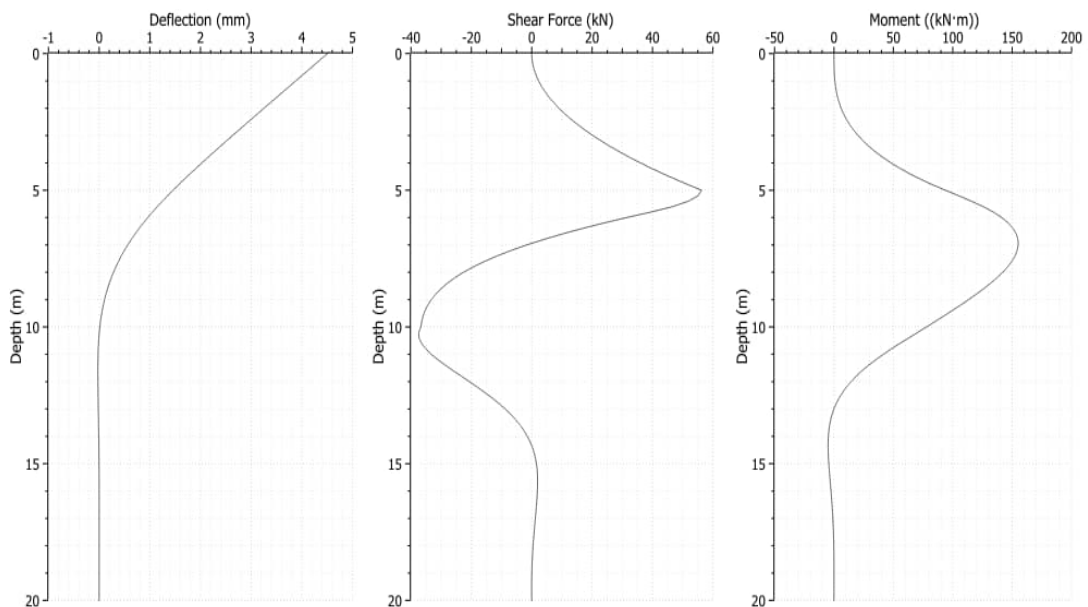


Figura 32 Resultados Modelo analizado en el software PyPile D:1.2m- Sand Reese.

En el Anexo d, se presentan los archivos .pil (software de acceso libre PyPile) con el dimensionamiento realizado utilizando curvas p-y.

4. PREDISEÑO DE PILOTES PARA ESTABILIZACIÓN MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS – ESCENARIO 2

4.1. Consideraciones

- Modelación del talud en el software Plaxis 2DV20, y calcular el factor de seguridad numérico – SSR (Siglas del término en inglés Shear Stress Reduction)
- Chequeo de estado de falla ante carga lateral utilizando los tensores de esfuerzo generados en Plaxis, para calcular los esfuerzos principales y verificar la función de falla del modelo Mohr Coulomb.
- Se consideró la ecuación Ec. 28, para definir el momento de plastificación (fluencia) para un elemento tipo pila en concreto.
- Las características de los pilotes modelados se presentan en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1 Características geométricas principales de pilotes en concreto armado – Software Plaxis2D.

	Material del Pilote	Unidad	Concreto armado	Concreto armado	Concreto armado	Concreto armado
D	Diámetro	[m]	1.00	1.20	1.40	1.60
A	área del pilote	[m ²]	0.79	1.13	1.54	2.01
f'c	Esfuerzo de resistencia a compresión del pilote	[kN/m ²]	21000	21000	21000	21000
γ	Peso unitario	[kN/m ³]	24	24	24	24
E	Módulo de Elasticidad del pilote (E.060)	[kN/m ²]	5.39E+08	5.39E+08	5.39E+08	5.39E+08
My	Momento de plastificación (fluencia) aproximado para un elemento tipo pila en concreto	[kN-m]	1996.45	3533.87	5707.94	8628.89
I	Inercia	[m ⁴]	0.049	0.102	0.189	0.322
Ls	Espaciamiento entre pilotes (borde-borde)	[m]	2.00	2.00	2.00	2.00

4.2. Dimensionamiento de pilotes cargados lateralmente Método de Elementos finitos:

Mediante el software Plaxis2D V20 basado en método de elementos finitos, se procedió a modelar la ladera de interés, teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- Se utilizó el perfil estratigráfico indicado en la Tabla 2-8.
- Se tomó el modelo constitutivo de Mohr Coulomb con los parámetros de resistencia indicados en la Tabla 2-10.

- Los pilotes se modelaron utilizando la opción “filas de vigas confinadas” (embedded beam rows), mediante el cual se representan los pilotes como elementos tipo viga Mindilin, cuya interacción con el material confinante se logra considerando tanto la resistencia de punta como la de rozamiento perimetral; con esta opción no se requiere definir interface entre elemento y suelo.
- Se evaluaron las siguientes fases de cálculo:
 - Etapa 1, que considera un análisis plástico para definir los esfuerzos actuales.
 - Etapa 2, que considera un análisis de reducción Φ/c , para determinar el factor de seguridad global del modelo en la condición actual (sin pila de contención).
 - Etapa 3, que considera un análisis plástico para definir los esfuerzos y deformaciones al construir los pilotes de contención.

En la Figura 33, se presenta el modelo geométrico y el perfil estratigráfico analizado:

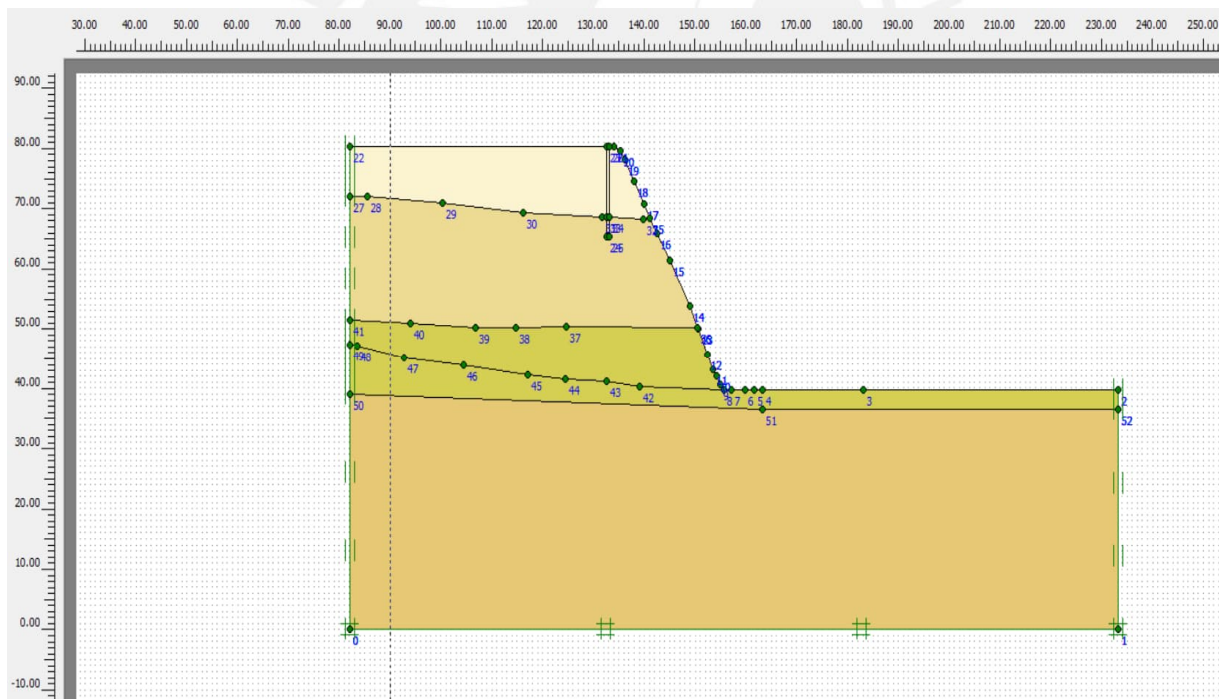


Figura 33 Modelo geométrico (sección 5-5) analizado en el software Plaxis 2DV20.

El análisis de estabilidad realizado inicialmente muestra una falla global que en su condición actual presenta un factor de seguridad SSR cercano a 1.022, como se muestra en la Figura 34.

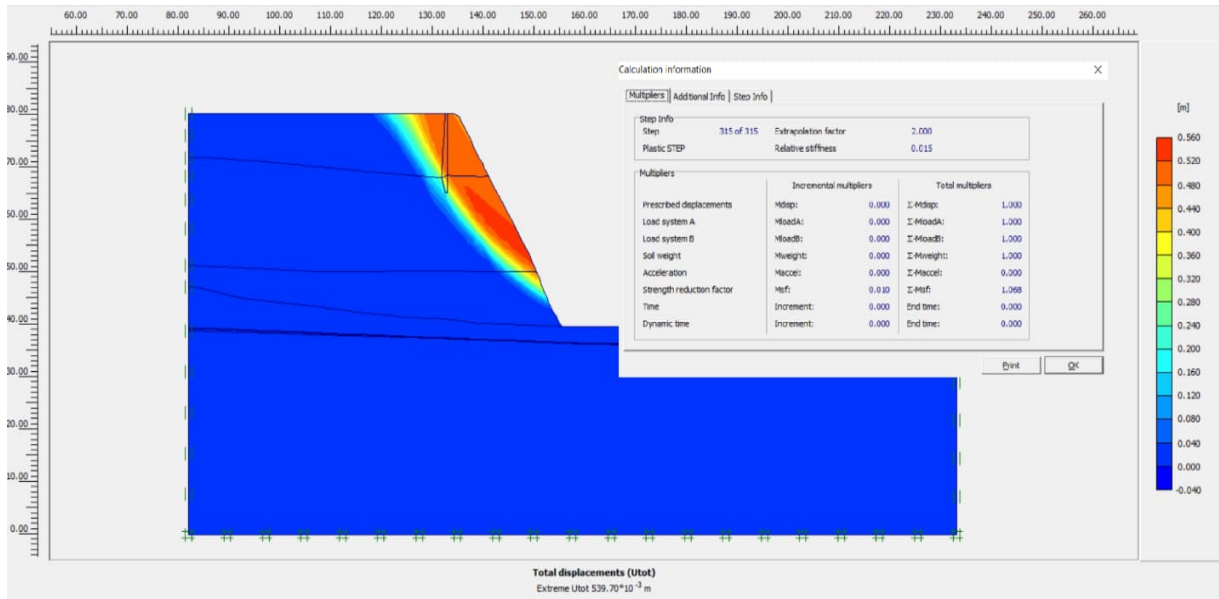


Figura 34 Resultado análisis de estabilidad inicial para el malecón Castagnola (sección 5-5) mediante software Plaxis 2DV20.

En la Figura 35 se presenta el modelo analizado en el software Plaxis2DV20 y en la Figura 36 se presenta ejemplos de los resultados obtenidos con la modelación realizada. Los resultados de cada modelo realizado en el software Plaxis 2DV20 y los respectivos archivos editables se encuentran en el Anexo e.

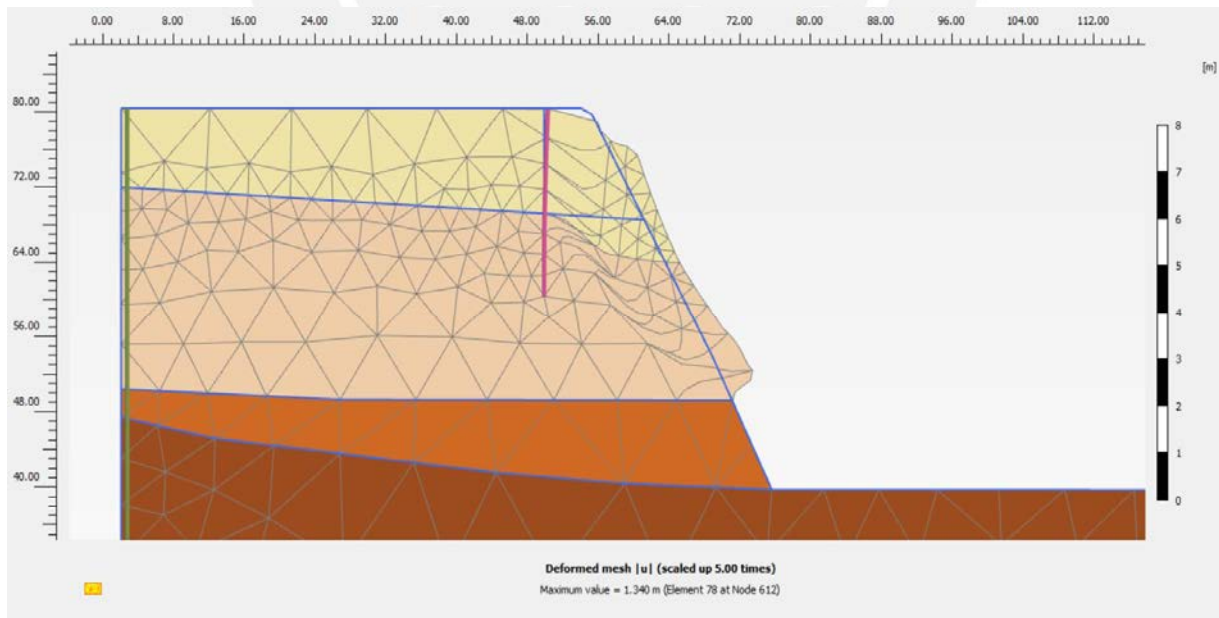


Figura 35 Resultado análisis de estabilidad considerando reforzamiento para el malecón Castagnola (sección 5-5) mediante software Plaxis 2DV20.

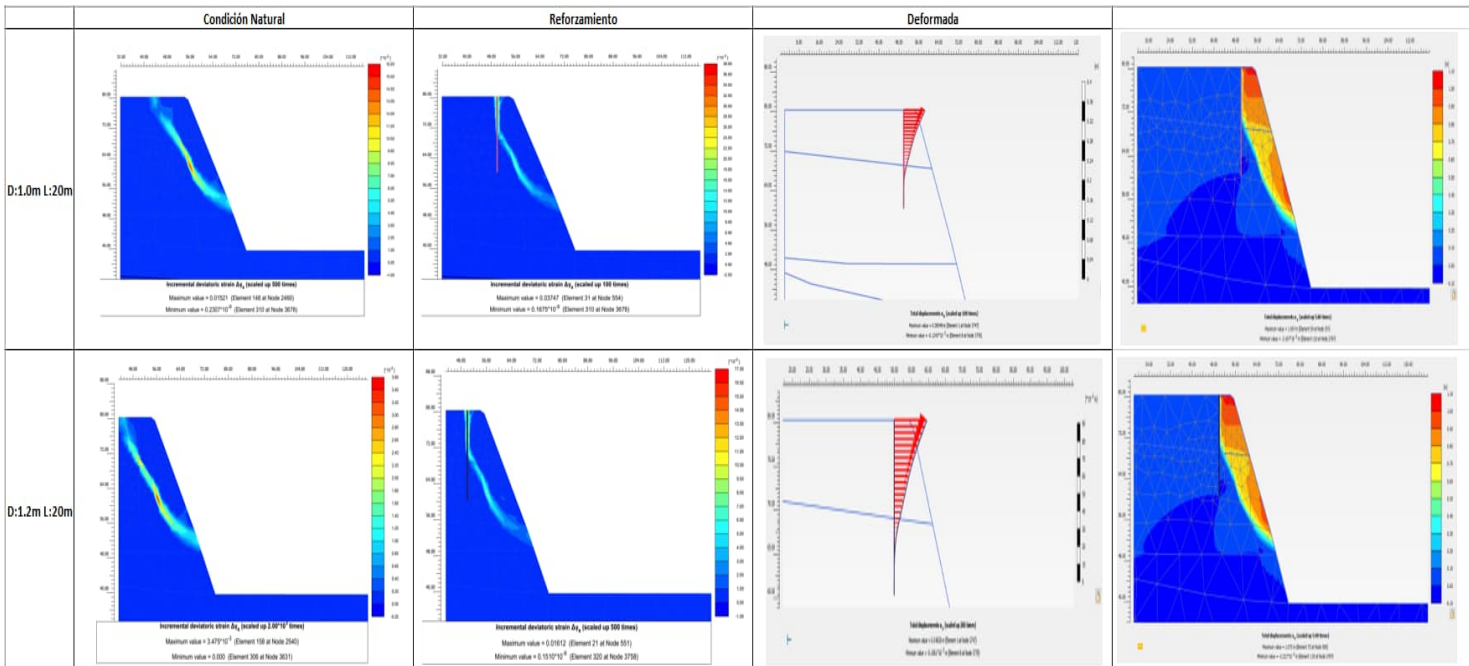


Figura 36 Resultado análisis de estabilidad considerando reforzamiento para el malecón Castagnola (sección 5-5) mediante software Plaxis 2DV20.

En la Figura 37 se presentan los diagramas de deflexión, esfuerzo cortante y momento flector a lo largo de los pilotes analizados:

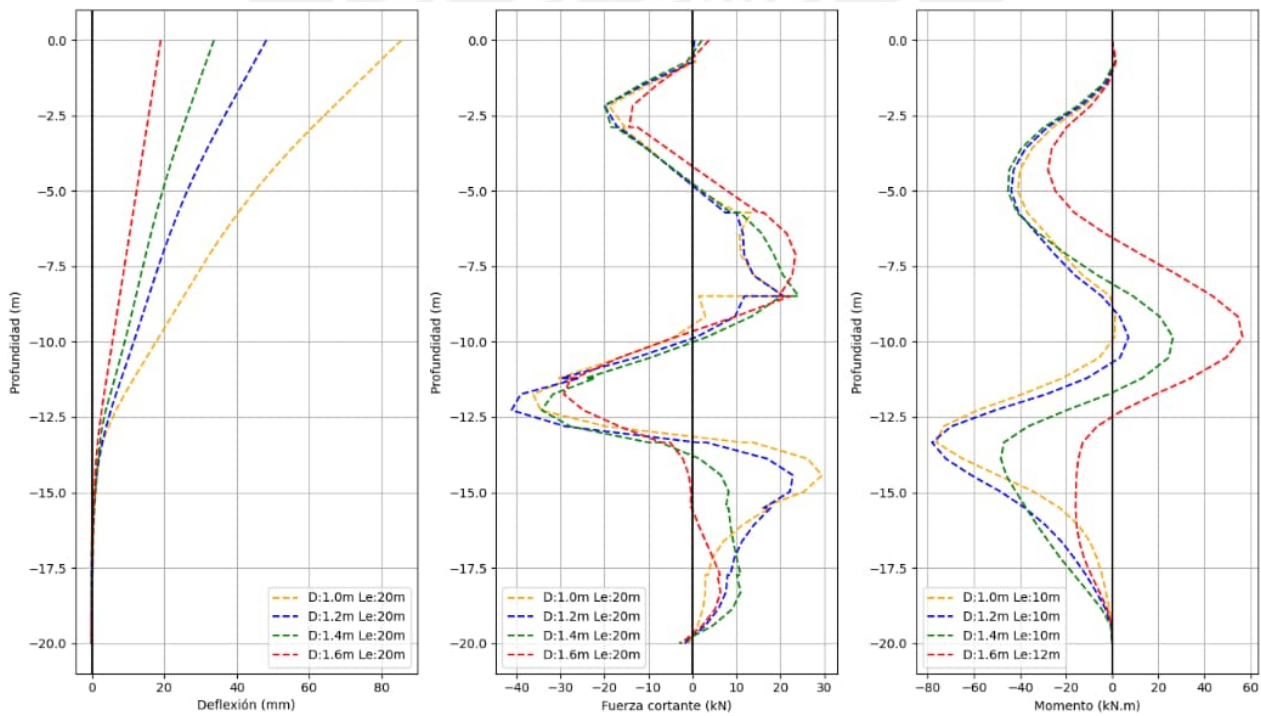


Figura 37 Resultados Modelo analizado en el software Plaxis 2DV20.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. Análisis de resultados con metodología ISE

Mediante el análisis planteado con la metodología Interacción Suelo Estructura (ISE), fue posible obtener los resultados presentados en el numeral 3.3, con los cuales se puede identificar lo siguiente:

- ✓ Al utilizar el método de equilibrio límite, para determinar el factor de seguridad (FoS) y posteriormente para determinar las solicitaciones a las cuales estarán sometidas las estructuras de reforzamiento (pilotes preexcavados), se considera un comportamiento de bloque rígido, en donde un espesor de suelo superior se moviliza a lo largo de la superficie de falla más probable generando un desplazamiento relativo con respecto al estrato de suelo inferior (estable), con lo cual se desprecian los efectos de la deformación de la masa de suelo, al verse sometida a un nuevo estado de esfuerzos.
- ✓ Utilizando la metodología propuesta por Broms, para determinar el comportamiento de pilotes cargados lateralmente, fue posible identificar que en todos los casos, las estructuras propuestas tendrán un comportamiento de pilote largo (ver Tabla 3-2 a Tabla 3-5) y por ende se espera que presenten un mecanismo de falla por flujo; en este sentido, la resistencia última de la estructura de contención, dependerá principalmente de comportamiento mecánico del concreto armado con el cual se ejecuten.
- ✓ Para la determinación de los diagramas de deflexión, esfuerzo cortante y momento flector se utilizaron curvas P-Y propuestas por Reese, una aplicable a suelos arenosos (comportamiento netamente friccional) y otra aplicable a suelos cementados (comportamiento friccional y cohesivo), encontrando que la primera formulación estima una menor deflexión (40% menos aprox.) que la estimada por la formulación de suelos cementados; así mismo, fue posible determinar que la formulación propuesta para suelos arenosos, estiman diagramas de esfuerzos cortantes y momentos flectores levemente inferiores que los estimados utilizando la formulación propuesta para suelos cementados.
- ✓ Teniendo en cuenta que las formulaciones de las curvas p-y han sido desarrolladas de forma experimental considerando características y condiciones particulares, por lo cual, para obtener resultados que representen de mejor manera el comportamiento de pilotes cargados lateralmente embebidos en la Grava de Lima, será necesario ejecutar pruebas de carga

lateral sobre pilotes instrumentados que permitan determinar su comportamiento real ante este tipo de solicitaciones.

5.2. Análisis de resultados con elementos Finitos

Mediante el análisis planteado con la metodología de Elementos Finitos, fue posible obtener los resultados presentados en el numeral 4.2, con los cuales se identifica lo siguiente:

- ✓ Para la determinación de los diagramas de deflexión, esfuerzo cortante y momento flector, se utilizó la herramienta de visualización del software. Se encontró que las deflexiones son superiores a las calculadas mediante el método de ISE (10 veces mayores) mientras que los diagramas de esfuerzos cortantes estimados presentan valores similares en magnitud pero con distribución diferente a lo largo del pilote, comparándolos con los cuantificados mediante el método ISE. Finalmente, se logra evidenciar que los diagramas de momento flector presentan valores negativos e inferiores con respecto a los cuantificados mediante el método ISE.
- ✓ Al implementar las medidas de contención propuestas (pilotes preexcavados), los modelos desarrollados muestran que, ante una posible condición de inestabilidad en los acantilados del Malecón Castagnola (pérdida de confinamiento lateral debido a flujos o deslizamientos), la infraestructura localizada en la parte superior podría mantener su condición estable, ya que el estrato de fundación presentaría deformaciones admisibles y no se esperaría alcanzar un estado de falla.
- ✓ Los resultados obtenidos para la distribución de esfuerzo cortante y momento flector muestran valores menores (más ajustados) comparando con el método ISE propuesto, validando que este último generaría diseños más robustos y por ende resultados conservadores.

5.3. Análisis de sensibilidad en los resultados

Para determinar la influencia de los datos de entrada con respecto a los resultados obtenidos, se propone realizar un análisis de sensibilidad, en el cual se utilizarán los coeficientes de variación indicados en la Tabla 5-1 (Baecher G. B., & Christian, 2005).

Tabla 5-1 Coeficientes de variación propiedades geotécnicas

Parámetro		COV literatura (%)	COV considerado (%)	Estrato	Unidad	Media	Valor Mínimo	Valor Máximo
ϕ_{cv}	Ángulo de fricción interna a presión constante	5-15	15	1. Grava arenosa medianamente densa	[°]	35	29.75	40.25
				2. Grava arenosa densa / compacta	[°]	40	34	46
γ	Peso unitario	1-10	10	1. Grava arenosa medianamente densa	[kN/m ³]	19	17.1	20.9
				2. Grava arenosa densa / compacta	[kN/m ³]	21	18.9	23.1
Ex	Módulo de reacción o rigidez inicial del suelo	.30-75	75	1. Grava arenosa medianamente densa	[kN/m ³]	24400	6100	42700
				2. Grava arenosa densa / compacta	[kN/m ³]	61000	15250	106750

COV= Coeficiente de variación

En este sentido, se utilizó el modelo generado mediante el software PyPile, obteniendo los siguientes resultados al variar cada uno de los parámetros indicados en la Tabla 5-1:

Variación de Ángulo de fricción interna a volumen constante (ϕ_{cv}) para análisis p-y: Modelo analizado en el PyPile considerando D:1.0m, Le:20m y valores medios de γ , E y Epy.

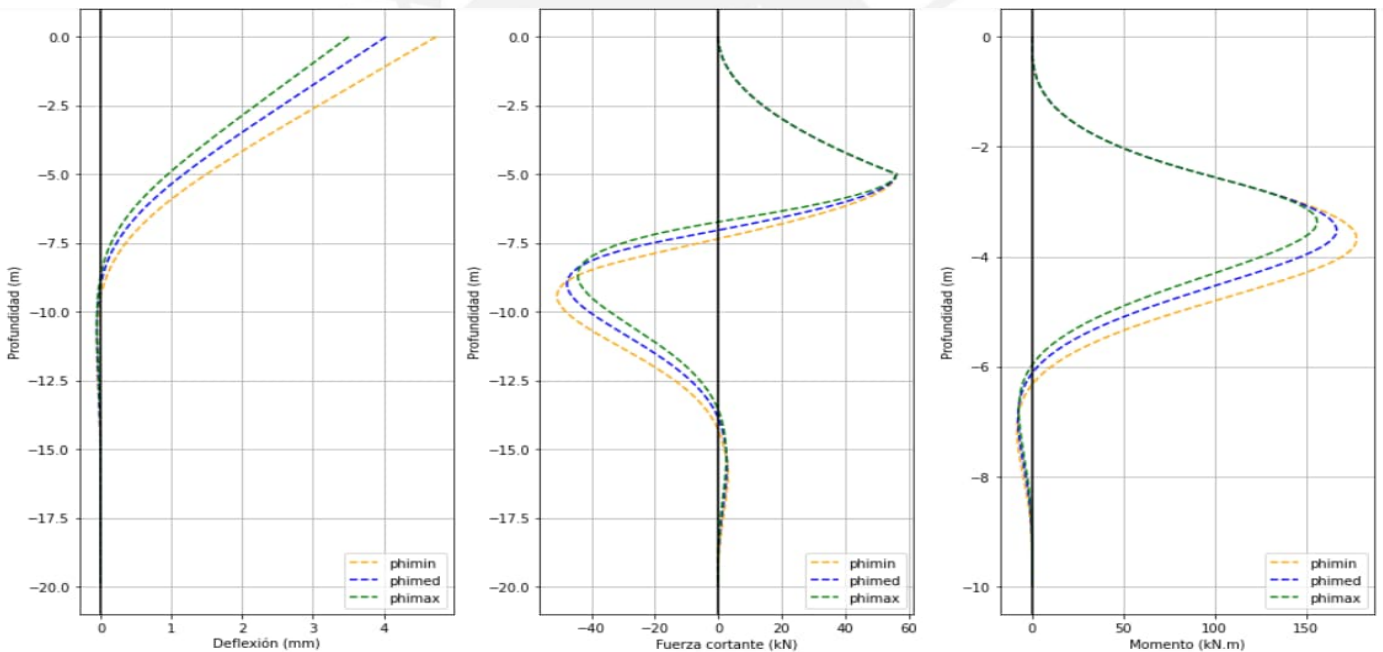


Figura 38 Resultados Análisis de sensibilidad variando ϕ_{cv} .

Tabla 5-2 Resumen resultados Análisis de sensibilidad variando ϕ_{cv} .

Parámetro a variar	Ángulo de fricción interna a volumen constante - ϕ_{cv} .										
Valor Considerado	Deflexión máxima (mm)	*	Deflexión mínima (mm)	*	Fuerza cortante máxima (kN)	Fuerza cortante mínima (kN)	*	Momento Flector máximo (kN.m)	*	Momento Flector mínimo (kN.m)	*
Valor Medio	4.034		-0.055		56.25	-47.792		166.852		-7.674	
Valor mínimo	4.743	18%	-0.057	-4%	56.25	-50.923	-7%	177.798	7%	-8.134	-6%
Valor máximo	3.508	-13%	-0.052	5%	56.25	-44.334	7%	156.151	-6%	-7.194	6%

*Diferencia vs valor medio (%)

Variación de peso unitario (γ) para análisis p-y: Modelo analizado en el PyPile considerando D:1.0m, Le:20m y valores medios de ϕ_{cv} , E y Epy.

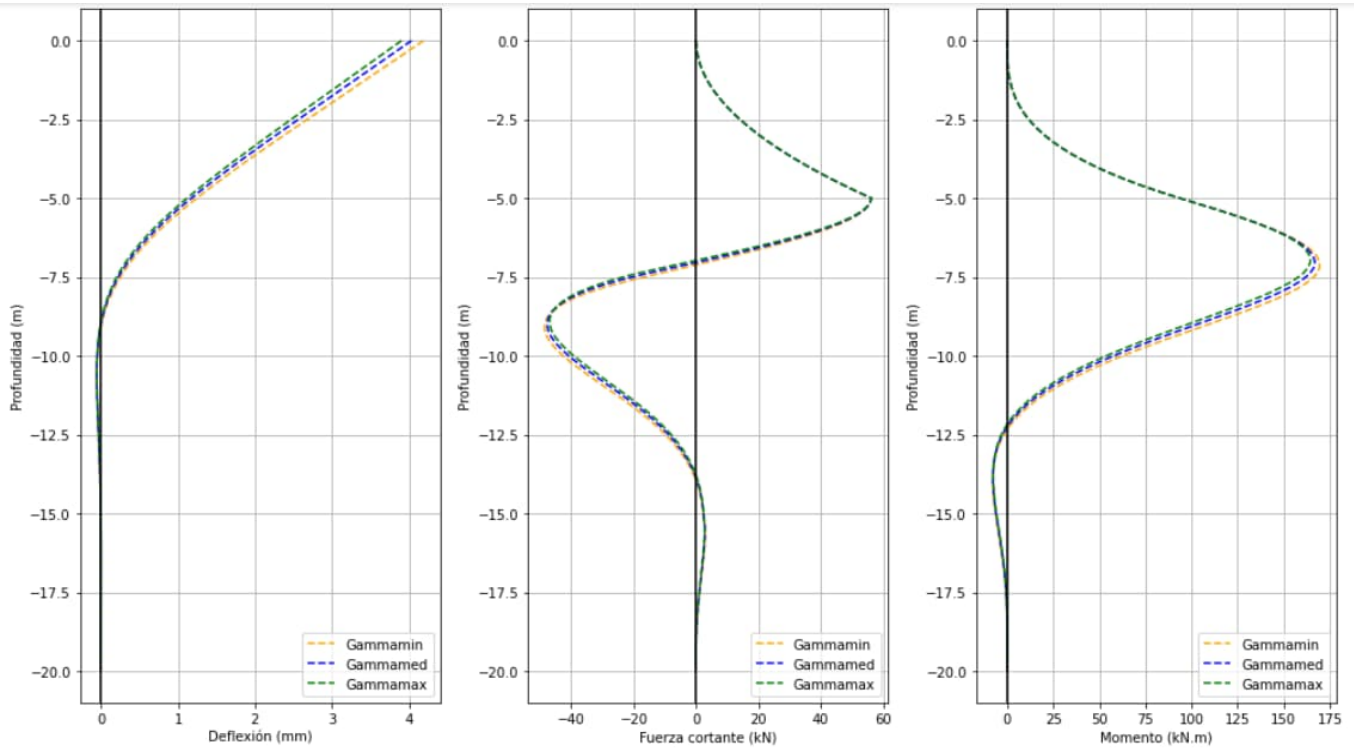


Figura 39 Resultados Análisis de sensibilidad variando Peso Unitario - γ

Tabla 5-3 Resumen resultados Análisis de sensibilidad variando Peso Unitario - γ

Parámetro a variar	Peso unitario											
	Deflexión máxima (mm)	*	Deflexión mínima (mm)	*	Fuerza cortante máxima (kN)		Fuerza cortante mínima (kN)	*	Momento Flector máximo (kN.m)	*	Momento Flector mínimo (kN.m)	*
Valor Medio	3.563		-0.055		56.25		-47.792		166.852		-7.674	
Valor mínimo	3.704	4%	-0.055	0%	56.25	0%	-48.541	2%	169.38	2%	-7.797	2%
Valor máximo	3.444	-3%	-0.054	-2%	56.25	0%	-46.962	-2%	164.472	-1%	-7.575	-1%

*Diferencia vs valor medio (%)

Variación de Módulo de reacción o rigidez inicial del suelo (E_x) para análisis p-y: Modelo analizado en el PyPile considerando D:1.0m, Le:20m y valores medios de ϕ_{cv} , γ y E.

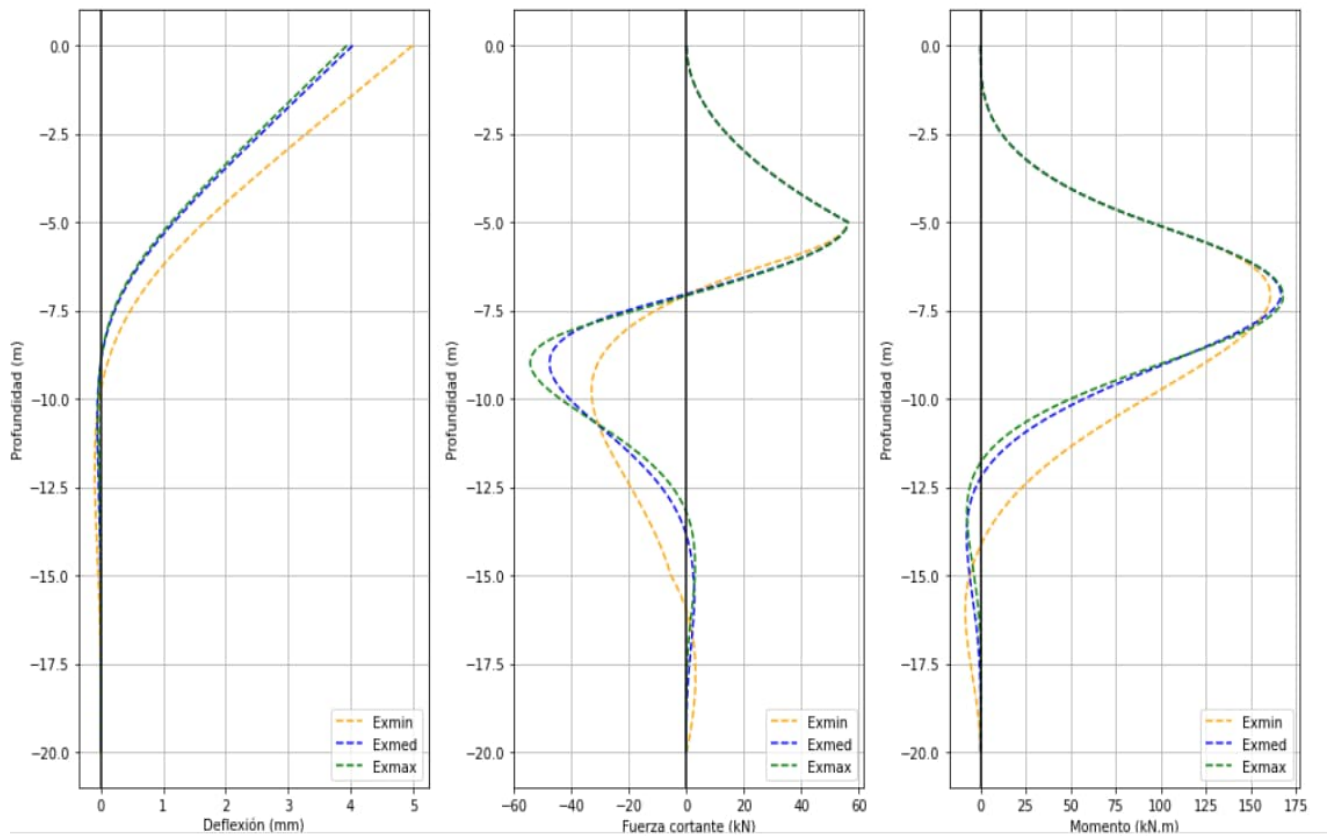


Figura 40 Resultados Análisis de sensibilidad variando Módulo de reacción o rigidez inicial del suelo – Ex.

Tabla 5-4 Resumen resultados Análisis de sensibilidad Módulo de reacción o rigidez inicial del suelo – Ex.

Parámetro a variar	Módulo de reacción o rigidez inicial del suelo											
Valor Considerado	Deflexión máxima (mm)	*	Deflexión mínima (mm)	*	Fuerza cortante máxima (kN)	Fuerza cortante mínima (kN)	*	Momento Flector máximo (kN.m)	*	Momento Flector mínimo (kN.m)	*	
Valor Medio	3.209		-0.055		56.25	-47.792		166.852		-7.674		
Valor mínimo	4.037	26%	-0.095	73%	56.25	0%	-33.103	-31%	160.964	-4%	-8.476	10%
Valor máximo	3.129	-2%	-0.041	-25%	56.25	0%	-54.537	14%	168.033	1%	-7.537	-2%

*Diferencia vs valor medio (%)

Los resultados de cada análisis de sensibilidad, así como los modelos realizados en el software PyPile (archivos editables) se encuentran en el Anexo f.

6. CONCLUSIONES

- ✓ En el presente caso de interés (Malecón Castagnola), en el cual se definieron las condiciones de contorno, esquema de aplicación de cargas y modelo estratigráfico característico, se usó la metodología Interacción suelo Estructura (Escenario 1), y así desarrollar el dimensionamiento geotécnico de pilotes preexcavados como elementos de contención aplicables al caso de los acantilados del malecón Castagnola en Lima, con los cuales, se plantea disminuir el riesgo de colapso de edificaciones, actualmente localizadas en cercanía al borde de estas laderas. Dicho dimensionamiento, fue validado, mediante la modelación con elementos finitos, utilizando el software Plaxis2DV20 (Escenario 2).
- ✓ Se consideró estado plano de deformaciones, para las dos metodologías evaluadas, con lo cual se tiene limitaciones importantes al evaluar el efecto del cambio en pendiente y morfología a lo largo de los acantilados de la Costa Verde, asumiendo que tanto las características geométricas como las características estratigráficas son homogéneas en un tramo de ladera mayor a 3 veces la altura de esta. Sin embargo, es importante mencionar que en el caso del Malecón Castagnola, la geomorfología y la distribución estratigráfica tiene variación espacial, por lo cual, para obtener un modelo más representativo se debería considerar el desarrollo de un análisis tridimensional y ver las variaciones en términos de estabilidad de la ladera.
- ✓ Al utilizar el método de Interacción suelo estructura (ISE) planteado, para realizar el dimensionamiento de pilotes para su implementación como estructuras de estabilización, se requirió llevar a cabo un análisis de estabilidad por equilibrio límite para determinar una profundidad de superficie de falla probable, y con la cual se definió el mecanismo de falla a utilizar en el análisis con curvas p-y. Por ello se usó un análisis de sensibilidad para determinar la fuerza ejercida por la masa movilizada sobre el pilote (ver Tabla 3-1). Esto tiene como limitante que el volumen de suelo movilizado se considera como un bloque rígido y que no se determina el cambio de profundidad de la superficie de falla al tener ejecutada la pantalla de pilotes de estabilización.
- ✓ Al utilizar el análisis mediante elementos finitos (EF), para realizar el dimensionamiento de pilotes para su implementación como estructuras de estabilización, se pudo considerar la superficie de falla más probable en la ladera mediante el uso de factor de seguridad numérico (SSR), tanto en la etapa de condición natural como la etapa donde se tiene

ejecutada la pantalla de pilotes de estabilización, con lo cual se espera tener una mayor certeza de las solicitaciones que deberá soportar la pila.

- ✓ Como se puede observar en la Figura 37, con la modelación mediante elementos finitos se tiene una disminución en la profundidad de la superficie de falla y por ende aumento en el factor de seguridad, al utilizar pilas con diámetro de 1.6m (cercana a 3m comparándolo con los diámetros de 1.4m y 1.2m). Sin embargo, es importante considerar que esta geometría presenta una mayor complejidad en su ejecución desde el punto de vista constructivo.
- ✓ Se logra identificar diferencias en los resultados de factor de seguridad entre lo obtenido mediante el análisis por equilibrio límite con lo obtenido en la modelación por elementos finitos, lo cual se debe principalmente a que los factores de seguridad analítico (FoS) y numérico (SSR), presentan diferencias conceptuales de cada método.
- ✓ Analizando los diagramas de deflexión, esfuerzo cortante y momento flector, reportados con el software Plaxis 2D, se encuentra que las deflexiones son superiores a las calculadas mediante el método de ISE (10 veces mayores) y que los diagramas de esfuerzos cortantes estimados presentan valores similares en magnitud pero con distribución diferente a lo largo del pilote, comparándolos con los cuantificados mediante el método ISE; finalmente, se logra evidenciar que los diagramas de momento flector presentan valores negativos e inferiores con respecto a los cuantificados mediante el método ISE.
- ✓ En ambos métodos utilizados (ISE y EF), se logra confirmar que al implementar las medidas de contención propuestas (pilotes preexcavados), los modelos desarrollados muestran que, ante una posible condición de inestabilidad en los acantilados del Malecón Castagnola (pérdida de confinamiento lateral debido a flujos o deslizamientos), la infraestructura localizada en la parte superior podría mantener su condición estable, ya que el estrato de fundación presentaría deformaciones admisibles, disminuyendo la probabilidad de ocurrencia de un estado de falla.
- ✓ Al comparar los resultados obtenidos con el método ISE planteado frente al análisis de EF, en el primero se obtuvieron valores menores de deflexiones en la cabeza de los pilotes, lo cual lleva a considerar que las estructuras de estabilización, pueden soportar mayores magnitudes de carga ante solicitaciones horizontal; sin embargo, para validar esta conclusión es de vital importancia desarrollar curvas p-y propias mediante la

instrumentación de pilotes o pilas ejecutadas en la grava de Lima y sometidas a cargas laterales controladas.

- ✓ En el análisis de sensibilidad, se pudo identificar que la estimación de la deflexión, distribución de cortante y momento flector de los pilotes en suelos granulares, se ve directamente afectada con la variación del Ángulo de fricción interna a volumen constante (ϕ_{cv}) y el módulo de rigidez inicial del suelo. Con la evaluación del peso unitario, no se logró identificar un impacto representativo en los resultados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Achs, G. (2009). Soil – Structure Interaction and Seismic Effects. In F.-K. C. and Y. F. Christian Boller (Ed.), *Encyclopedia on Structural Health Monitoring* (Issue Wiley, John, p. Chapter 138). John Wiley & Sons, Ltd.
- Barton, N., & Kjærnsli, B. (1981). Shear strength of rockfill. *Journal of the geotechnical engineering division* 107.7, 873-891.
- Baecher G. B., & Christian, J. T. (2005). Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering. In John Wiley & Sons. (Vol. 47, Issue 1). <https://doi.org/10.1198/tech.2005.s838>
- Bernal, I., & Tavera, H. (2020). Estudio geofísico de los acantilados de la Costa Verde en el distrito de Magdalena del Mar. https://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//9717_estudio-geofisico-de-los-acantilados-de-la-costa-verde-en-el-distrito-de-magdalena-del-mar.pdf
- Bolton, M. D., Fragszy, R. J., & Lee, D. M. (1991). Broadening the specification of granular fills. *Transportation Research Record*, 1309(1), 35–41.
- Cañari, M. (2001). “Análisis de la Estabilidad de Taludes de la Costa Verde”. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería, Facultad de Ingeniería Civil. Tesis de Grado,.
- Carrillo Gil, A. (1979). Estabilidad y resistencia de conglomerado de Lima Metropolitana. *El Ingeniero Civil*, I.
- Cheng Y., & Lau, C. (2014). *Slope Stability Analysis and Stabilization*. Boca Ratón: CRC Press.
- Coll Calderón, J. D. (2018). Investigación geotécnica para la red del Metro de Lima. *Perfiles de Ingeniería*, 13(13), 25–34. https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v13i13.1460
- Constantino, R., & Paulín, J. (1996). Programa de computadora para ISE-Pilotes cargados lateralmente DISP2 R. Rivera.pdf.
- Dorador, L. (2018). Una Revisión de la Metodología de Granulometría Paralela o Escalamiento de Curvas Homotéticas aplicado a la Caracterización Geotécnica de Materiales Una Revisión de la Metodología de Granulometría Paralela o Escalamiento de Curvas Homotéticas aplicado a I. *Sociedad Chilena de Geotecnia*, December, 10.

- FHWA. (2010). *Drilled Shafts: Construction procedures and LRFD design methods*. New York.
- GSAQ SAC. (2020). Información básica de Ingeniería. Estabilización Malecón Castagnola (pp. 156–181).
- Iannacchione, A., & Vallejo, L. E. (2000). Shear strength evaluation of clay-rock mixtures. *Geo-Denver 2000*, © 2000 American Society of Civil Engineers, 179–191. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/40512\(289\)16](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/40512(289)16)
- INGEMMET. (2019). Evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa en el malecón Castagnola - Acantilado de la Costa Verde. https://repositorio.ingemmet.gob.pe/bitstream/20.500.12544/2255/1/A6930-Evaluacion_de_peligros_Malecon_Castagnola_Costa_Verde-Lima.pdf
- Ingemmet. (2023). Informe Técnico N° A7351 “CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA, HIDROGEOLÓGICA, EVALUACIÓN DE PELIGROS . Lima.
- Irfan, T. Y., & Tang, K. . (1992). Effect of the coarse fractions on the shear strength of colluvium (p. 15/92).
- Ito T., Matsui, T., & Hong W. (1981). Design method for stabilizing piles against landslide - One Row of piles. *Soils and Foundations*, 21–37.
- Kalender, A., Sonmez, H., Medley, E., Tunusluoglu, C., & Kasapoglu, K. E. (2014). An approach to predicting the overall strengths of unwelded bimrocks and bimsoils. *Engineering Geology*, 183, 65–79. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2014.10.007>
- Kanagasabai, S., Smethurst, J. A., & Powrie, W. (2011). Three-dimensional numerical modelling of discrete piles used to stabilize landslides. 1411, 1393–1411. <https://doi.org/10.1139/T11-046>
- Lambe, T. &. (1972). *Mecánica de suelos*.
- León, W., Villacorta, S., & Teves, N. (2015). Geología y evaluación de peligros geológicos en la costa verde. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.31688.47360>
- Municipalidad de Lima. (2020, 10 19). MunLima. Retrieved from <http://www.munlima.gob.pe/noticias/item/40641-municipalidad-de-lima-lanzo-licitacion-para-obra-de-estabilizacion-de-taludes-en-acantilado-del-malecon-castagnola>
- Nanclares Arango, F. J. (2018). Comportamiento mecánico de suelos grueso granulares de origen aluvial. 234.
- Potts, D., & Axelsson, K. (Eds.). (2002). *Guidelines for the use of advanced numerical analysis*. (Vol. 1, Issue Thomas Telford.).
- Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1990). *Pile Foundation Analysis and Design* (pp. 1–397).
- Poulos, H. (1995). Design of reinforcing piles to increase slope stability. *Canadian Geotechnical Journal*, 808.818.

- Prakash, S., & Sharma, H. (1990). *Pile foundations in engineering practice*. New York. http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=3ePSnCRi5kUC&oi=fnd&pg=PR15&dq=Pile+Foundations+in+Engineering+Practice&ots=k35SWoih_V&sig=Og5b2e_MJBZfncRF5kVpZyWePzU
- Reese, L., Van Impe, W., & Holtz, R. (2011). *Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading*. In *Applied Mechanics Reviews* (Vol. 55, Issue 1). <https://doi.org/10.1115/1.1445326>
- Republica, L. (2020, Diciembre 16). LR DATA. Retrieved from LR DATA: <https://data.larepublica.pe/malecon-castagnola-sombras-irregularidades-detras-de-la-obra/>
- Romo, M. P., Mendoza, M. J., & García, S. R. (2000). Geotechnical factors in seismic design of foundations state-of-the-art report. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(3), 347–370. <https://doi.org/10.5459/bnzsee.33.3.347-370>
- Sanchez Rodriguez, S., & Maria, R. O. J. (2016). Caracterización de suelos granulares gruesos . El caso de la Grava de Lima . SIMPOSIO SOBRE RECONOCIMIENTO, TRATAMIENTO Y MEJORA DEL TERRENO, October, 305–312. https://www.researchgate.net/publication/309346550_Caracterizacion_de_suelos_granulares_gruesos_El_caso_de_la_Grava_de_Lima
- Sharma , H. D., & Prakash, S. (1990). *Pile Foundations in engineering practice*. John Wiley & Sons, Inc.
- Siddiqi, F. (1984). *STRENGTH EVALUATION OF COHESIONLESS SOILS WITH OVERSIZE PARTICLES (ROCKFILL DAMS, CYCLIC EARTH STATIC SYSTEM COMPLIANCE CORRECTION)*. Davis: University of California,.
- Sonmez, H., Kasapoglu, K. E., Coskun, A., Tunusluoglu, C., Medley, E. W., & Zimmerman, R. W. (2010). A conceptual empirical approach for the overall strength of unwelded bimrocks. *Rock Engineering in Difficult Ground Conditions - Soft Rocks and Karst - Proceedings of the Regional Symposium of the International Society for Rock Mechanics, EUROCK 2009*, 357–360.
- Vallejo, L. E., & Lobo-Guerrero, S. (2012). The shear strength of granular materials containing dispersed oversized particles: DEM analysis. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 6(3), 371–379. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2012.06.03.371-379>
- Vargas, A. M. (2007). *Conglomerado de Lima Metropolitana en Cimentacinoes*. Conferencia Internacinoal en Ingeniería Sísmica (pp. 5-7). Lima: UNI-CISMID.
- Verdugo, Ramón; de la Hoz, K. (2006). Geomechanical Characterization of Coarse Granular. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil.*, 6(2), 199–214.
- Zeevaert*, L. (1988). Interacción Suelo-Estructura De Cimentaciones Profundas En Edificios Altos. In *Revista de Ingeniería Sísmica* (Issue 32, p. 21). <https://doi.org/10.18867/ris.32.322>

ANEXOS

- a) Investigación geotécnica – Malecon Castagnola
- b) Análisis de estabilidad
- c) Prediseño pilotes método de Broms
- d) Prediseño pilotes método curvas PY
- e) Archivos soporte análisis elementos finitos - Modelo Plaxis





a) Investigación geotécnica – Malecon Castagnola

RESUMEN EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA

RESUMEN EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA									
ID	Tipo	Coordenadas 18S WGS-84				Fuente	Información de interés	Disponibilidad/Aval	
		Este	Norte	Este	Norte				
Información Topográfica									
Levantamiento						(SIGRID 2020)	Curvas de nivel - DEM	Si, informe técnico disponible al público en general.	
Información geología-geomorfología									
Informe Técnico A6930	Informe técnico	274200	8662000	274400	8661800	(Ingemmet 2019)	Unidades litoestratigráficas Pendiente del terreno / Unidades geomorfológicas Descripción derrumbe en el Malecón Castagnola	Si, informe técnico disponible al público en general.	
		Inicio		Fin					
ID	Tipo	Este	Norte	Este	Norte	Profundidad Investigación (m)	Fuente	Parámetro	Disponibilidad/Aval
Exploración geotécnica Directa									
C-1 (CP-11)	Calicatas - Cono Peck	274309.9	8661926.1			4 (Cono 5.2)	Expediente técnico del Proyecto: 14857-20 Reparación de estabilizadores de suelo en los acantilados del Circuito de playas de la Costa Verde, Distrito de Magdalena del Mar.	C (Kg/cm ²), Ø (°), K, γ (Ton/m ³)	Si, descarga de la página web del Sistema Electrónico de Contrataciones del Estado - SEACE (https://prodapp2.seace.gob.pe/seacebus-s-unid-publi/buscadorPublico/buscadorPublico.html)
C-2 (CP-10)	Calicatas - Cono Peck	274291.9	8661951.7			4 (Cono 9.5)			
C-3 (CP-9)	Calicatas - Cono Peck	274272.4	8661938.3			6.2 (Cono 10.8)			
C-4 (CP-12)	Calicatas - Cono Peck	274253.8	8661946.8			4 (Cono 5.1)			
C-5 (CP-16)	Calicatas - Cono Peck	274226.3	8661960.6			4 (Cono 2.4)			
C-6 (CP-15)	Calicatas - Cono Peck	274324.8	8661924.8			4 (Cono 2.65)			
C-7 (CP-2)	Calicatas - Cono Peck	274281.1	8661915.3			1.2 (Cono 16.05)			
C-8 (CP-3)	Calicatas - Cono Peck	274266.3	8661921.2			1.2 (Cono 15.6)			
C-9 (CP-4)	Calicatas - Cono Peck	274247.7	8661929.0			1.2 (Cono 14.7)			
C-10 (CP-8)	Calicatas - Cono Peck	274243.0	8661918.2			1.2 (Cono 13.3)			
C-11 (CP-7)	Calicatas - Cono Peck	274262.3	8661910.2			1.2 (Cono 14.7)			
C-12	Calicatas	274279.6	8661906.0			1.0			
CP-1	Cono Peck	274301.4	8661908.1			10.2			
CP-5	Cono Peck	274291.0	8661911.8			10.2			
CP-6	Cono Peck	274279.6	8661906.0			14.4			
CP-13	Cono Peck	274311.8	8661906.2			4.8			
CP-14	Cono Peck	274219.8	8661939.3			2.7			
LS-1	LRS	274430.0	8661975.0	274302.0	8661902.0	30.0			
LS-2	LRS	274216.0	8661944.0	274322.0	8661910.0	30.0			
LS-3	LRS	274245.0	9662008.0	274219.0	8661938.0	30.0			
C-3	Calicatas	274273.0	8661898.0			3.0	Ciudades Sostenibles	C (Kg/cm ²), Ø (°), γ (Ton/m ³)	Si, informe técnico disponible al público en general.
DPSH - 03	DPSH	274254.0	8661923.0			7.2			
Exploración geotécnica Indirecta (Geofísica)									
LR01-MM	LRS	274214.0	8661938.0	274303.0	8662189.0	65.00	(I.G.P. 2020)	Vp	Si, informe técnico disponible al público en general.
LR02-MM	LRS	274602.0	8661684.0	274651.0	8661789.0	65.00	(I.G.P. 2020)	Vp	
LS03-MM	MASW - MAM	274247.0	8661777.0	274185.0	8661804.0	35.0	(I.G.P. 2020)	Vs	Si, informe técnico disponible al público en general.
LS07-MM	MASW - MAM	274230.0	8661937.0	274293.0	8661914.0	90.0	(I.G.P. 2020)	Vs	
LE01-MM	LE	273983.0	8662031.0	274300.0	8661900.0	80.0	(I.G.P. 2020)	Nivel freático	Si, informe técnico disponible al público en general.
LG01-MM	SG	273983.0	8662031.0	274300.0	8661900.0		(I.G.P. 2020)	Estratigrafía	
MM03-06	HIV	274222.0	8661949.0				(I.G.P. 2020)	Frecuencia predominante y Período	Si, informe técnico disponible al público en general.
MM04-06	HIV	274284.7	8661943.1				(I.G.P. 2020)	Natural de terreno	

Convenciones

DPSH	Penetración dinámica super pesada
LRS	Línea de refracción sísmica
MASW-MAM	Análisis multicanal de ondas superficiales - microtremores
LE	Tomografía de resistividad eléctrica - ERT
SG	Sección gravimétrica
HIV	Razones espectrales

b) Resultados Análisis de estabilidad



Resumen Factores de seguridad –parámetros de resistencia inicial

Condición		Sección de análisis	Factor de seguridad	
			Falla Local	Falla Global
ID	Descripción			
1	Estática Falla Circular (Considera sobrecarga a compresión)	4-4	1.604	1.273
		5-5	1.206	1.088
2	Estática Falla Bloque (Considera sobrecarga a compresión)	4-4	3.054	2.59
		5-5	1.206	1.136
3	Pseudo Estática Falla Circular coef. sísmico horizontal	4-4	1.227	0.905
		5-5	0.842	0.711
4	Pseudo Estática Falla Circular coef. sísmico horizontal y vertical	4-4	1.208	0.858
		5-5	0.838	0.706
4	Pseudo Estática Falla en Bloque coef. sísmico horizontal	4-4	2.266	1.961
		5-5	0.939	0.811
5	Pseudo Estática Falla en Bloque coef. sísmico horizontal y vertical	4-4	2.179	1.921
		5-5	0.997	0.801

Resumen Factores de seguridad – análisis de sensibilidad parámetros de diseño
condición pseudoestática

Condición		Sección de análisis	Factor de seguridad	
			Falla Local	Falla Global
ID	Descripción			
1	Estática Falla Circular (Considera sobrecarga a compresión)	4-4	1.950	1.539
		5-5	1.575	1.295
2	Estática Falla Bloque (Considera sobrecarga a compresión)	4-4	1.966	1.606
		5-5	1.602	1.344
3	Pseudo Estática Falla Circular coef. sísmico horizontal	4-4	1.395	1.129
		5-5	1.217	0.999
4	Pseudo Estática Falla Circular coef. sísmico horizontal y vertical	4-4	1.383	1.103
		5-5	1.178	0.958
4	Pseudo Estática Falla en Bloque coef. sísmico horizontal	4-4	1.430	1.189
		5-5	1.226	1.004
5	Pseudo Estática Falla en Bloque coef. sísmico horizontal y vertical	4-4	1.424	1.166
		5-5	1.189	0.977

c) Prediseño pilotes método de Broms



▼ BIBLIOTECAS

```

1 import numpy as np
2 import matplotlib.pyplot as plt
3 from scipy import optimize
4 class color:
5     BOLD = '\033[1m'
6     END = '\033[0m'
7 from tabulate import tabulate

```

▼ DATOS

```

1 # SUELO
2 cu=23 #Resistencia no drenada (kPa)
3 phi=39
4 kp=np.round((1+np.sin(np.radians(phi)))/(1-np.sin(np.radians(phi))),2)
5 gamma=19 #Peso unitario (kN/m³)
6
7 # PILOTE
8 d=0.8 #Diámetro del pilote (m)
9 L=10 #Longitud Pilote (m)
10 e=3 #Excentricidad (m)
11
12 b=(np.pi*((d*100)**2)/4)**0.5 #Ancho equivalente (cm) = Área del pilote^0.5
13 ro=0.01*b*(b-6) #Cuantía acero aproximada (cm²)
14 My=(0.033*b*(b-6)**2)/10 #Momento de fluencia aproximado para un elemnto tipo pila
15 #My=304 #Momento de fluencia definido en ensayos de carga (kN-m)

1 # Ecuaciones cuadráticas a resolver
2 def equilibrio(Hu):
3     f=Hu/(9*cu*d)
4     g=L-1.5*d-f
5     M1=Hu*(e+1.5*d+0.5*f)
6     M2=2.25*cu*d*(g**2)
7     return M1-M2
8
9
10 def eq_largo_libre(Hu):
11     M3=((Hu**2)/(18*cu*d)+Hu*(e+1.5*d))
12     M4=My
13     return M3-M4
14
15 def eq_largo_fijo(Hu):
16     M5=2*My

```

```

17 M6=((1.5*d*Hu)+((Hu**2)/(18*cu*d)))
18 return M6-M5
19
20 def eq_largo_libre_fric(Hu):
21     M7=My
22     M8=((e*Hu)+((0.54*((Hu/(gamma*d*kp))**0.5))*Hu))
23     return M8-M7
24
25 def eq_largo_fijo_fricc(Hu):
26     M10=2*My
27     M9=((e+(((0.67*0.82)*((Hu/(gamma*d*kp))**0.5))))*Hu)
28     return M9-M10

1 Hu_corto_libre_coh=optimize.newton(equilibrio,2) #como x0, se puede poner cualquier número
2 Hu_largo_libre_coh=optimize.newton(eq_largo_libre,0)
3 Hu_corto_fijo_coh=9*cu*d*(L-(1.5*d))
4 Hu_largo_fijo_coh=optimize.newton(eq_largo_fijo,0)
5
6 print(color.BOLD+'Comportamiento en suelo cohesivo'+color.END)
7 print("Cabeza libre")
8 print("Falla como pilote corto:           ",round(Hu_corto_libre_coh,2),"kN")
9 print("Falla como pilote largo:          ",round(Hu_largo_libre_coh,2),"kN")
10
11 print("Cabeza restringida")
12 print("Falla como pilote corto:         ",round(Hu_corto_fijo_coh,2),"kN")
13 print("Falla como pilote largo:         ",round(Hu_largo_fijo_coh,2),"kN")

Comportamiento en suelo cohesivo
Cabeza libre
Falla como pilote corto:           468.49 kN
Falla como pilote largo:          23.08 kN
Cabeza restringida
Falla como pilote corto:           1788.48 kN
Falla como pilote largo:          124.95 kN

1 Hu_corto_libre_fric=Hu=(gamma*(L**3)*d*kp)/(2*(e+L))
2 Hu_largo_libre_fric=optimize.newton(eq_largo_libre_fric,0) #como x0, se puede poner cualqu
3 Hu_corto_fijo_fric=(1.5*gamma*(L**2)*d*kp)
4 Hu_largo_fijo_fric=optimize.newton(eq_largo_fijo_fricc,0)
5
6 print(color.BOLD+'Comportamiento en suelo friccionante-granular'+color.END)
7 print("Cabeza libre")
8 print("Falla como pilote corto:           ",round(Hu_corto_libre_fric,2),"kN")
9 print("Falla como pilote largo:          ",round(Hu_largo_libre_fric,2),"kN")
10
11 print("Cabeza restringida")
12 print("Falla como pilote corto:         ",round(Hu_corto_fijo_fric,2),"kN")
13 print("Falla como pilote largo:         ",round(Hu_largo_fijo_fric,2),"kN")

Comportamiento en suelo friccionante-granular
Cabeza libre

```

Falla como pilote corto:	6270.0 kN
Falla como pilote largo:	244.38 kN
Cabeza restringida	
Falla como pilote corto:	22572.0 kN
Falla como pilote largo:	446.01 kN

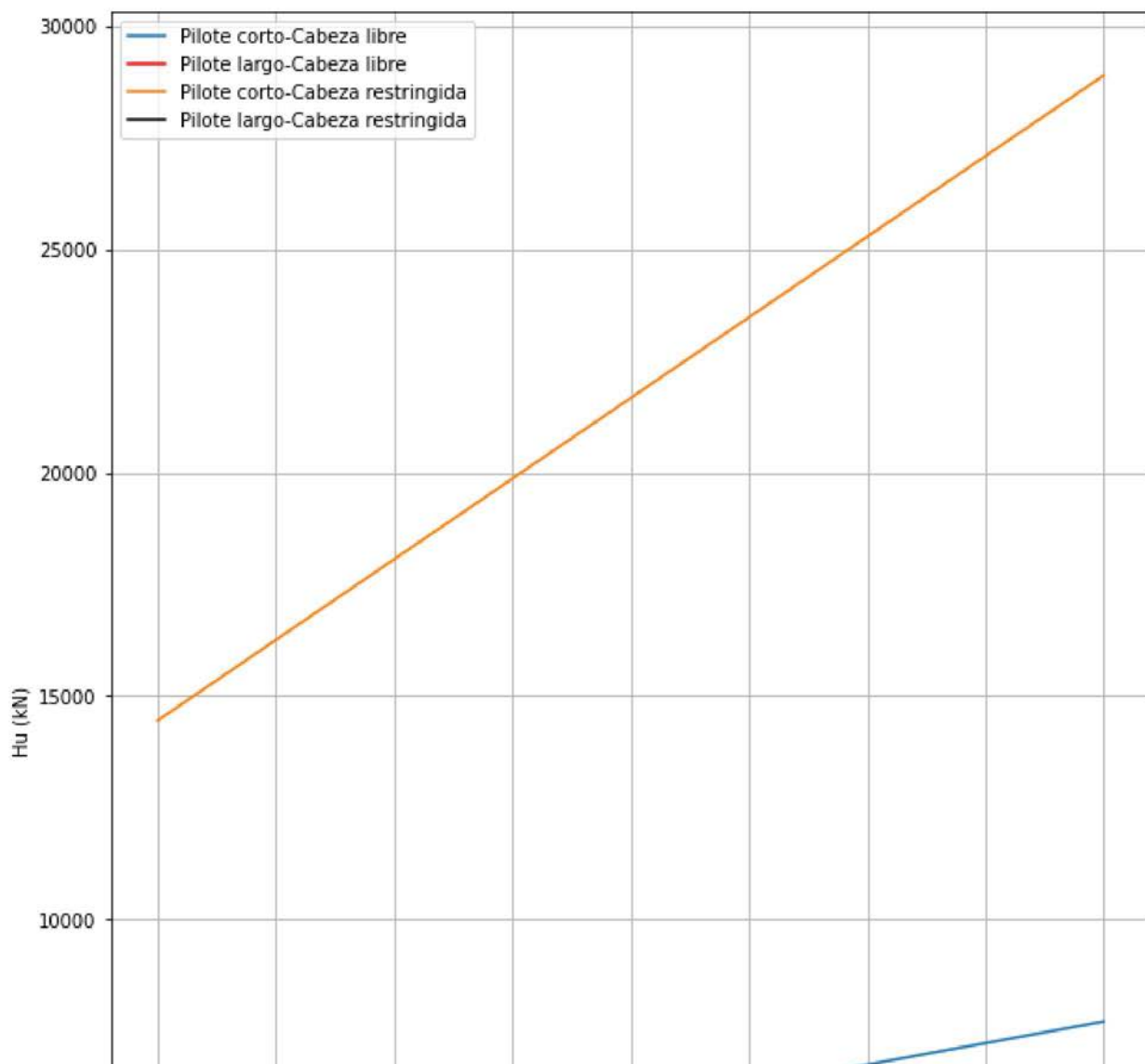
```

1 Hu_M = np.empty((5,5))          #Define matriz donde se almacenarán datos resistencia a carg
2 Hu_M [:] = 0
3 L=12
4
5 for i in range(0,5,1):
6     d=0.8+(i*0.2)    #Diámetro del pilote (m)
7     b=(np.pi*((d*100)**2)/4)**0.5    #Ancho equivalente (cm) = Área del pilote^0.5
8     ro=0.01*b*(b-6)    #Cuantía acero aproximada (cm^2)
9     My=(0.033*b*(b-6)**2)/100    #Momento de fluencia aproximado para un elemnto tipo p
10
11     Hu_M [0,i]=round((gamma*(L**3)*d*kp)/(2*(e+L)),2)    #Hu_corto_libre_fric=Hu
12     Hu_M [1,i]=round(optimize.newton(eq_largo_libre_fric,0),2) #Hu_largo_libre_fric (como x0
13     Hu_M [2,i]=round((1.5*gamma*(L**2)*d*kp),2)    #Hu_corto_fijo_fric
14     Hu_M [3,i]=round(optimize.newton(eq_largo_fijo_fricc,0),2) #Hu_largo_fijo_fric
15     Hu_M [4,i]=round(d,2)
16
17 indice = ['Pilote corto-Cabeza libre', 'Pilote largo-Cabeza libre', 'Pilote corto-Cabeza r
18 print(color.BOLD+'Resistencia ante carga lateral (kN) - Pila en suelo friccionante-granula
19 print(tabulate(Hu_M,tablefmt='fancy_grid',showindex=indice,))
20
21 fig , ax=plt.subplots(1,1,figsize=(10,14),sharex='all', sharey='all')
22 plt.plot(Hu_M[4,:],Hu_M[0,:],label="Pilote corto-Cabeza libre")
23 plt.plot(Hu_M[4,:],Hu_M[1,:],label="Pilote largo-Cabeza libre",c="red")
24 plt.plot(Hu_M[4,:],Hu_M[2,:],label="Pilote corto-Cabeza restringida")
25 plt.plot(Hu_M[4,:],Hu_M[3,:],label="Pilote largo-Cabeza restringida",c="black")
26 plt.legend(loc='upper left')
27 plt.xlabel("Diámetro Pila (m)")
28 plt.ylabel("Hu (kN)")
29 plt.grid()
30
31

```

Resistencia ante carga lateral (kN) - Pila en suelo friccionante-granular (Método de Broms)

Pilote corto-Cabeza libre	3852.29	4815.36	5778.43	6741.5	7704.58
Pilote largo-Cabeza libre	29.35	57.88	99.86	157.41	232.47
Pilote corto-Cabeza restringida	14446.1	18057.6	21669.1	25280.6	28892.2
Pilote largo-Cabeza restringida	56.25	109.99	188.33	294.83	432.72
Diámetro	0.8	1	1.2	1.4	1.6



Comportamiento carga lateral - Suelos Cohesivos Broms (1964)

```

1 #Curvas suelo Cohesivo
2 ratios_e_d=np.array([0,1,2,4,8,16,100])
3 ned=ratios_e_d.size
    
```

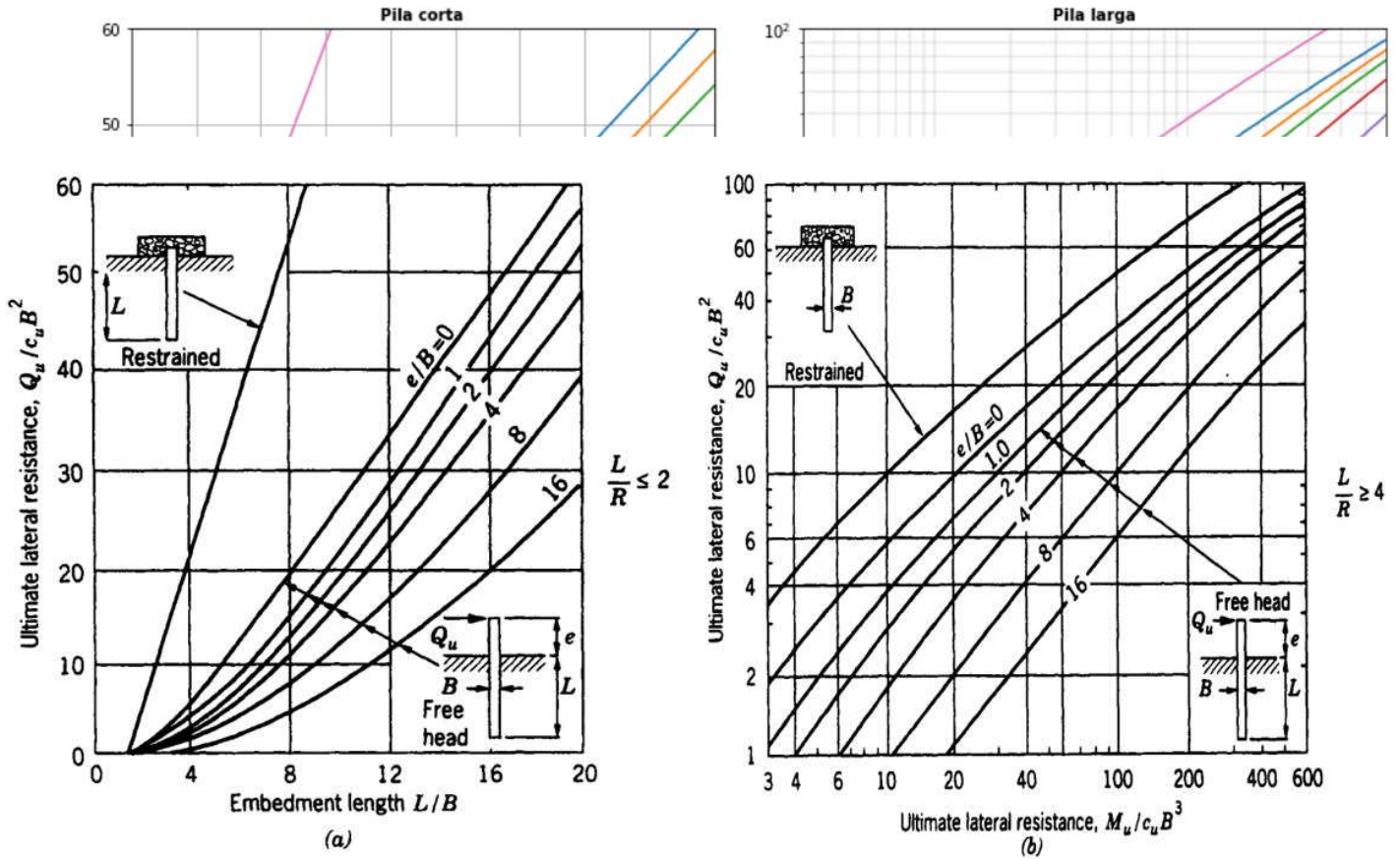
```

4
5
6 #Vector para el eje x
7 ratios_L_d=np.linspace(2,20,num=100)
8 nx=ratios_L_d.size
9
10 #Inicializacion de variables, puede tener cualquier valor
11 cu=1
12 d=1
13
14 print(color.BOLD+'Comportamiento pilas ante carga lateral - Suelo cohesivo ')
15
16 #----- Falla como Pilote corto
17 ratios_Hu_cu_d2=np.zeros(nx) #Vector vacio para almacenar resultados
18
19 fig , ax=plt.subplots(1,1,figsize=(12,6),sharex='all', sharey='all')
20 plt.subplot(1, 2, 1)
21
22 for i in range(ned): #ciclo para distintos e/d
23     e=d*ratios_e_d[i] #Excentricidad para cada curva
24
25     if e==100:
26         for j in range(nx): # Recorrer eje x y calcular Hu para cada valor de L/d
27             L=d*ratios_L_d[j]
28             Hu=9*cu*d*(L-(1.5*d))
29             ratios_Hu_cu_d2[j]=Hu/(cu*d**2)
30             plt.plot(ratios_L_d,ratios_Hu_cu_d2,label="Cabezal restringido")
31
32     else:
33         for j in range(nx): # Recorrer eje x y calcular Hu para cada valor de L/d
34             L=d*ratios_L_d[j]
35             Hu=optimize.newton(equilibrio,0)
36             ratios_Hu_cu_d2[j]=Hu/(cu*d**2)
37             plt.plot(ratios_L_d,ratios_Hu_cu_d2,label=f"e/d={ratios_e_d[i]}")
38
39
40
41 plt.title(" Pila corta ",fontsize=10,fontweight="bold")
42 plt.grid()
43 plt.xlabel("L/d")
44 plt.ylabel("Resistencia lateral última - Hu/(cu*d^2)")
45 plt.legend(loc='lower right')
46 plt.xlim(2,20,2)
47 plt.ylim(1,60,1)
48
49
50 #----- Falla como Pilote Largo
51
52 ratios_Hu_cu_d2=np.zeros(nx) #Vector vacio para almacenar resultados
53 #Vector para el eje x
54 ratios_My_cud3=np.linspace(3,600,num=100) #Vector vacio para almacenar resultados
55 nx=ratios_My_cud3.size

```

```
56
57 plt.subplot(1, 2, 2)
58
59 for i in range(ned): #ciclo para distintos e/d
60     e=d*ratios_e_d[i] #Excentricidad para cada curva
61
62     if e==100:
63         for j in range(nx): # Recorrer eje x y calcular Hu para cada valor de L/d
64             My=cu*(d**3)*ratios_My_cud3[j]
65             Hu=optimize.newton(eq_largo_fijo,0)
66             ratios_Hu_cu_d2[j]=Hu/(cu*d**2)
67             plt.plot(ratios_My_cud3,ratios_Hu_cu_d2,label="Cabezal restringido")
68
69     else:
70         for j in range(nx): # Recorrer eje x y calcular Hu para cada valor de L/d
71             My=cu*(d**3)*ratios_My_cud3[j]
72             Hu=optimize.newton(eq_largo_libre,0)
73             ratios_Hu_cu_d2[j]=Hu/(cu*d**2)
74             plt.plot(ratios_My_cud3,ratios_Hu_cu_d2,label=f"e/d={ratios_e_d[i]}")
75
76 plt.title("Pila larga",fontsize=10,fontweight="bold")
77 plt.grid(True,which='both',linewidth=0.4)
78 plt.xlabel("Momento de fluencia - My/cud3")
79 plt.ylabel("Resistencia lateral última - Hu/(cu*d^2)")
80 plt.legend(loc='lower right')
81 plt.xlim(3,600,1)
82 plt.ylim(1,100,10)
83 plt.xscale("log")
84 plt.yscale("log")
85
86 plt.tight_layout()
```

Comportamiento pilas ante carga lateral - Suelo cohesivo



- Carga Lateral última de pilas cortas (a) y largas (b) en suelos cohesivos (Broms, 1964-1965).

Fuente: Pile Foundations in engineering practice Prakash-Sharma 1990.

Comportamiento carga lateral - Suelos friccionante-Granular
Broms (1964)

```

1 #Curvas suelo friccionante-Granular
2 #ratios_e_d=np.array([0.001])
3 #ned=ratios_e_d.size
4
5 ratios_e_L=np.array([-0.1,0,0.2,0.4,0.6,0.8,1,1.5,2,3])
6 ned1=ratios_e_L.size
7
8 #----- Falla como Pilote corto
9 #Vector para el eje x
10 ratios_L_d=np.linspace(1,20,num=20)
11 nx1=ratios_L_d.size
12
13 #Inicializacion de variables, puede tener cualquier valor
14 d=1
15 L=1
16

```

```

17 print(color.BOLD+'Comportamiento pilas ante carga lateral - Suelo friccionante ')
18
19 ratios_Hu_kp_d3_gamma=np.zeros(nx1) #Vector vacio para almacenar resultados
20
21 fig , ax=plt.subplots(1,1,figsize=(12,6),sharex='all', sharey='all')
22 plt.subplot(1, 2, 1)
23
24 for i in range(ned1): #ciclo para distintos e/d
25     e=L*ratios_e_L[i] #Excentricidad para cada curva
26
27     if e==0.1:
28         for j in range(nx1): # Recorrer eje x y calcular Hu para cada valor de L/d
29             L=d*ratios_L_d[j]
30             Hu=(1.5*gamma*(L**2)*d*kp)
31             ratios_Hu_kp_d3_gamma[j]=Hu/(kp*(d**3)*gamma)
32             plt.plot(ratios_L_d,ratios_Hu_kp_d3_gamma,label="Cabezal restringido")
33
34     else:
35         for j in range(nx1): # Recorrer eje x y calcular Hu para cada valor de L/d
36             L=d*ratios_L_d[j]
37             Hu=(gamma*(L**3)*d*kp)/(2*(e+L))
38             ratios_Hu_kp_d3_gamma[j]=Hu/(kp*(d**3)*gamma)
39             plt.plot(ratios_L_d,ratios_Hu_kp_d3_gamma,label=f"e/L={ratios_e_L[i]}")
40
41
42
43 plt.title(" Pila corta ",fontsize=10,fontweight="bold")
44 plt.grid()
45 plt.xlabel("L/d")
46 plt.ylabel("Resistencia lateral última - Hu/(kp*d^3*γ)")
47 plt.legend(loc='upper left')
48 plt.xlim(2,20,1)
49 plt.ylim(1,200,10)
50
51 #----- Falla como Pilote Largo
52
53 ratios_e_d=np.array([0.1,0,1,2,4,8,16,32])
54 ned=ratios_e_d.size
55
56 #Vector para el eje x
57 ratios_My_d4gammakp=np.linspace(1,10000,num=100)
58 nxl=ratios_My_d4gammakp.size
59
60 ratios_Hu_kp_d3_gamma=np.zeros(nxl) #Vector vacio para almacenar resultados
61
62 plt.subplot(1, 2, 2)
63
64 for i in range(ned): #ciclo para distintos e/d
65     e=d*ratios_e_d[i] #Excentricidad para cada curva
66
67     if e==0.1:
68         for j in range(nxl): # Recorrer eje x y calcular Hu para cada valor de L/d

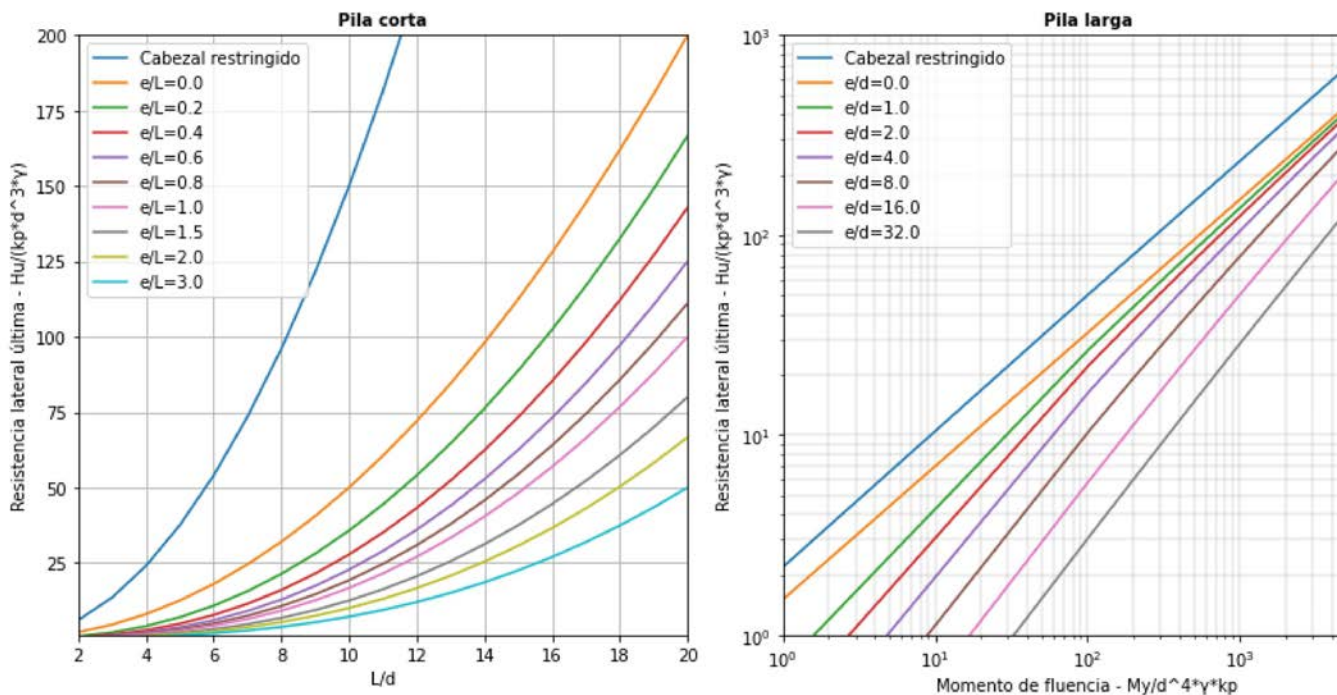
```

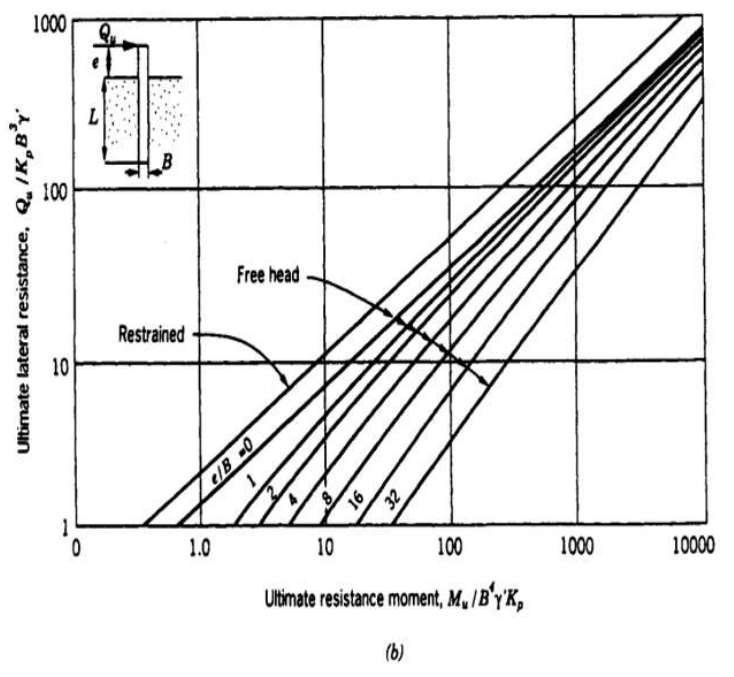
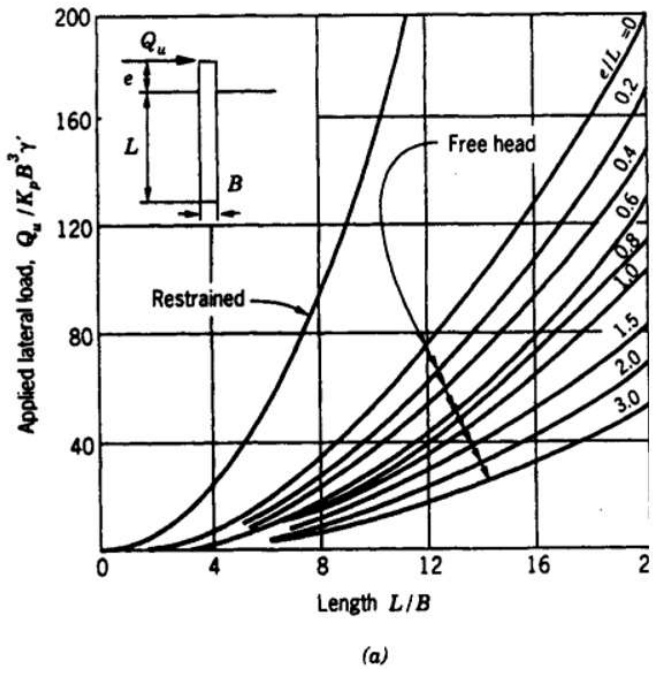
```

68 for j in range(nxl): # Recorrer eje x y calcular Hu para cada valor de L/d
69     My=(d**4)*gamma*kp*ratios_My_d4gammakp[j]
70     Hu=optimize.newton(eq_largo_fijo_fricc,0)
71     ratios_Hu_kp_d3_gamma[j]=Hu/(kp*(d**3)*gamma)
72     plt.plot(ratios_My_d4gammakp,ratios_Hu_kp_d3_gamma,label="Cabezal restringido")
73
74 else:
75     for j in range(nxl): # Recorrer eje x y calcular Hu para cada valor de L/d
76         My=(d**4)*gamma*kp*ratios_My_d4gammakp[j]
77         Hu=optimize.newton(eq_largo_libre_fric,0)
78         ratios_Hu_kp_d3_gamma[j]=Hu/(kp*(d**3)*gamma)
79         plt.plot(ratios_My_d4gammakp,ratios_Hu_kp_d3_gamma,label=f"e/d={ratios_e_d[i]}")
80
81
82 plt.title("Pila larga",fontsize=10,fontweight="bold")
83 plt.grid(True,which='both',linewidth=0.4)
84 plt.xlabel("Momento de fluencia - My/d^4*γ*kp")
85 plt.ylabel("Resistencia lateral última - Hu/(kp*d^3*γ)")
86 plt.legend(loc='upper left')
87 plt.xlim(1,10000,1)
88 plt.ylim(1,1000,1)
89 plt.xscale("log")
90 plt.yscale("log")
91
92 plt.tight_layout()

```

Comportamiento pilas ante carga lateral - Suelo friccionante





- Carga Lateral última de pilas cortas (a) y largas (b) en suelos friccionantes (Broms, 1964-1965).
 Fuente: Pile Foundations in engineering practice Prakash-Sharma 1990.

✓ 0 s completado a las 0:11



d) Prediseño pilotes método curvas PY



Pilote con diámetro 0.8m

L=10m

Pile Head Lateral Load = 145 kN
Pile Head Axial Load = 0 kN

Depth (m)	Deflection (mm)	Shear Force (kN)	Moment (kN.m)
0	2.092	145	###
0.1	2.09	144.864	###
0.1	2.09	144.864	###
0.2	2.083	144.457	###
0.2	2.083	144.457	###
0.3	2.072	143.782	###
0.3	2.072	143.782	###
0.4	2.056	142.843	###
0.4	2.056	142.843	###
0.5	2.037	141.646	###
0.5	2.037	141.646	###
0.6	2.014	140.197	###
0.6	2.014	140.197	###
0.7	1.988	138.507	###
0.7	1.988	138.507	###
0.8	1.958	136.583	###
0.8	1.958	136.583	###
0.9	1.925	134.438	###
0.9	1.925	134.438	###
1	1.89	132.082	###
1	1.89	132.082	###
1.1	1.852	129.528	###
1.1	1.852	129.528	###
1.2	1.812	126.788	###
1.2	1.812	126.788	###
1.3	1.77	123.878	###
1.3	1.77	123.878	###
1.4	1.726	120.81	###
1.4	1.726	120.81	###
1.5	1.68	117.6	-88.735
1.5	1.68	117.6	-88.735
1.6	1.633	114.261	-77.141
1.6	1.633	114.261	-77.141
1.7	1.585	110.81	-65.887
1.7	1.585	110.81	-65.887
1.8	1.535	107.261	-54.983
1.8	1.535	107.261	-54.983
1.9	1.485	103.63	-44.437
1.9	1.485	103.63	-44.437
2	1.434	99.931	-34.259
2	1.434	99.931	-34.259
2.1	1.382	96.18	-24.453
2.1	1.382	96.18	-24.453
2.2	1.33	92.391	-15.024
2.2	1.33	92.391	-15.024
2.3	1.277	88.578	-5.976
2.3	1.277	88.578	-5.976
2.4	1.225	84.757	2.691
2.4	1.225	84.757	2.691
2.5	1.172	80.94	10.976
2.5	1.172	80.94	10.976
2.6	1.12	77.141	18.88
2.6	1.12	77.141	18.88
2.7	1.068	73.372	26.405
2.7	1.068	73.372	26.405
2.8	1.017	69.647	33.556
2.8	1.017	69.647	33.556
2.9	0.966	65.975	40.336
2.9	0.966	65.975	40.336
3	0.915	62.37	46.753
3	0.915	62.37	46.753
3.1	0.866	58.84	52.813
3.1	0.866	58.84	52.813
3.2	0.817	55.395	58.524
3.2	0.817	55.395	58.524
3.3	0.769	52.044	63.895
3.3	0.769	52.044	63.895
3.4	0.723	48.796	68.936
3.4	0.723	48.796	68.936
3.5	0.677	45.657	73.658
3.5	0.677	45.657	73.658
3.6	0.633	41.377	78.011
3.6	0.633	41.377	78.011
3.7	0.59	36.97	81.929
3.7	0.59	36.97	81.929
3.8	0.548	32.47	85.401
3.8	0.548	32.47	85.401
3.9	0.508	27.91	88.421
3.9	0.508	27.91	88.421
4	0.469	23.324	90.983
4	0.469	23.324	90.983
4.1	0.432	18.745	93.086
4.1	0.432	18.745	93.086
4.2	0.397	14.205	94.733
4.2	0.397	14.205	94.733
4.3	0.362	9.733	95.929
4.3	0.362	9.733	95.929
4.4	0.33	5.359	96.683
4.4	0.33	5.359	96.683
4.5	0.299	1.111	97.005
4.5	0.299	1.111	97.005
4.6	0.27	-2.987	96.91
4.6	0.27	-2.987	96.91
4.7	0.242	-6.912	96.413
4.7	0.242	-6.912	96.413
4.8	0.216	-10.641	95.534
4.8	0.216	-10.641	95.534
4.9	0.191	-14.157	94.292
4.9	0.191	-14.157	94.292
5	0.168	-17.443	92.71
5	0.168	-17.443	92.71
5.1	0.147	-20.485	90.812
5.1	0.147	-20.485	90.812
5.2	0.127	-23.272	88.622
5.2	0.127	-23.272	88.622
5.3	0.108	-25.795	86.166
5.3	0.108	-25.795	86.166

L=12m

Pile Head Lateral Load = 145 kN
Pile Head Axial Load = 0 kN

Depth (m)	Deflection (mm)	Shear Force (kN)	Moment (kN.m)
0	2.092	145	-291.9
0.117	2.089	144.815	###
0.117	2.089	144.815	###
0.233	2.079	144.262	###
0.233	2.079	144.262	###
0.35	2.064	143.346	###
0.35	2.064	143.346	###
0.467	2.043	142.074	###
0.467	2.043	142.074	###
0.583	2.018	140.457	###
0.583	2.018	140.457	###
0.7	1.987	138.509	###
0.7	1.987	138.509	###
0.817	1.952	136.243	-175.9
0.817	1.952	136.243	-175.9
0.933	1.913	133.678	###
0.933	1.913	133.678	###
1.05	1.871	130.832	-144.72
1.05	1.871	130.832	-144.72
1.167	1.825	127.726	###
1.167	1.825	127.726	###
1.283	1.777	124.38	###
1.283	1.777	124.38	###
1.4	1.726	120.817	###
1.4	1.726	120.817	###
1.517	1.672	117.059	-86.743
1.517	1.672	117.059	-86.743
1.633	1.617	113.131	-73.314
1.633	1.617	113.131	-73.314
1.75	1.56	109.057	-60.352
1.75	1.56	109.057	-60.352
1.867	1.501	104.86	-47.872
1.867	1.501	104.86	-47.872
1.983	1.442	100.564	-35.888
1.983	1.442	100.564	-35.888
2.1	1.382	96.193	-24.41
2.1	1.382	96.193	-24.41
2.217	1.321	91.771	-13.445
2.217	1.321	91.771	-13.445
2.333	1.259	87.321	-2.998
2.333	1.259	87.321	-2.998
2.45	1.198	82.865	6.93
2.45	1.198	82.865	6.93
2.567	1.137	78.423	16.338
2.567	1.137	78.423	16.338
2.683	1.076	74.018	25.23
2.683	1.076	74.018	25.23
2.8	1.016	69.668	33.611
2.8	1.016	69.668	33.611
2.917	0.957	65.393	41.489
2.917	0.957	65.393	41.489
3.033	0.898	61.208	48.873
3.033	0.898	61.208	48.873
3.15	0.841	57.131	55.775
3.15	0.841	57.131	55.775
3.267	0.785	53.177	62.208
3.267	0.785	53.177	62.208
3.383	0.73	49.358	68.188
3.383	0.73	49.358	68.188
3.5	0.677	45.686	73.731
3.5	0.677	45.686	73.731
3.62	0.624	40.546	78.894
3.62	0.624	40.546	78.894
3.739	0.573	35.234	83.432
3.739	0.573	35.234	83.432
3.859	0.524	29.807	87.326
3.859	0.524	29.807	87.326
3.979	0.477	24.323	90.566
3.979	0.477	24.323	90.566
4.099	0.433	18.838	93.15
4.099	0.433	18.838	93.15
4.218	0.39	13.408	95.079
4.218	0.39	13.408	95.079
4.338	0.35	8.083	96.364
4.338	0.35	8.083	96.364
4.458	0.312	2.913	97.021
4.458	0.312	2.913	97.021
4.577	0.276	-2.058	97.07
4.577	0.276	-2.058	97.07
4.697	0.243	-6.787	96.538
4.697	0.243	-6.787	96.538
4.817	0.212	-11.24	95.455
4.817	0.212	-11.24	95.455
4.937	0.183	-15.384	93.859
4.937	0.183	-15.384	93.859
5.056	0.156	-19.192	91.785
5.056	0.156	-19.192	91.785
5.176	0.132	-22.644	89.277
5.176	0.132	-22.644	89.277
5.296	0.11	-25.723	86.378
5.296	0.11	-25.723	86.378
5.415	0.09	-28.417	83.134
5.415	0.09	-28.417	83.134
5.535	0.071	-30.721	79.59
5.535	0.071	-30.721	79.59
5.655	0.055	-32.633	75.794
5.655	0.055	-32.633	75.794
5.775	0.04	-34.157	71.792
5.775	0.04	-34.157	71.792
5.894	0.028	-35.301	67.63
5.894	0.028	-35.301	67.63
6.014	0.016	-36.075	63.354
6.014	0.016	-36.075	63.354
6.134	0.007	-36.496	59.007
6.134	0.007	-36.496	59.007
6.254	-0.002	-36.582	54.629
6.254	-0.002	-36.582	54.629

L=15m

Pile Head Lateral Load = 145 kN
Pile Head Axial Load = 0 kN

Depth (m)	Deflection (mm)	Shear Force (kN)	Moment (kN.m)
0	2.092	145	###
0.146	2.087	144.711	###
0.146	2.087	144.711	###
0.292	2.072	143.849	###
0.292	2.072	143.849	###
0.438	2.049	142.425	-228.84
0.438	2.049	142.425	-228.84
0.583	2.017	140.457	###
0.583	2.017	140.457	###
0.729	1.979	137.971	###
0.729	1.979	137.971	###
0.875	1.933	134.997	###
0.875	1.933	134.997	###
1.021	1.882	131.569	###
1.021	1.882	131.569	###
1.167	1.825	127.726	###
1.167	1.825	127.726	###
1.313	1.764	123.509	###
1.313	1.764	123.509	###
1.458	1.699	118.961	-93.628
1.458	1.699	118.961	-93.628
1.604	1.631	114.129	-76.628
1.604	1.631	114.129	-76.628
1.75	1.56	109.058	-60.352
1.75	1.56	109.058	-60.352
1.896	1.486	103.795	-44.829
1.896	1.486	103.795	-44.829
2.042	1.412	98.388	-30.085
2.042	1.412	98.388	-30.085
2.188	1.336	92.882	-16.137
2.188	1.336	92.882	-16.137
2.333	1.259	87.323	-2.997
2.333	1.259	87.323	-2.997
2.479	1.183	81.754	9.331
2.479	1.183	81.754	9.331
2.625	1.107	76.217	20.849
2.625	1.107	76.217	20.849
2.771	1.031	70.752	31.565
2.771	1.031	70.752	31.565
2.917	0.957	65.395	41.491
2.917	0.957	65.395	41.491
3.063	0.884	60.181	50.645
3.063	0.884	60.181	50.645
3.208	0.813	55.141	59.052
3.208	0.813	55.141	59.052
3.354	0.744	50.302	66.738
3.354	0.744	50.302	66.738
3.5	0.677	45.69	73.734
3.5	0.677	45.69	73.734
3.649	0.611		

5.4	0.091	-28.048	83.472
5.4	0.091	-28.048	83.472
5.5	0.076	-30.027	80.566
5.5	0.076	-30.027	80.566
5.6	0.061	-31.731	77.475
5.6	0.061	-31.731	77.475
5.7	0.048	-33.159	74.229
5.7	0.048	-33.159	74.229
5.8	0.037	-34.316	70.853
5.8	0.037	-34.316	70.853
5.9	0.026	-35.206	67.374
5.9	0.026	-35.206	67.374
6	0.017	-35.836	63.82
6	0.017	-35.836	63.82
6.1	0.008	-36.215	60.215
6.1	0.008	-36.215	60.215
6.2	0.001	-36.353	56.585
6.2	0.001	-36.353	56.585
6.3	-0.006	-36.262	52.953
6.3	-0.006	-36.262	52.953
6.4	-0.011	-35.954	49.34
6.4	-0.011	-35.954	49.34
6.5	-0.016	-35.444	45.768
6.5	-0.016	-35.444	45.768
6.6	-0.02	-34.747	42.257
6.6	-0.02	-34.747	42.257
6.7	-0.024	-33.878	38.825
6.7	-0.024	-33.878	38.825
6.8	-0.026	-32.852	35.487
6.8	-0.026	-32.852	35.487
6.9	-0.029	-31.688	32.259
6.9	-0.029	-31.688	32.259
7	-0.03	-30.401	29.154
7	-0.03	-30.401	29.154
7.1	-0.031	-29.007	26.182
7.1	-0.031	-29.007	26.182
7.2	-0.032	-27.524	23.355
7.2	-0.032	-27.524	23.355
7.3	-0.032	-25.968	20.68
7.3	-0.032	-25.968	20.68
7.4	-0.032	-24.354	18.163
7.4	-0.032	-24.354	18.163
7.5	-0.032	-22.699	15.811
7.5	-0.032	-22.699	15.811
7.6	-0.031	-21.016	13.625
7.6	-0.031	-21.016	13.625
7.7	-0.03	-19.321	11.608
7.7	-0.03	-19.321	11.608
7.8	-0.029	-17.627	9.76
7.8	-0.029	-17.627	9.76
7.9	-0.028	-15.947	8.082
7.9	-0.028	-15.947	8.082
8	-0.027	-14.293	6.57
8	-0.027	-14.293	6.57
8.1	-0.025	-12.677	5.222
8.1	-0.025	-12.677	5.222
8.2	-0.024	-11.108	4.033
8.2	-0.024	-11.108	4.033
8.3	-0.022	-9.597	2.998
8.3	-0.022	-9.597	2.998
8.4	-0.021	-8.154	2.111
8.4	-0.021	-8.154	2.111
8.5	-0.019	-6.786	1.365
8.5	-0.019	-6.786	1.365
8.6	-0.017	-5.502	0.751
8.6	-0.017	-5.502	0.751
8.7	-0.015	-4.309	0.261
8.7	-0.015	-4.309	0.261
8.8	-0.014	-3.214	-0.114
8.8	-0.014	-3.214	-0.114
8.9	-0.012	-2.224	-0.385
8.9	-0.012	-2.224	-0.385
9	-0.01	-1.344	-0.562
9	-0.01	-1.344	-0.562
9.1	-0.009	-0.582	-0.658
9.1	-0.009	-0.582	-0.658
9.2	-0.007	0.058	-0.683
9.2	-0.007	0.058	-0.683
9.3	-0.005	0.568	-0.65
9.3	-0.005	0.568	-0.65
9.4	-0.003	0.944	-0.574
9.4	-0.003	0.944	-0.574
9.5	-0.002	1.178	-0.466
9.5	-0.002	1.178	-0.466
9.6	0	1.265	-0.343
9.6	0	1.265	-0.343
9.7	0.002	1.198	-0.218
9.7	0.002	1.198	-0.218
9.8	0.003	0.969	-0.109
9.8	0.003	0.969	-0.109
9.9	0.005	0.573	-0.03
9.9	0.005	0.573	-0.03
10	0.006	0	0

6.373	-0.009	-36.355	50.26
6.373	-0.009	-36.355	50.26
6.493	-0.015	-35.838	45.936
6.493	-0.015	-35.838	45.936
6.613	-0.019	-35.056	41.69
6.613	-0.019	-35.056	41.69
6.732	-0.023	-34.037	37.552
6.732	-0.023	-34.037	37.552
6.852	-0.026	-32.809	33.549
6.852	-0.026	-32.809	33.549
6.972	-0.028	-31.399	29.704
6.972	-0.028	-31.399	29.704
7.092	-0.03	-29.837	26.037
7.092	-0.03	-29.837	26.037
7.211	-0.03	-28.151	22.564
7.211	-0.03	-28.151	22.564
7.331	-0.031	-26.368	19.3
7.331	-0.031	-26.368	19.3
7.451	-0.03	-24.516	16.254
7.451	-0.03	-24.516	16.254
7.57	-0.03	-22.619	13.432
7.57	-0.03	-22.619	13.432
7.69	-0.029	-20.701	10.839
7.69	-0.029	-20.701	10.839
7.81	-0.028	-18.785	8.475
7.81	-0.028	-18.785	8.475
7.93	-0.026	-16.891	6.34
7.93	-0.026	-16.891	6.34
8.049	-0.025	-15.037	4.429
8.049	-0.025	-15.037	4.429
8.169	-0.023	-13.24	2.737
8.169	-0.023	-13.24	2.737
8.289	-0.021	-11.513	1.256
8.289	-0.021	-11.513	1.256
8.408	-0.019	-9.869	-0.023
8.408	-0.019	-9.869	-0.023
8.528	-0.018	-8.317	-1.11
8.528	-0.018	-8.317	-1.11
8.648	-0.016	-6.865	-2.018
8.648	-0.016	-6.865	-2.018
8.768	-0.014	-5.519	-2.758
8.768	-0.014	-5.519	-2.758
8.887	-0.013	-4.282	-3.344
8.887	-0.013	-4.282	-3.344
9.007	-0.011	-3.157	-3.788
9.007	-0.011	-3.157	-3.788
9.127	-0.01	-2.143	-4.104
9.127	-0.01	-2.143	-4.104
9.246	-0.008	-1.24	-4.306
9.246	-0.008	-1.24	-4.306
9.366	-0.007	-0.446	-4.406
9.366	-0.007	-0.446	-4.406
9.486	-0.006	0.243	-4.417
9.486	-0.006	0.243	-4.417
9.606	-0.005	0.831	-4.352
9.606	-0.005	0.831	-4.352
9.725	-0.004	1.324	-4.222
9.725	-0.004	1.324	-4.222
9.845	-0.003	1.726	-4.038
9.845	-0.003	1.726	-4.038
9.965	-0.002	2.046	-3.812
9.965	-0.002	2.046	-3.812
10.085	-0.002	2.288	-3.551
10.085	-0.002	2.288	-3.551
10.204	-0.001	2.459	-3.267
10.204	-0.001	2.459	-3.267
10.324	-0.001	2.567	-2.965
10.324	-0.001	2.567	-2.965
10.444	0	2.616	-2.654
10.444	0	2.616	-2.654
10.563	0	2.613	-2.341
10.563	0	2.613	-2.341
10.683	0	2.565	-2.03
10.683	0	2.565	-2.03
10.803	0.001	2.474	-1.728
10.803	0.001	2.474	-1.728
10.923	0.001	2.348	-1.439
10.923	0.001	2.348	-1.439
11.042	0.001	2.188	-1.168
11.042	0.001	2.188	-1.168
11.162	0.001	2	-0.917
11.162	0.001	2	-0.917
11.282	0.001	1.784	-0.69
11.282	0.001	1.784	-0.69
11.401	0.002	1.544	-0.49
11.401	0.002	1.544	-0.49
11.521	0.002	1.28	-0.321
11.521	0.002	1.28	-0.321
11.641	0.002	0.994	-0.185
11.641	0.002	0.994	-0.185
11.761	0.002	0.686	-0.084
11.761	0.002	0.686	-0.084
11.88	0.002	0.354	-0.021
11.88	0.002	0.354	-0.021
12	0.002	0	0

7.981	-0.025	-16.115	5.507
7.981	-0.025	-16.115	5.507
8.13	-0.023	-13.846	3.271
8.13	-0.023	-13.846	3.271
8.279	-0.021	-11.681	1.366
8.279	-0.021	-11.681	1.366
8.429	-0.019	-9.644	-0.225
8.429	-0.019	-9.644	-0.225
8.578	-0.017	-7.754	-1.522
8.578	-0.017	-7.754	-1.522
8.727	-0.015	-6.025	-2.549
8.727	-0.015	-6.025	-2.549
8.877	-0.013	-4.466	-3.331
8.877	-0.013	-4.466	-3.331
9.026	-0.011	-3.082	-3.892
9.026	-0.011	-3.082	-3.892
9.175	-0.009	-1.872	-4.26
9.175	-0.009	-1.872	-4.26
9.325	-0.007	-0.835	-4.46
9.325	-0.007	-0.835	-4.46
9.474	-0.006	0.036	-4.518
9.474	-0.006	0.036	-4.518
9.623	-0.005	0.749	-4.457
9.623	-0.005	0.749	-4.457
9.773	-0.003	1.315	-4.301
9.773	-0.003	1.315	-4.301
9.922	-0.002	1.746	-4.071
9.922	-0.002	1.746	-4.071
10.071	-0.002	2.055	-3.786
10.071	-0.002	2.055	-3.786
10.221	-0.001	2.257	-3.463
10.221	-0.001	2.257	-3.463
10.37	0	2.365	-3.116
10.37	0	2.365	-3.116
10.519	0	2.394	-2.76
10.519	0	2.394	-2.76
10.669	0	2.356	-2.405
10.669	0	2.356	-2.405
10.818	0.001	2.266	-2.059
10.818	0.001	2.266	-2.059
10.968	0.001	2.134	-1.73
10.968	0.001	2.134	-1.73
11.117	0.001	1.972	-1.423
11.117	0.001	1.972	-1.423
11.266	0.001	1.789	-1.142
11.266	0.001	1.789	-1.142
11.416	0.001	1.595	-0.889
11.416	0.001	1.595	-0.889
11.565	0.001	1.396	-0.666
11.565	0.001	1.396	-0.666
11.714	0.001	1.199	-0.472
11.714	0.001	1.199	-0.472
11.864	0.001	1.009	-0.307
11.864	0.001	1.009	-0.307
12.013	0.001	0.829	-0.17
12.013	0.001	0.829	-0.17
12.162	0.001	0.662	-0.059
12.162	0.001	0.662	-0.059
12.312	0.001	0.511	0.028
12.312	0.001	0.511	0.028
12.461	0.001	0.377	0.094
12.461	0.001	0.377	0.094
12.61	0	0.259	0.142
12.61	0	0.259	0.142
12.76	0	0.159	0.173
12.76	0	0.159	0.173
12.909	0	0.074	0.19
12.909	0	0.074	0.19
13.058	0	0.006	0.196
13.058	0	0.006	0.196
13.208	0	-0.049	0.192
13.208	0	-0.049	0.192
13.357	0	-0.09	0.182
13.357	0	-0.09	0.182
13.506	0	-0.12	0.166
13.506	0	-0.12	0.166
13.656	0	-0.139	0.147
13.656	0	-0.139	0.147
13.805	0	-0.15	0.125
13.805	0	-0.15	0.125
13.955	0	-0.152	0.102
13.955	0	-0.152	0.102
14.104	0	-0.147	0.08
14.104	0	-0.147	0.08
14.253	0	-0.136	0.059
14.253	0	-0.136	0.059
14.403	0	-0.119	0.04
14.403	0	-0.119	0.04
14.552	0	-0.097	0.023
14.552	0	-0.097	

Pilote con diámetro 1m

L=10m

Pile Head Lateral Load = 176.8 kN

Pile Head Axial Load = 0 kN

Depth (m)	Deflection (mm)	Shear Force (kN)	Moment (kN.m)
0	1.667	176.8	-423.304
0.1	1.666	176.692	-405.627
0.1	1.666	176.692	-405.627
0.2	1.662	176.367	-387.973
0.2	1.662	176.367	-387.973
0.3	1.655	175.828	-370.361
0.3	1.655	175.828	-370.361
0.4	1.646	175.077	-352.814
0.4	1.646	175.077	-352.814
0.5	1.634	174.118	-335.353
0.5	1.634	174.118	-335.353
0.6	1.62	172.955	-317.997
0.6	1.62	172.955	-317.997
0.7	1.604	171.593	-300.768
0.7	1.604	171.593	-300.768
0.8	1.586	170.038	-283.685
0.8	1.586	170.038	-283.685
0.9	1.566	168.297	-266.767
0.9	1.566	168.297	-266.767
1	1.544	166.377	-250.032
1	1.544	166.377	-250.032
1.1	1.52	164.286	-233.497
1.1	1.52	164.286	-233.497
1.2	1.495	162.033	-217.18
1.2	1.495	162.033	-217.18
1.3	1.468	159.625	-201.096
1.3	1.468	159.625	-201.096
1.4	1.44	157.074	-185.26
1.4	1.44	157.074	-185.26
1.5	1.411	154.387	-169.686
1.5	1.411	154.387	-169.686
1.6	1.38	151.575	-154.387
1.6	1.38	151.575	-154.387
1.7	1.349	148.649	-139.375
1.7	1.349	148.649	-139.375
1.8	1.316	145.617	-124.66
1.8	1.316	145.617	-124.66
1.9	1.283	142.492	-110.254
1.9	1.283	142.492	-110.254
2	1.249	139.283	-96.165
2	1.249	139.283	-96.165
2.1	1.214	136.001	-82.4
2.1	1.214	136.001	-82.4
2.2	1.179	132.657	-68.967
2.2	1.179	132.657	-68.967
2.3	1.143	129.262	-55.87
2.3	1.143	129.262	-55.87
2.4	1.107	125.825	-43.116
2.4	1.107	125.825	-43.116
2.5	1.071	122.357	-30.706
2.5	1.071	122.357	-30.706
2.6	1.034	118.869	-18.645
2.6	1.034	118.869	-18.645
2.7	0.997	115.371	-6.933
2.7	0.997	115.371	-6.933
2.8	0.96	111.872	4.429
2.8	0.96	111.872	4.429
2.9	0.924	108.382	15.442
2.9	0.924	108.382	15.442
3	0.887	104.911	26.106
3	0.887	104.911	26.106
3.1	0.851	101.466	36.425
3.1	0.851	101.466	36.425
3.2	0.814	98.058	46.401
3.2	0.814	98.058	46.401
3.3	0.778	94.694	56.038
3.3	0.778	94.694	56.038
3.4	0.743	91.382	65.341
3.4	0.743	91.382	65.341
3.5	0.708	88.13	74.317
3.5	0.708	88.13	74.317
3.6	0.673	84.932	82.897
3.6	0.673	84.932	82.897
3.7	0.639	81.783	90.996
3.7	0.639	81.783	90.996
3.8	0.606	78.698	98.593
3.8	0.606	78.698	98.593
3.9	0.573	75.676	105.67
3.9	0.573	75.676	105.67
4	0.541	72.716	112.211
4	0.541	72.716	112.211
4.1	0.51	69.816	118.205
4.1	0.51	69.816	118.205
4.2	0.479	66.971	123.641
4.2	0.479	66.971	123.641
4.3	0.45	64.181	128.513
4.3	0.45	64.181	128.513
4.4	0.421	61.446	132.818
4.4	0.421	61.446	132.818
4.5	0.393	58.766	136.553
4.5	0.393	58.766	136.553
4.6	0.366	56.141	139.722
4.6	0.366	56.141	139.722
4.7	0.34	53.566	142.328
4.7	0.34	53.566	142.328
4.8	0.315	51.041	144.379
4.8	0.315	51.041	144.379
4.9	0.291	48.566	145.884
4.9	0.291	48.566	145.884

L=12m

Pile Head Lateral Load = 176.8 kN

Pile Head Axial Load = 0 kN

Depth (m)	Deflection (mm)	Shear Force (kN)	Moment (kN.m)
0	1.667	176.8	-423.338
0.117	1.665	176.653	-402.717
0.117	1.665	176.653	-402.717
0.233	1.659	176.211	-382.13
0.233	1.659	176.211	-382.13
0.35	1.65	175.48	-361.612
0.35	1.65	175.48	-361.612
0.467	1.637	174.462	-341.196
0.467	1.637	174.462	-341.196
0.583	1.622	173.164	-320.915
0.583	1.622	173.164	-320.915
0.7	1.603	171.595	-300.802
0.7	1.603	171.595	-300.802
0.817	1.582	169.763	-280.887
0.817	1.582	169.763	-280.887
0.933	1.558	167.68	-261.2
0.933	1.558	167.68	-261.2
1.05	1.531	165.357	-241.771
1.05	1.531	165.357	-241.771
1.167	1.503	162.807	-222.625
1.167	1.503	162.807	-222.625
1.283	1.472	160.044	-203.79
1.283	1.472	160.044	-203.79
1.4	1.439	157.083	-185.29
1.4	1.439	157.083	-185.29
1.517	1.405	153.937	-167.145
1.517	1.405	153.937	-167.145
1.633	1.369	150.624	-149.377
1.633	1.369	150.624	-149.377
1.75	1.332	147.159	-132.005
1.75	1.332	147.159	-132.005
1.867	1.293	143.56	-115.045
1.867	1.293	143.56	-115.045
1.983	1.254	139.842	-98.513
1.983	1.254	139.842	-98.513
2.1	1.213	136.022	-82.42
2.1	1.213	136.022	-82.42
2.217	1.172	132.118	-66.777
2.217	1.172	132.118	-66.777
2.333	1.13	128.146	-51.595
2.333	1.13	128.146	-51.595
2.45	1.088	124.122	-36.879
2.45	1.088	124.122	-36.879
2.567	1.045	120.065	-22.634
2.567	1.045	120.065	-22.634
2.683	1.003	115.988	-8.864
2.683	1.003	115.988	-8.864
2.8	0.96	111.909	4.43
2.8	0.96	111.909	4.43
2.917	0.917	107.842	17.248
2.917	0.917	107.842	17.248
3.033	0.874	103.803	29.594
3.033	0.874	103.803	29.594
3.15	0.832	99.805	41.47
3.15	0.832	99.805	41.47
3.267	0.79	95.862	52.884
3.267	0.79	95.862	52.884
3.383	0.748	91.986	63.841
3.383	0.748	91.986	63.841
3.5	0.707	88.19	74.35
3.5	0.707	88.19	74.35
3.62	0.666	84.545	84.574
3.62	0.666	84.545	84.574
3.739	0.625	80.942	94.102
3.739	0.625	80.942	94.102
3.859	0.585	77.372	102.901
3.859	0.585	77.372	102.901
3.979	0.547	73.939	110.943
3.979	0.547	73.939	110.943
4.099	0.509	70.641	118.204
4.099	0.509	70.641	118.204
4.218	0.473	67.473	124.668
4.218	0.473	67.473	124.668
4.338	0.438	64.435	130.323
4.338	0.438	64.435	130.323
4.458	0.404	61.521	135.165
4.458	0.404	61.521	135.165
4.577	0.371	58.728	139.195
4.577	0.371	58.728	139.195
4.697	0.34	56.051	142.418
4.697	0.34	56.051	142.418
4.817	0.31	53.486	144.848
4.817	0.31	53.486	144.848
4.937	0.282	51.031	146.5
4.937	0.282	51.031	146.5
5.056	0.255	48.686	147.398
5.056	0.255	48.686	147.398
5.176	0.229	46.451	147.567
5.176	0.229	46.451	147.567
5.296	0.205	44.316	147.038
5.296	0.205	44.316	147.038
5.415	0.182	42.271	145.845
5.415	0.182	42.271	145.845
5.535	0.161	40.316	144.027
5.535	0.161	40.316	144.027
5.655	0.141	38.431	141.625
5.655	0.141	38.431	141.625
5.775	0.122	36.626	138.681
5.775	0.122	36.626	138.681

L=15m

Pile Head Lateral Load = 176.8 kN

Pile Head Axial Load = 0 kN

Depth (m)	Deflection (mm)	Shear Force (kN)	Moment (kN.m)
0	1.666	176.8	-423.312
0.146	1.663	176.57	-397.54
0.146	1.663	176.57	-397.54
0.292	1.655	175.882	-371.835
0.292	1.655	175.882	-371.835
0.438	1.641	174.743	-346.263
0.438	1.641	174.743	-346.263
0.583	1.621	173.165	-320.889
0.583	1.621	173.165	-320.889
0.729	1.598	171.162	-295.777
0.729	1.598	171.162	-295.777
0.875	1.57	168.754	-270.987
0.875	1.57	168.754	-270.987
1.021	1.538	165.962	-246.576
1.021	1.538	165.962	-246.576
1.167	1.502	162.81	-222.599
1.167	1.502	162.81	-222.599
1.313	1.464	159.326	-199.106
1.313	1.464	159.326	-199.106
1.458	1.422	155.537	-176.144
1.458	1.422	155.537	-176.144
1.604	1.378	151.473	-153.754
1.604	1.378	151.473	-153.754
1.75	1.332	147.166	-131.976
1.75	1.332	147.166	-131.976
1.896	1.283	142.648	-110.841
1.896	1.283	142.648	-110.841
2.042	1.233	137.952	-90.379
2.042	1.233	137.952	-90.379
2.188	1.182	133.111	-70.612
2.188	1.182	133.111	-70.612
2.333	1.13	128.157	-51.56
2.333	1.13	128.157	-51.56
2.479	1.077	123.123	-33.237
2.479	1.077	123.123	-33.237
2.625	1.024	118.042	-15.651
2.625	1.024	118.042	-15.651
2.771	0.97	112.944	1.191
2.771	0.97	112.944	1.191
2.917	0.917	107.86	17.291
2.917	0.917	107.86	17.291
3.063	0.863	102.818	32.652
3.063	0.863	102.818	32.652
3.208	0.81	97.846	47.283
3.208	0.81	97.846	47.283
3.354	0.758	92.969	61.195
3.354	0.758	92.969	61.195
3.5	0.707	88.213	74.405
3.5	0.707	88.213	74.405
3.649	0.655	83.541	87.056
3.649	0.655	83.541	87.056

5	0.268	7.099	146.856
5	0.268	7.099	146.856
5.1	0.246	1.988	147.309
5.1	0.246	1.988	147.309
5.2	0.225	-2.948	147.259
5.2	0.225	-2.948	147.259
5.3	0.205	-7.69	146.726
5.3	0.205	-7.69	146.726
5.4	0.186	-12.22	145.728
5.4	0.186	-12.22	145.728
5.5	0.168	-16.524	144.289
5.5	0.168	-16.524	144.289
5.6	0.151	-20.587	142.432
5.6	0.151	-20.587	142.432
5.7	0.135	-24.398	140.18
5.7	0.135	-24.398	140.18
5.8	0.119	-27.947	137.561
5.8	0.119	-27.947	137.561
5.9	0.105	-31.226	134.6
5.9	0.105	-31.226	134.6
6	0.092	-34.229	131.325
6	0.092	-34.229	131.325
6.1	0.079	-36.951	127.763
6.1	0.079	-36.951	127.763
6.2	0.068	-39.39	123.944
6.2	0.068	-39.39	123.944
6.3	0.057	-41.545	119.895
6.3	0.057	-41.545	119.895
6.4	0.047	-43.417	115.644
6.4	0.047	-43.417	115.644
6.5	0.038	-45.007	111.221
6.5	0.038	-45.007	111.221
6.6	0.03	-46.321	106.652
6.6	0.03	-46.321	106.652
6.7	0.022	-47.363	101.966
6.7	0.022	-47.363	101.966
6.8	0.015	-48.14	97.188
6.8	0.015	-48.14	97.188
6.9	0.009	-48.66	92.346
6.9	0.009	-48.66	92.346
7	0.003	-48.931	87.465
7	0.003	-48.931	87.465
7.1	-0.002	-48.965	82.568
7.1	-0.002	-48.965	82.568
7.2	-0.006	-48.771	77.679
7.2	-0.006	-48.771	77.679
7.3	-0.01	-48.361	72.821
7.3	-0.01	-48.361	72.821
7.4	-0.014	-47.747	68.014
7.4	-0.014	-47.747	68.014
7.5	-0.017	-46.942	63.278
7.5	-0.017	-46.942	63.278
7.6	-0.019	-45.96	58.632
7.6	-0.019	-45.96	58.632
7.7	-0.021	-44.812	54.092
7.7	-0.021	-44.812	54.092
7.8	-0.023	-43.513	49.674
7.8	-0.023	-43.513	49.674
7.9	-0.025	-42.076	45.394
7.9	-0.025	-42.076	45.394
8	-0.026	-40.515	41.263
8	-0.026	-40.515	41.263
8.1	-0.027	-38.842	37.294
8.1	-0.027	-38.842	37.294
8.2	-0.027	-37.071	33.498
8.2	-0.027	-37.071	33.498
8.3	-0.028	-35.215	29.883
8.3	-0.028	-35.215	29.883
8.4	-0.028	-33.284	26.457
8.4	-0.028	-33.284	26.457
8.5	-0.028	-31.292	23.228
8.5	-0.028	-31.292	23.228
8.6	-0.028	-29.248	20.201
8.6	-0.028	-29.248	20.201
8.7	-0.028	-27.165	17.38
8.7	-0.028	-27.165	17.38
8.8	-0.027	-25.05	14.769
8.8	-0.027	-25.05	14.769
8.9	-0.027	-22.915	12.37
8.9	-0.027	-22.915	12.37
9	-0.026	-20.767	10.186
9	-0.026	-20.767	10.186
9.1	-0.026	-18.614	8.217
9.1	-0.026	-18.614	8.217
9.2	-0.025	-16.463	6.464
9.2	-0.025	-16.463	6.464
9.3	-0.024	-14.32	4.924
9.3	-0.024	-14.32	4.924
9.4	-0.023	-12.193	3.599
9.4	-0.023	-12.193	3.599
9.5	-0.023	-10.085	2.485
9.5	-0.023	-10.085	2.485
9.6	-0.022	-8.003	1.581
9.6	-0.022	-8.003	1.581
9.7	-0.021	-5.949	0.884
9.7	-0.021	-5.949	0.884
9.8	-0.02	-3.928	0.39
9.8	-0.02	-3.928	0.39
9.9	-0.019	-1.944	0.097
9.9	-0.019	-1.944	0.097
10	-0.019	0	0

5.894	0.105	-30.682	135.24
5.894	0.105	-30.682	135.24
6.014	0.089	-34.239	131.35
6.014	0.089	-34.239	131.35
6.134	0.075	-37.393	127.058
6.134	0.075	-37.393	127.058
6.254	0.062	-40.142	122.413
6.254	0.062	-40.142	122.413
6.373	0.049	-42.484	117.463
6.373	0.049	-42.484	117.463
6.493	0.038	-44.424	112.257
6.493	0.038	-44.424	112.257
6.613	0.028	-45.968	106.842
6.613	0.028	-45.968	106.842
6.732	0.02	-47.127	101.266
6.732	0.02	-47.127	101.266
6.852	0.012	-47.912	95.573
6.852	0.012	-47.912	95.573
6.972	0.005	-48.339	89.808
6.972	0.005	-48.339	89.808
7.092	-0.001	-48.426	84.013
7.092	-0.001	-48.426	84.013
7.211	-0.007	-48.191	78.226
7.211	-0.007	-48.191	78.226
7.331	-0.011	-47.655	72.486
7.331	-0.011	-47.655	72.486
7.451	-0.015	-46.84	66.827
7.451	-0.015	-46.84	66.827
7.57	-0.018	-45.771	61.281
7.57	-0.018	-45.771	61.281
7.69	-0.021	-44.47	55.877
7.69	-0.021	-44.47	55.877
7.81	-0.023	-42.964	50.641
7.81	-0.023	-42.964	50.641
7.93	-0.024	-41.275	45.597
7.93	-0.024	-41.275	45.597
8.049	-0.025	-39.43	40.765
8.049	-0.025	-39.43	40.765
8.169	-0.026	-37.453	36.161
8.169	-0.026	-37.453	36.161
8.289	-0.026	-35.368	31.801
8.289	-0.026	-35.368	31.801
8.408	-0.026	-33.199	27.696
8.408	-0.026	-33.199	27.696
8.528	-0.026	-30.968	23.855
8.528	-0.026	-30.968	23.855
8.648	-0.026	-28.696	20.283
8.648	-0.026	-28.696	20.283
8.768	-0.025	-26.405	16.985
8.768	-0.025	-26.405	16.985
8.887	-0.024	-24.114	13.961
8.887	-0.024	-24.114	13.961
9.007	-0.023	-21.84	11.21
9.007	-0.023	-21.84	11.21
9.127	-0.022	-19.6	8.73
9.127	-0.022	-19.6	8.73
9.246	-0.021	-17.409	6.515
9.246	-0.021	-17.409	6.515
9.366	-0.019	-15.281	4.559
9.366	-0.019	-15.281	4.559
9.486	-0.018	-13.23	2.853
9.486	-0.018	-13.23	2.853
9.606	-0.017	-11.265	1.388
9.606	-0.017	-11.265	1.388
9.725	-0.016	-9.396	0.152
9.725	-0.016	-9.396	0.152
9.845	-0.014	-7.633	-0.866
9.845	-0.014	-7.633	-0.866
9.965	-0.013	-5.983	-1.68
9.965	-0.013	-5.983	-1.68
10.085	-0.012	-4.453	-2.303
10.085	-0.012	-4.453	-2.303
10.204	-0.01	-3.047	-2.751
10.204	-0.01	-3.047	-2.751
10.324	-0.009	-1.773	-3.038
10.324	-0.009	-1.773	-3.038
10.444	-0.008	-0.633	-3.181
10.444	-0.008	-0.633	-3.181
10.563	-0.007	0.368	-3.195
10.563	-0.007	0.368	-3.195
10.683	-0.005	1.226	-3.098
10.683	-0.005	1.226	-3.098
10.803	-0.004	1.937	-2.908
10.803	-0.004	1.937	-2.908
10.923	-0.003	2.498	-2.641
10.923	-0.003	2.498	-2.641
11.042	-0.002	2.905	-2.316
11.042	-0.002	2.905	-2.316
11.162	-0.001	3.153	-1.951
11.162	-0.001	3.153	-1.951
11.282	0	3.239	-1.567
11.282	0	3.239	-1.567
11.401	0.001	3.156	-1.183
11.401	0.001	3.156	-1.183
11.521	0.002	2.899	-0.818
11.521	0.002	2.899	-0.818
11.641	0.003	2.463	-0.496
11.641	0.003	2.463	-0.496
11.761	0.004	1.839	-0.236
11.761	0.004	1.839	-0.236
11.88	0.005	1.021	-0.063
11.88	0.005	1.021	-0.063
12	0.006	0	0

7.383	-0.012	-47.504	70.08
7.383	-0.012	-47.504	70.08
7.532	-0.017	-46.352	63.066
7.532	-0.017	-46.352	63.066
7.682	-0.02	-44.835	56.253
7.682	-0.02	-44.835	56.253
7.831	-0.022	-43.002	49.69
7.831	-0.022	-43.002	49.69
7.981	-0.024	-40.901	43.421
7.981	-0.024	-40.901	43.421
8.13	-0.025	-38.58	37.484
8.13	-0.025	-38.58	37.484
8.279	-0.025	-36.087	31.906
8.279	-0.025	-36.087	31.906
8.429	-0.025	-33.468	26.711
8.429	-0.025	-33.468	26.711
8.578	-0.025	-30.767	21.913
8.578	-0.025	-30.767	21.913
8.727	-0.024	-28.025	17.523
8.727	-0.024	-28.025	17.523
8.877	-0.023	-25.281	13.542
8.877	-0.023	-25.281	13.542
9.026	-0.022	-22.568	9.97
9.026	-0.022	-22.568	9.97
9.175	-0.02	-19.917	6.798
9.175	-0.02	-19.917	6.798
9.325	-0.019	-17.357	4.016
9.325	-0.019	-17.357	4.016
9.474	-0.017	-14.91	1.608
9.474	-0.017	-14.91	1.608
9.623	-0.016	-12.596	-0.445
9.623	-0.016	-12.596	-0.445
9.773	-0.014	-10.429	-2.162
9.773	-0.014	-10.429	-2.162
9.922	-0.013	-8.423	-3.568
9.922	-0.013	-8.423	-3.568
10.071	-0.011	-6.584	-4.686
10.071	-0.011	-6.584	-4.686
10.221	-0.01	-4.918	-5.543
10.221	-0.01	-4.918	-5.543
10.37	-0.008	-3.427	-6.164
10.37	-0.008	-3.427	-6.164
10.519	-0.007	-2.109	-6.575
10.519	-0.007	-2.109	-6.575
10.669	-0.006	-0.961	-6.802
10.669	-0.006	-0.961	-6.802
10.818	-0.005	0.023	-6.87
10.818	-0.005	0.023	-6.87
10.968	-0.004	0.85	-6.803
10.968	-0.004	0.85	-6.803
11.117	-0.003	1.529	-6.624
11.117	-0.003	1.529	-6.624
11.266	-0.002	2.071	-6.353
11.266	-0.002	2.071	-6.353
11.416	-0.002	2.487	-6.012
11.416	-0.002	2.487	-6.012
11.565	-0.001	2.787	-5.616
11.565	-0.001	2.787	-5.616
11.714	-0.001	2.985	-5.184
11.714	-0.001	2.985	-5.184
11.864	0	3.092	-4.729
11.864	0	3.092	-4.729
12.013	0	3.121	-4.264
12.013	0	3.121	-4.264
12.162	0	3.082	-3.8
12.162	0	3.082	-3.8
12.312	0	2.988	-3.346

Pilote con diámetro 1.2m

L=10m

Pile Head Lateral Load = 212.16 kN
Pile Head Axial Load = 0 kN

Depth (m)	Deflection (mm)	Shear Force (kN)	Moment (kN.m)
0	1.399	212.16	###
0.1	1.398	212.069	###
0.1	1.398	212.069	###
0.2	1.396	211.797	###
0.2	1.396	211.797	###
0.3	1.391	211.344	###
0.3	1.391	211.344	###
0.4	1.385	210.712	###
0.4	1.385	210.712	###
0.5	1.377	209.905	###
0.5	1.377	209.905	###
0.6	1.367	208.924	###
0.6	1.367	208.924	###
0.7	1.357	207.773	###
0.7	1.357	207.773	###
0.8	1.344	206.456	-412.46
0.8	1.344	206.456	-412.46
0.9	1.331	204.978	###
0.9	1.331	204.978	###
1	1.316	203.344	-371.47
1	1.316	203.344	-371.47
1.1	1.3	201.559	###
1.1	1.3	201.559	###
1.2	1.282	199.63	###
1.2	1.282	199.63	###
1.3	1.264	197.561	###
1.3	1.264	197.561	###
1.4	1.244	195.36	###
1.4	1.244	195.36	###
1.5	1.224	193.034	###
1.5	1.224	193.034	###
1.6	1.203	190.589	###
1.6	1.203	190.589	###
1.7	1.181	188.033	-234.12
1.7	1.181	188.033	-234.12
1.8	1.158	185.373	###
1.8	1.158	185.373	###
1.9	1.134	182.617	###
1.9	1.134	182.617	###
2	1.11	179.773	###
2	1.11	179.773	###
2.1	1.085	176.848	###
2.1	1.085	176.848	###
2.2	1.06	173.85	###
2.2	1.06	173.85	###
2.3	1.034	170.788	###
2.3	1.034	170.788	###
2.4	1.008	167.669	###
2.4	1.008	167.669	###
2.5	0.981	164.501	-92.797
2.5	0.981	164.501	-92.797
2.6	0.954	161.293	-76.507
2.6	0.954	161.293	-76.507
2.7	0.927	158.052	-60.54
2.7	0.927	158.052	-60.54
2.8	0.9	154.786	-44.898
2.8	0.9	154.786	-44.898
2.9	0.873	151.502	-29.583
2.9	0.873	151.502	-29.583
3	0.845	148.209	-14.598
3	0.845	148.209	-14.598
3.1	0.817	144.914	0.059
3.1	0.817	144.914	0.059
3.2	0.79	141.624	14.385
3.2	0.79	141.624	14.385
3.3	0.762	138.345	28.384
3.3	0.762	138.345	28.384
3.4	0.735	135.086	42.055
3.4	0.735	135.086	42.055
3.5	0.707	131.853	55.402
3.5	0.707	131.853	55.402
3.6	0.68	127.052	68.349
3.6	0.68	127.052	68.349
3.7	0.653	121.97	80.803
3.7	0.653	121.97	80.803
3.8	0.627	116.626	92.735
3.8	0.627	116.626	92.735
3.9	0.6	111.041	104.12
3.9	0.6	111.041	104.12
4	0.574	105.236	114.935
4	0.574	105.236	114.935
4.1	0.549	99.235	125.161
4.1	0.549	99.235	125.161
4.2	0.523	93.061	134.777
4.2	0.523	93.061	134.777
4.3	0.499	86.738	143.768
4.3	0.499	86.738	143.768
4.4	0.474	80.289	152.12
4.4	0.474	80.289	152.12
4.5	0.45	73.741	159.822
4.5	0.45	73.741	159.822
4.6	0.427	67.117	166.866
4.6	0.427	67.117	166.866
4.7	0.404	60.443	173.244
4.7	0.404	60.443	173.244
4.8	0.382	53.742	178.954
4.8	0.382	53.742	178.954
4.9	0.361	47.04	183.993
4.9	0.361	47.04	183.993
5	0.34	40.361	188.362
5	0.34	40.361	188.362
5.1	0.319	33.727	192.066
5.1	0.319	33.727	192.066
5.2	0.299	27.161	195.11
5.2	0.299	27.161	195.11
5.3	0.28	20.687	197.502
5.3	0.28	20.687	197.502
5.4	0.262	14.323	199.251
5.4	0.262	14.323	199.251
5.5	0.244	8.092	200.371
5.5	0.244	8.092	200.371

L=12m

Pile Head Lateral Load = 212.16 kN
Pile Head Axial Load = 0 kN

Depth (m)	Deflection (mm)	Shear Force (kN)	Moment (kN.m)
0	1.389	212.16	###
0.117	1.388	212.037	###
0.117	1.388	212.037	###
0.233	1.384	211.669	###
0.233	1.384	211.669	###
0.35	1.378	211.058	###
0.35	1.378	211.058	###
0.467	1.37	210.207	###
0.467	1.37	210.207	###
0.583	1.359	209.121	###
0.583	1.359	209.121	###
0.7	1.347	207.804	###
0.7	1.347	207.804	###
0.817	1.332	206.264	###
0.817	1.332	206.264	###
0.933	1.316	204.507	###
0.933	1.316	204.507	###
1.05	1.298	202.542	###
1.05	1.298	202.542	###
1.167	1.278	200.377	###
1.167	1.278	200.377	###
1.283	1.257	198.022	###
1.283	1.257	198.022	###
1.4	1.234	195.487	###
1.4	1.234	195.487	###
1.517	1.21	192.784	###
1.517	1.21	192.784	###
1.633	1.185	189.923	###
1.633	1.185	189.923	###
1.75	1.159	186.915	###
1.75	1.159	186.915	###
1.867	1.132	183.773	###
1.867	1.132	183.773	###
1.983	1.104	180.509	###
1.983	1.104	180.509	###
2.1	1.075	177.136	###
2.1	1.075	177.136	###
2.217	1.045	173.666	###
2.217	1.045	173.666	###
2.333	1.015	170.111	###
2.333	1.015	170.111	###
2.45	0.984	166.485	###
2.45	0.984	166.485	###
2.567	0.953	162.8	-81.93
2.567	0.953	162.8	-81.93
2.683	0.922	159.069	-63.154
2.683	0.922	159.069	-63.154
2.8	0.89	155.304	-44.816
2.8	0.89	155.304	-44.816
2.917	0.858	151.517	-26.918
2.917	0.858	151.517	-26.918
3.033	0.825	147.721	-9.462
3.033	0.825	147.721	-9.462
3.15	0.793	143.927	7.551
3.15	0.793	143.927	7.551
3.267	0.761	140.147	24.121
3.267	0.761	140.147	24.121
3.383	0.729	136.391	40.252
3.383	0.729	136.391	40.252
3.5	0.697	132.671	55.947
3.5	0.697	132.671	55.947
3.62	0.664	128.977	71.494
3.62	0.664	128.977	71.494
3.739	0.632	120.897	86.335
3.739	0.632	120.897	86.335
3.859	0.6	114.464	100.427
3.859	0.6	114.464	100.427
3.979	0.569	107.715	113.729
3.979	0.569	107.715	113.729
4.099	0.538	100.691	126.207
4.099	0.538	100.691	126.207
4.218	0.508	93.43	137.829
4.218	0.508	93.43	137.829
4.338	0.479	85.975	148.57
4.338	0.479	85.975	148.57
4.458	0.45	78.368	158.408
4.458	0.45	78.368	158.408
4.577	0.422	70.651	167.329
4.577	0.422	70.651	167.329
4.697	0.394	62.868	175.322
4.697	0.394	62.868	175.322
4.817	0.368	55.061	182.381
4.817	0.368	55.061	182.381
4.937	0.342	47.272	188.506
4.937	0.342	47.272	188.506
5.056	0.318	39.541	193.702
5.056	0.318	39.541	193.702
5.176	0.294	31.908	197.978
5.176	0.294	31.908	197.978
5.296	0.271	24.412	201.348
5.296	0.271	24.412	201.348
5.415	0.249	17.088	203.83
5.415	0.249	17.088	203.83
5.535	0.228	9.971	205.448
5.535	0.228	9.971	205.448
5.655	0.208	3.093	206.227
5.655	0.208	3.093	206.227
5.775	0.189	-3.517	206.199
5.775	0.189	-3.517	206.199
5.894	0.171	-9.833	205.397
5.894	0.171	-9.833	205.397
6.014	0.154	-15.829	203.857
6.014	0.154	-15.829	203.857
6.134	0.138	-21.484	201.62
6.134	0.138	-21.484	201.62
6.254	0.122	-26.78	198.728
6.254	0.122	-26.78	198.728
6.373	0.108	-31.701	195.223
6.373	0.108	-31.701	195.223
6.493	0.095	-36.235	191.153
6.493	0.095	-36.235	191.153

L=15m

Pile Head Lateral Load = 212.16 kN
Pile Head Axial Load = 0 kN

Depth (m)	Deflection (mm)	Shear Force (kN)	Moment (kN.m)
0	1.389	212.16	-580.924
0.146	1.387	211.968	###
0.146	1.387	211.968	###
0.292	1.381	211.394	###
0.292	1.381	211.394	###
0.438	1.372	210.443	###
0.438	1.372	210.443	###
0.583	1.359	209.122	###
0.583	1.359	209.122	###
0.729	1.343	207.442	###
0.729	1.343	207.442	###
0.875	1.324	205.414	###
0.875	1.324	205.414	###
1.021	1.302	203.055	###
1.021	1.302	203.055	###
1.167	1.278	200.381	###
1.167	1.278	200.381	###
1.313	1.251	197.41	###
1.313	1.251	197.41	###
1.458	1.222	194.163	###
1.458	1.222	194.163	###
1.604	1.191	190.66	###
1.604	1.191	190.66	###
1.75	1.159	186.924	###
1.75	1.159	186.924	###
1.896	1.125	182.979	###
1.896	1.125	182.979	###
2.042	1.089	178.848	###
2.042	1.089	178.848	###
2.188	1.052	174.556	###
2.188	1.052	174.556	###
2.333	1.015	170.127	###
2.333	1.015	170.127	###
2.479	0.976	165.586	-96.154
2.479	0.976	165.586	-96.154
2.625	0.937	160.958	-72.342
2.625	0.937	160.958	-72.342
2.771	0.897	156.268	-49.211
2.771	0.897	156.268	-49.211
2.917	0.857	151.539	-26.766
2.917	0.857	151.539	-26.766
3.063	0.817	146.796	-5.012
3.063	0.817		

5.6	0.227	2.012	200.875
5.6	0.227	2.012	200.875
5.7	0.21	-3.898	200.779
5.7	0.21	-3.898	200.779
5.8	0.195	-9.621	200.101
5.8	0.195	-9.621	200.101
5.9	0.179	-15.143	198.861
5.9	0.179	-15.143	198.861
6	0.165	-20.446	197.08
6	0.165	-20.446	197.08
6.1	0.151	-25.52	194.78
6.1	0.151	-25.52	194.78
6.2	0.138	-30.35	191.984
6.2	0.138	-30.35	191.984
6.3	0.125	-34.926	188.718
6.3	0.125	-34.926	188.718
6.4	0.113	-39.238	185.008
6.4	0.113	-39.238	185.008
6.5	0.102	-43.278	180.88
6.5	0.102	-43.278	180.88
6.6	0.091	-47.039	176.361
6.6	0.091	-47.039	176.361
6.7	0.081	-50.513	171.481
6.7	0.081	-50.513	171.481
6.8	0.071	-53.697	166.269
6.8	0.071	-53.697	166.269
6.9	0.062	-56.587	160.752
6.9	0.062	-56.587	160.752
7	0.053	-59.178	154.961
7	0.053	-59.178	154.961
7.1	0.045	-61.47	148.926
7.1	0.045	-61.47	148.926
7.2	0.037	-63.462	142.677
7.2	0.037	-63.462	142.677
7.3	0.03	-65.152	136.244
7.3	0.03	-65.152	136.244
7.4	0.024	-66.541	129.657
7.4	0.024	-66.541	129.657
7.5	0.017	-67.63	122.946
7.5	0.017	-67.63	122.946
7.6	0.012	-68.421	116.141
7.6	0.012	-68.421	116.141
7.7	0.006	-68.915	109.271
7.7	0.006	-68.915	109.271
7.8	0.001	-69.115	102.367
7.8	0.001	-69.115	102.367
7.9	-0.004	-69.022	95.458
7.9	-0.004	-69.022	95.458
8	-0.008	-68.639	88.573
8	-0.008	-68.639	88.573
8.1	-0.013	-67.968	81.74
8.1	-0.013	-67.968	81.74
8.2	-0.016	-67.012	74.988
8.2	-0.016	-67.012	74.988
8.3	-0.02	-65.772	68.347
8.3	-0.02	-65.772	68.347
8.4	-0.024	-64.249	61.843
8.4	-0.024	-64.249	61.843
8.5	-0.027	-62.445	55.506
8.5	-0.027	-62.445	55.506
8.6	-0.03	-60.36	49.364
8.6	-0.03	-60.36	49.364
8.7	-0.033	-57.994	43.444
8.7	-0.033	-57.994	43.444
8.8	-0.036	-55.346	37.774
8.8	-0.036	-55.346	37.774
8.9	-0.038	-52.414	32.384
8.9	-0.038	-52.414	32.384
9	-0.041	-49.196	27.301
9	-0.041	-49.196	27.301
9.1	-0.043	-45.687	22.554
9.1	-0.043	-45.687	22.554
9.2	-0.046	-41.884	18.173
9.2	-0.046	-41.884	18.173
9.3	-0.048	-37.781	14.188
9.3	-0.048	-37.781	14.188
9.4	-0.05	-33.372	10.627
9.4	-0.05	-33.372	10.627
9.5	-0.052	-28.648	7.524
9.5	-0.052	-28.648	7.524
9.6	-0.055	-23.602	4.908
9.6	-0.055	-23.602	4.908
9.7	-0.057	-18.225	2.814
9.7	-0.057	-18.225	2.814
9.8	-0.059	-12.506	1.275
9.8	-0.059	-12.506	1.275
9.9	-0.061	-6.435	0.325
9.9	-0.061	-6.435	0.325
10	-0.063	0	0

6.613	0.082	-40.373	186.563
6.613	0.082	-40.373	186.563
6.732	0.071	-44.106	181.502
6.732	0.071	-44.106	181.502
6.852	0.06	-47.433	176.019
6.852	0.06	-47.433	176.019
6.972	0.05	-50.351	170.161
6.972	0.05	-50.351	170.161
7.092	0.041	-52.862	163.979
7.092	0.041	-52.862	163.979
7.211	0.032	-54.971	157.52
7.211	0.032	-54.971	157.52
7.331	0.025	-56.684	150.833
7.331	0.025	-56.684	150.833
7.451	0.018	-58.01	143.964
7.451	0.018	-58.01	143.964
7.57	0.012	-58.96	136.958
7.57	0.012	-58.96	136.958
7.69	0.006	-59.548	129.861
7.69	0.006	-59.548	129.861
7.81	0.001	-59.788	122.714
7.81	0.001	-59.788	122.714
7.93	-0.003	-59.696	115.559
7.93	-0.003	-59.696	115.559
8.049	-0.007	-59.291	108.433
8.049	-0.007	-59.291	108.433
8.169	-0.011	-58.591	101.374
8.169	-0.011	-58.591	101.374
8.289	-0.014	-57.617	94.415
8.289	-0.014	-57.617	94.415
8.408	-0.016	-56.389	87.588
8.408	-0.016	-56.389	87.588
8.528	-0.018	-54.928	80.923
8.528	-0.018	-54.928	80.923
8.648	-0.02	-53.257	74.445
8.648	-0.02	-53.257	74.445
8.768	-0.021	-51.398	68.179
8.768	-0.021	-51.398	68.179
8.887	-0.022	-49.372	62.145
8.887	-0.022	-49.372	62.145
9.007	-0.023	-47.203	56.363
9.007	-0.023	-47.203	56.363
9.127	-0.023	-44.912	50.848
9.127	-0.023	-44.912	50.848
9.246	-0.023	-42.52	45.613
9.246	-0.023	-42.52	45.613
9.366	-0.023	-40.05	40.67
9.366	-0.023	-40.05	40.67
9.486	-0.023	-37.522	36.026
9.486	-0.023	-37.522	36.026
9.606	-0.023	-34.955	31.687
9.606	-0.023	-34.955	31.687
9.725	-0.022	-32.37	27.657
9.725	-0.022	-32.37	27.657
9.845	-0.021	-29.785	23.937
9.845	-0.021	-29.785	23.937
9.965	-0.021	-27.218	20.525
9.965	-0.021	-27.218	20.525
10.085	-0.02	-24.685	17.419
10.085	-0.02	-24.685	17.419
10.204	-0.019	-22.203	14.613
10.204	-0.019	-22.203	14.613
10.324	-0.018	-19.788	12.1
10.324	-0.018	-19.788	12.1
10.444	-0.017	-17.454	9.871
10.444	-0.017	-17.454	9.871
10.563	-0.015	-15.214	7.917
10.563	-0.015	-15.214	7.917
10.683	-0.014	-13.083	6.224
10.683	-0.014	-13.083	6.224
10.803	-0.013	-11.071	4.78
10.803	-0.013	-11.071	4.78
10.923	-0.012	-9.192	3.568
10.923	-0.012	-9.192	3.568
11.042	-0.011	-7.457	2.573
11.042	-0.011	-7.457	2.573
11.162	-0.009	-5.876	1.776
11.162	-0.009	-5.876	1.776
11.282	-0.008	-4.461	1.159
11.282	-0.008	-4.461	1.159
11.401	-0.007	-3.22	0.701
11.401	-0.007	-3.22	0.701
11.521	-0.006	-2.165	0.381
11.521	-0.006	-2.165	0.381
11.641	-0.004	-1.306	0.175
11.641	-0.004	-1.306	0.175
11.761	-0.003	-0.652	0.06
11.761	-0.003	-0.652	0.06
11.88	-0.002	-0.213	0.01
11.88	-0.002	-0.213	0.01

8.279	-0.012	-58.658	94.36
8.279	-0.012	-58.658	94.36
8.429	-0.015	-57.239	85.701
8.429	-0.015	-57.239	85.701
8.578	-0.017	-55.474	77.28
8.578	-0.017	-55.474	77.28
8.727	-0.019	-53.405	69.146
8.727	-0.019	-53.405	69.146
8.877	-0.021	-51.074	61.341
8.877	-0.021	-51.074	61.341
9.026	-0.021	-48.525	53.901
9.026	-0.021	-48.525	53.901
9.175	-0.022	-45.799	46.855
9.175	-0.022	-45.799	46.855
9.325	-0.022	-42.936	40.227
9.325	-0.022	-42.936	40.227
9.474	-0.022	-39.976	34.035
9.474	-0.022	-39.976	34.035
9.623	-0.021	-36.954	28.289
9.623	-0.021	-36.954	28.289
9.773	-0.021	-33.906	22.998
9.773	-0.021	-33.906	22.998
9.922	-0.02	-30.864	18.161
9.922	-0.02	-30.864	18.161
10.071	-0.019	-27.856	13.777
10.071	-0.019	-27.856	13.777
10.221	-0.018	-24.91	9.838
10.221	-0.018	-24.91	9.838
10.37	-0.017	-22.049	6.332
10.37	-0.017	-22.049	6.332
10.519	-0.015	-19.293	3.246
10.519	-0.015	-19.293	3.246
10.669	-0.014	-16.66	0.563
10.669	-0.014	-16.66	0.563
10.818	-0.013	-14.164	-1.737
10.818	-0.013	-14.164	-1.737
10.968	-0.012	-11.817	-3.675
10.968	-0.012	-11.817	-3.675
11.117	-0.011	-9.628	-5.274
11.117	-0.011	-9.628	-5.274
11.266	-0.01	-7.602	-6.559
11.266	-0.01	-7.602	-6.559
11.416	-0.008	-5.744	-7.554
11.416	-0.008	-5.744	-7.554
11.565	-0.007	-4.055	-8.283
11.565	-0.007	-4.055	-8.283
11.714	-0.006	-2.534	-8.773
11.714	-0.006	-2.534	-8.773
11.864	-0.006	-1.18	-9.049
11.864	-0.006	-1.18	-9.049
12.013	-0.005	0.013	-9.134
12.013	-0.005	0.013	-9.134
12.162	-0.004	1.049	-9.053
12.162	-0.004	1.049	-9.053
12.312	-0.003	1.934	-8.828
12.312	-0.003	1.934	-8.828
12.461	-0.003	2.676	-8.482
12.461	-0.003	2.676	-8.482
12.61	-0.002	3.282	-8.035
12.61	-0.002	3.282	-8.035
12.76	-0.002	3.761	-7.508
12.76	-0.002	3.761	-7.508
12.909	-0.001	4.121	-6.918
12.909	-0.001	4.121	-6.918
13.058	-0.001	4.369	-6.283
13.058	-0.001	4.369	-6.283
13.208	0	4.513	-5.618
13.208	0	4.513	-5.618
13.357	0	4.562	-4.939
13.357	0	4.562	-4.939
13.506	0	4.52	-4.26
13.506	0	4.52	-4.26
13.656	0.001	4.395	-3.593
13.656	0.001	4.395	-3.593
13.805	0.001	4.192	-2.951
13.805	0.001	4.192	-2.951
13.955	0.001	3.913	-2.345
13.955	0.001	3.913	-2.345
14.104	0.001	3.563	-1.786
14.104	0.001	3.563	-1.786
14.253	0.001	3.143	-1.284
14.253	0.001	3.143	-1.284
14.403	0.002	2.655	-0.85
14.403	0.002	2.655	-0.85
14.552	0.002	2.098	-0.494
14.552	0.002	2.098	-0.494
14.701	0.002	1.471	-0.227
14.701	0.002	1.471	-0.227
14.851	0.002	0.772	-0.059
1			



**e) Archivos soporte análisis elementos finitos -
Modelo PLAXIS**

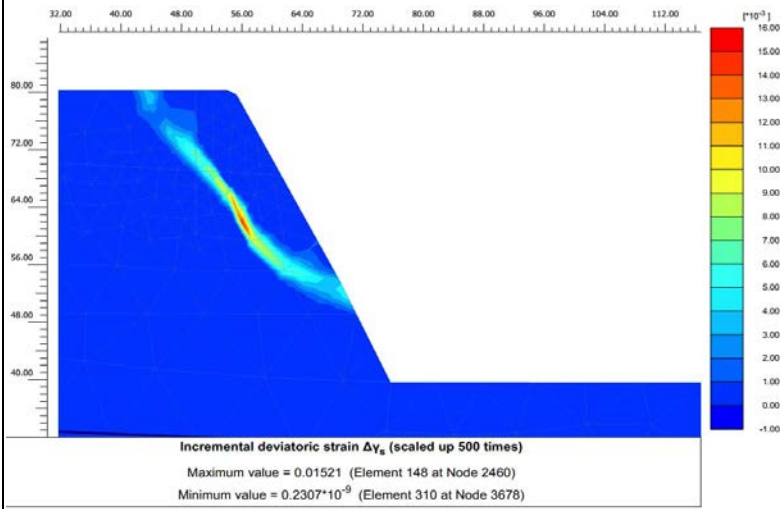
Predimensionamiento Pilas software PLAXIS

PARÁMETROS PARA DISEÑO	GRAVA ARENOSA MEDIANAMENTE DENSA	GRAVA ARENOSA DENSA / COMPACTA	GRAVA RIGIDA	GRAVA MUY RIGIDA	COMENTARIO RESULTADOS
Descripción	Estrato conformado por capa Grava arenosa con algo de arcilla (finos de baja plasticidad), suelta, seca y de color marrón, así como arena arcillosa con grava, color marrón con presencia de piedras y bolones subredondeados de 6" tamaño máximo. Presencia de escombros de construcción (plásticos, vidrio, concreto).	Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plomizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa. Con presencia de piedras y bolones redondeados de 12" tamaño máximo. Típico del depósito del río Rimac.	Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plomizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa. Con presencia de piedras y bolones redondeados de 12" tamaño máximo. Típico del depósito del río Rimac.	Grava arenosa mal gradada, con algo de arcilla, estrato húmedo color marrón plomizo. En los primeros metros suelto y en profundidad medianamente densa. Con presencia de piedras y bolones redondeados de 12" tamaño máximo. Típico del depósito del río Rimac.	
Variación en Profundidad	0m-16m	16-36m	36m-45m	>45m	
Clasificación USCS	GC/GM	GC/GM	GC/GM	GC/GM	
Peso Unitario total, γ , [kN/m ³]	19.0	21.0	22.0	22.0	Se presenta Colapso del suelo, Adicionalmente no representa una superficie de falla adecuada. El modelo no logra converger.
Cohesión, c [kPa]	38	39	41	45	
Ángulo de fricción interna, ϕ [°]	39	45	42	40	
Ángulo de dilatación, ψ [°]	6	8	10	10	
Módulo de Young E [kN/m ²]	1.20E+05	1.50E+05	1.00E+06	1.50E+06	
Módulo de Poisson, ν [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	
Módulo de reacción, K ₀	0.37	0.29	0.33	0.36	
Peso Unitario total, γ , [kN/m ³]	19.0	21.0	22.0	22.0	Se presenta Colapso del suelo, Adicionalmente no representa una superficie de falla adecuada. El modelo no logra converger.
Cohesión, c [kPa]	38	39	41	45	
Ángulo de fricción interna, ϕ [°]	39	45	42	40	
Ángulo de dilatación, ψ [°]	0	0	0	0	
Módulo de Young E [kN/m ²]	1.20E+05	1.50E+05	1.00E+06	1.50E+06	
Módulo de Poisson, ν [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	
Módulo de reacción, K ₀	0.37	0.29	0.33	0.36	
Peso Unitario total, γ , [kN/m ³]	19.0	21.0	22.0	22.0	Se presenta Colapso del suelo, Adicionalmente no representa una superficie de falla adecuada. El modelo no logra converger.
Cohesión, c [kPa]	38	39	41	45	
Ángulo de fricción interna, ϕ [°]	39	45	42	40	
Ángulo de dilatación, ψ [°]	0	0	0	0	
Módulo de Young E [kN/m ²]	1.20E+05	1.50E+05	1.00E+06	1.50E+06	
Módulo de Poisson, ν [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	
Módulo de reacción, K ₀	0.37	0.29	0.33	0.36	
Peso Unitario total, γ , [kN/m ³]	19.0	21.0	22.0	22.0	Muestra una superficie de falla adecuada global del talud, la cual tiene 9m de ancho de corona y 35m de altura. No se considera representativo al mecanismo real
Cohesión, c [kPa]	40	40	50	50	
Ángulo de fricción interna, ϕ [°]	35	40	42	40	
Ángulo de dilatación, ψ [°]	0	0	0	0	
Módulo de Young E [kN/m ²]	1.20E+05	1.50E+05	1.00E+06	1.50E+06	
Módulo de Poisson, ν [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	
Módulo de reacción, K ₀	0.43	0.36	0.33	0.36	
Peso Unitario total, γ , [kN/m ³]	19.0	21.0	22.0	22.0	Muestra una superficie de falla adecuada global del talud, la cual tiene 9m de ancho de corona y 35m de altura. No se considera representativo al mecanismo real
Cohesión, c [kPa]	28	40	50	50	
Ángulo de fricción interna, ϕ [°]	25	40	42	40	
Ángulo de dilatación, ψ [°]	0	0	0	0	
Módulo de Young E [kN/m ²]	1.20E+05	1.50E+05	1.00E+06	1.50E+06	
Módulo de Poisson, ν [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	
Módulo de reacción, K ₀	0.58	0.36	0.33	0.36	
Peso Unitario total, γ , [kN/m ³]	19.0	21.0	22.0	22.0	Se presenta Colapso del suelo, Adicionalmente no representa una superficie de falla adecuada. El modelo no logra converger.
Cohesión, c [kPa]	28	30	40	45	
Ángulo de fricción interna, ϕ [°]	30	38	35	35	
Ángulo de dilatación, ψ [°]	30	38	35	35	
Módulo de Young E [kN/m ²]	1.20E+05	1.50E+05	1.00E+06	1.50E+06	
Módulo de Poisson, ν [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	
Módulo de reacción, K ₀	0.50	0.38	0.43	0.43	
Peso Unitario total, γ , [kN/m ³]	19.0	21.0	22.0	22.0	Permite generar estado de esfuerzos si colapso de la estructura de suelo. Muestra una superficie de falla global del talud, la cual tiene 10m de ancho de corona y 30m de altura, la cual se considera representativa al mecanismo real
Cohesión, c [kPa]	30	35	38	40	
Ángulo de fricción interna, ϕ [°]	35	40	40	38	
Ángulo de dilatación, ψ [°]	6	8	0	0	
Módulo de Young E [kN/m ²]	1.20E+05	1.50E+05	1.00E+06	1.50E+06	
Módulo de Poisson, ν [-]	0.25	0.25	0.25	0.25	
Módulo de reacción, K ₀	0.43	0.36	0.36	0.38	

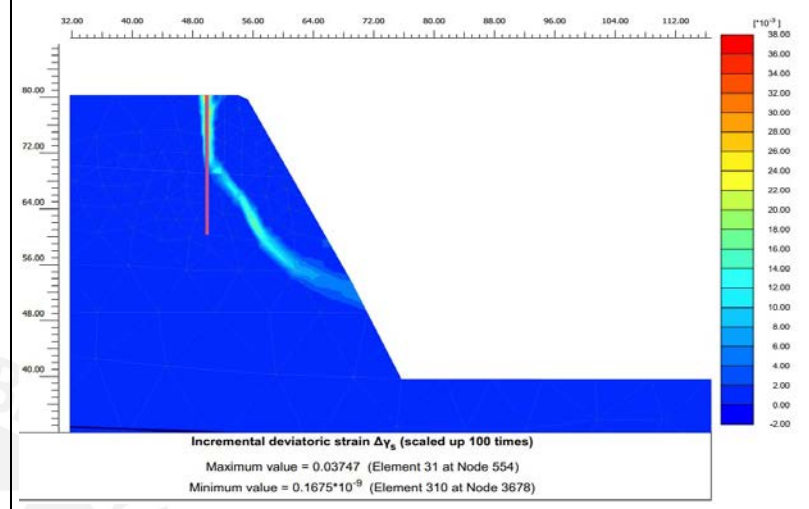
Características principales del pilote						
Material del Pilote	Unidad	Concreto armado	Concreto armado	Concreto armado	Concreto armado	Concreto armado
D	Díámetro [m]	1.00	1.20	1.40	1.60	1.60
A	área del pilote [m ²]	0.79	1.13	1.54	2.01	2.01
f _c	Esfuerzo de resistencia a compresión [kN/m ²]	21000	21000	21000	21000	21000
γ	Peso unitario [kN/m ³]	24	24	24	24	24
E	Módulo de Elasticidad del pilote (E ₀₄) [kN/m ²]	5.39E+08	5.39E+08	5.39E+08	5.39E+08	5.39E+08
M _p	Momento de plastificación (fluencia) aproximado para un elemento tipo pila en concreto [kN-m]	1996.45	3533.87	5707.94	8628.89	8628.89
I	Inercia [m ⁴]	0.049	0.102	0.189	0.322	0.322
L _s	Espaciamiento entre pilotes (borde-borde) [m]	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
EA	[kN/m]	4.23E+08	6.09E+08	8.29E+08	1.08E+09	1.08E+09
EI	[kN/m ²]	2.64E+07	5.48E+07	1.02E+08	1.73E+08	1.73E+08
Peso Unitario	[kN/m ³]	25	25	25	25	25
Peso Unitario/unidad de longitud	[kN/m]	31.83	22.10	16.24	12.43	12.43
ν [-]	Módulo de Poisson	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25

D:1.0m L:20m

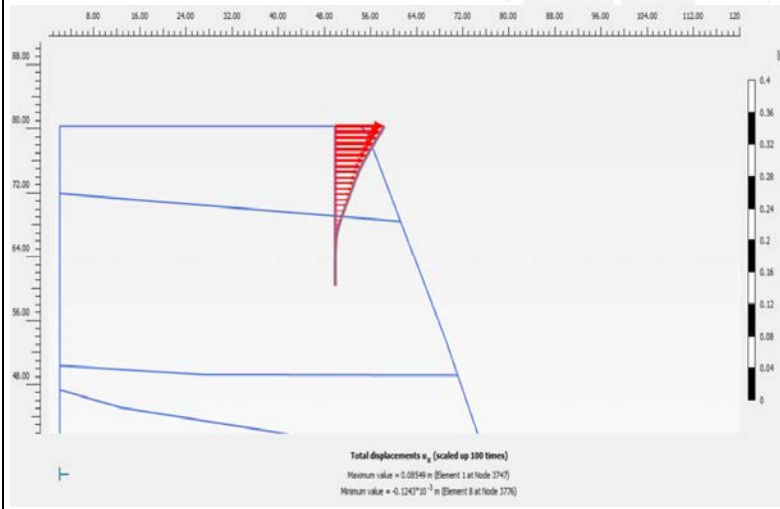
Condición Natural



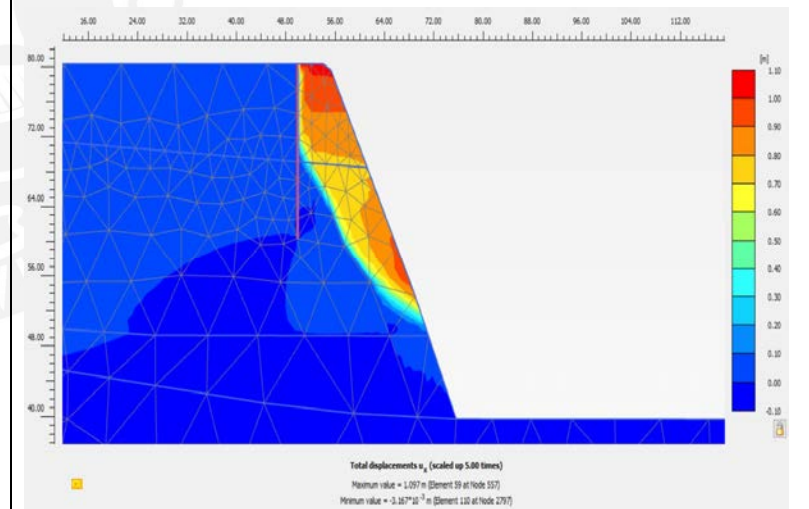
Reforzamiento



Deformada

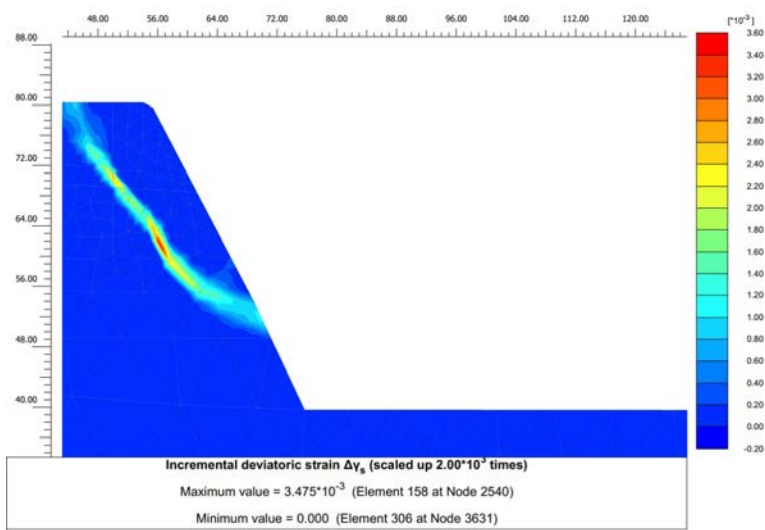


Desplazamientos

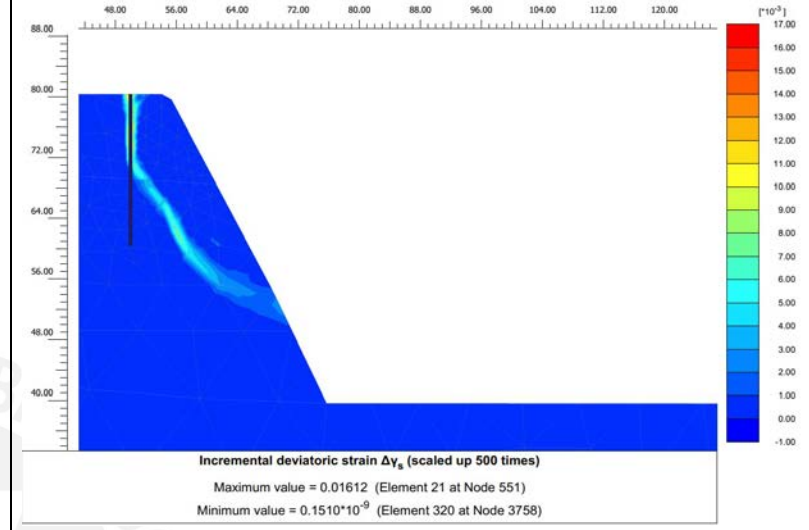


D:1.2m L:20m

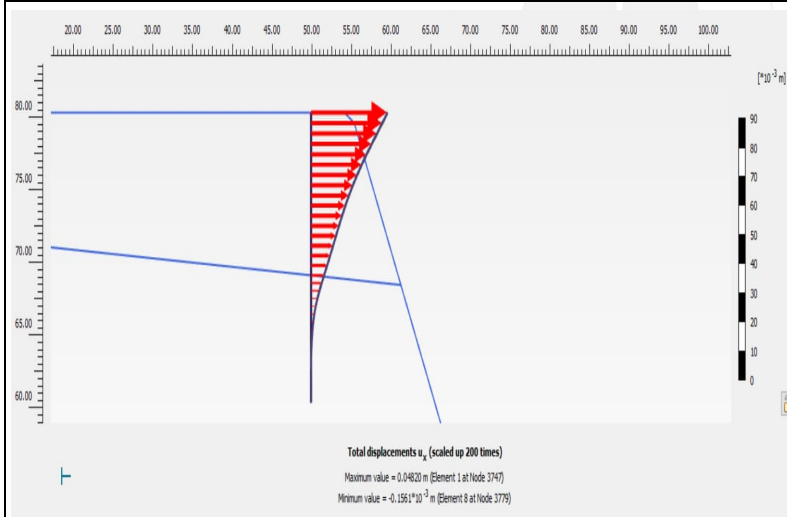
Condición Natural



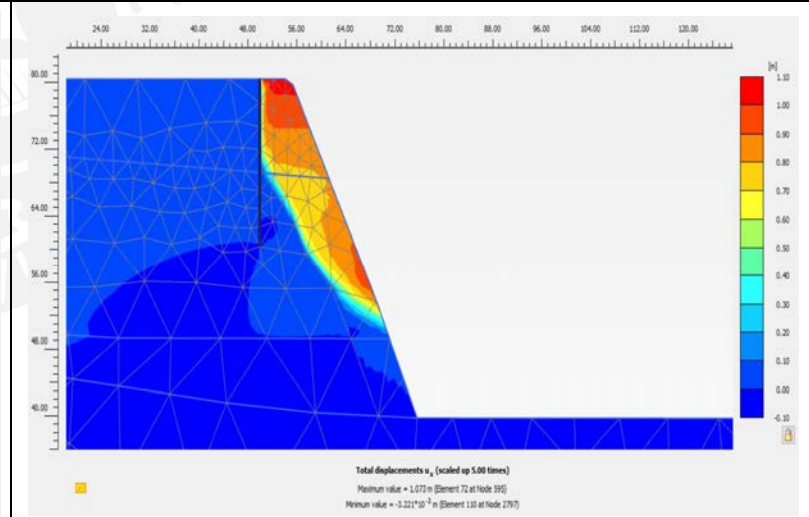
Reforzamiento



Deformada

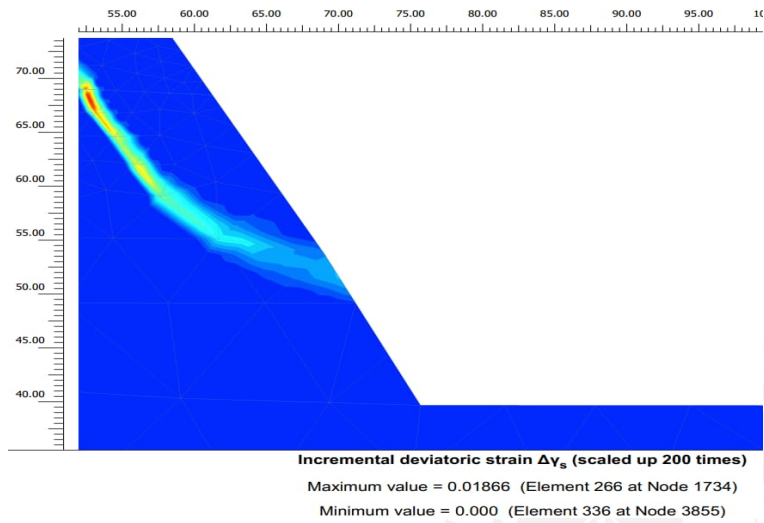


Desplazamientos

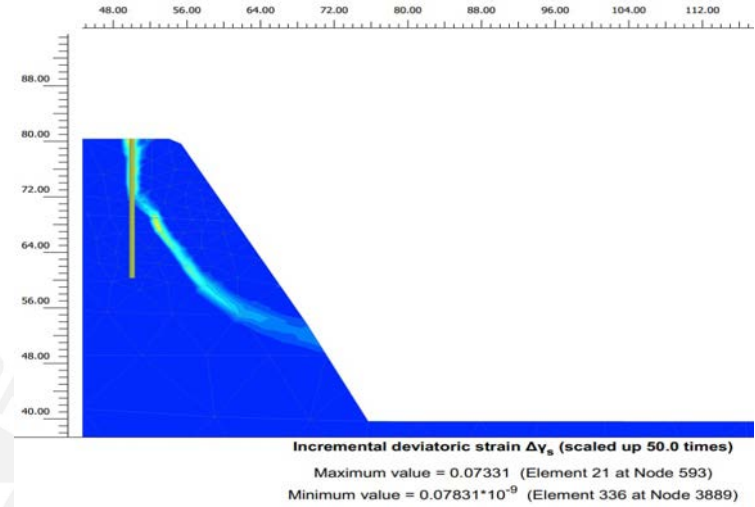


D:1.4m L:20m

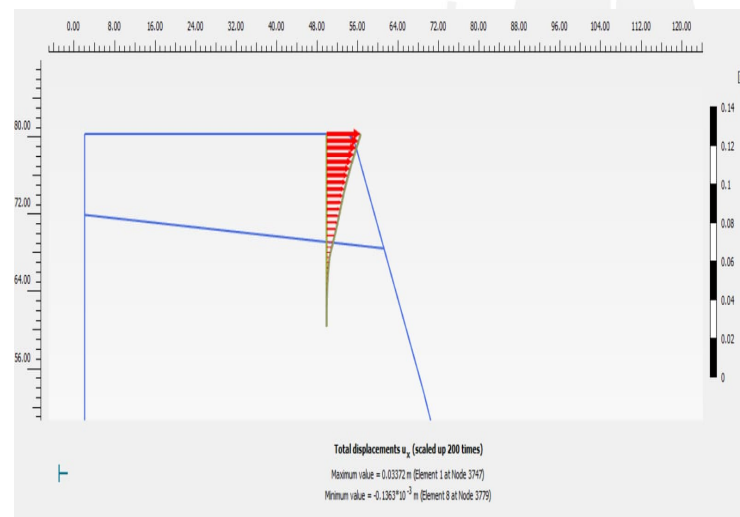
Condición Natural



Reforzamiento



Condición Natural



Reforzamiento

