

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA SEPARACIÓN ENTRE MUROS
ESCALONADOS DE CONCRETO ARMADO EN EL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO DEL TALUD, CUSCO-2024**

PRESENTADO POR:

Br. DUEÑAS TTITO OSCAR JOSE

Br. DUEÑAS TTITO JORGE LUIS

**PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL
DE INGENIERO CIVIL**

ASESOR:

MGT. ING. SOLIS TITO JOSE CARLOS

CUSCO-PERÚ

2025



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el Asesor MGT. ING. JOSE CARLOS SOLIS TITO
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada:
"EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA SEPARACIÓN ENTRE MUROS
ESCALINARIOS DE CONCRETO ARMADO EN EL COMPORTAMIENTO
MECÁNICO DEL TALUD, CUSCO - 2024"

Presentado por: OSCAR JOSE DUEÑAS TITO DNI N° 74144096 ;
presentado por: JORGE LUIS DUEÑAS TITO DNI N°: 74144095
Para optar el título Profesional/Grado Académico de
INGENIERO CIVIL

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por 02 veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de
Similitud en la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 07 %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	☒
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	☐
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	☐

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, 22 de OCTUBRE de 2025


Firma

Post firma JOSE CARLOS SOLIS TITO

Nro. de DNI 43491953

ORCID del Asesor 0000 - 0002 - 1487 - 7330

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: oid: 272598516250984

OSCAR JOSE y JORGE LUIS DUEÑAS TTITO y DUE... TESIS PARA RESPOSITORIO.pdf

 Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:516250984

Fecha de entrega

21 oct 2025, 7:28 p.m. GMT-5

Fecha de descarga

21 oct 2025, 7:38 p.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS PARA RESPOSITORIO.pdf

Tamaño del archivo

16.2 MB

319 páginas

75.129 palabras

362.499 caracteres

7% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Fuentes principales

- 6%  Fuentes de Internet
- 3%  Publicaciones
- 6%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
467 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
95 caracteres sospechosos en N.º de páginas
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a Dios, por iluminar mi camino y darme la fortaleza para perseverar.

A mi familia y amigos, cuyo amor, apoyo y sacrificio constantes han sido mi mayor motivación. Este logro es también suyo.

Jorge Luis Dueñas Ttito

Dedico este trabajo a Dios, por ser la calma entre tantos malos pensamientos e inseguridades.

A mis padres, Nancy Ttito y Luis Dueñas y hermanas por confiar siempre en mí y brindarme su apoyo incondicional.

A mi hermano y compañero de tesis Jorge por siempre estar conmigo y confiar en el proceso.

Oscar Jose Dueñas Ttito

AGRADECIMIENTOS

Nuestra más sincera gratitud nuestros mentores, los doctores y magísteres de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNSAAC. Sus conocimientos y exigencia profesional nos guiaron para transformar una idea en una investigación de excelencia.

De forma encarecida al ingeniero asesor, Jose Carlos Solis Tito, por tener siempre la disponibilidad para atender nuestras consultas y guiarnos en todo este proceso.

A nuestros amigos y compañeros de código que con su amistad hicieron que esta etapa fuera más llevadera.

Finalmente, queremos hacer una mención especial, sin ningún orden de precedencia, a un grupo de personas y familiares cuyo apoyo fue un pilar en nuestra vida durante este proceso: Gerardo Carrasco, Luis Dueñas, Natividad Dueñas, y Nancy Ttito, así como a las familias Dueñas, Carrasco, Ttito, Cuyo, Ramo, y Zárate. Gracias por su invaluable amistad y aliento.

Bach. Dueñas Ttito Oscar Jose

Bach. Dueñas Ttito Jorge Luis

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. Planteamiento del problema.....	4
1.2. Formulación del problema	6
1.2.1. Problema General.....	6
1.2.2. Problemas Específicos	6
1.3. Justificación de la Investigación	7
1.3.1. Justificación por conveniencia	9
1.3.2. Justificación por relevancia social	10
1.3.3. Justificación por implicancias prácticas.....	10
1.3.4. Justificación por viabilidad	11
1.3.5. Justificación por valor teórico.....	11
1.3.6. Justificación por unidad metodológica	12
1.4. Objetivos de la Investigación.....	13
1.4.1. Objetivo General	13
1.4.2. Objetivos Específicos.....	13
1.5. Delimitación de la investigación.....	14
1.5.1. Delimitación espacial.....	14
1.5.2. Delimitación temporal	14
1.5.3. Delimitación conceptual.	14
2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	16
2.1. ANTECEDENTES EMPÍRICOS DE LA INVESTIGACIÓN	16
2.1.1. Antecedente local.....	16
2.1.2. Antecedentes Nacionales	17
2.1.3. Antecedente internacional.....	19
2.2. Bases Teóricas.	21
2.2.1. Definición Conceptual.	21
2.2.2. Definición Operacional.....	73
2.2.3. Definición de Términos Básicos	78
2.3. Hipótesis.	80
2.3.1. Hipótesis general.....	80
2.3.2. Hipótesis específica	80

2.4.	Identificación de variables e indicadores.....	80
2.4.1.	Identificación de Variables.....	80
2.4.2.	Operacionalización de variables	80
3.	METODOLOGÍA.....	82
3.1.	Alcance de estudio.....	82
3.2.	Diseño de la investigación.....	82
3.3.	Población de estudio.....	84
3.4.	Tamaño de muestra.....	84
3.5.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	85
3.6.	Validez de instrumentos.....	86
3.6.1.	Validez.....	86
3.7.	Plan de Análisis de Datos.....	87
3.8.	Recolección de datos.....	88
3.8.1.	Caracterización del talud.....	88
3.8.2.	Ensayos para la determinación de las características físicas del suelo	91
3.8.3.	Ensayo para determinar la compactación del suelo.....	97
3.8.4.	Ensayos para la determinación de las características mecánicas del suelo.....	101
3.8.5.	Modelo experimental.....	113
4.	RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	133
4.1.1.	Resultados del trabajo en campo (Fase I).....	133
4.2.	Resultados del trabajo en laboratorio y gabinete. (Fase II)	135
4.2.1.	Resultados de la Granulometría.....	135
4.2.2.	Resultados de los límites de Atterberg.....	141
4.2.3.	Resultados de la clasificación del suelo.....	147
4.2.4.	Resultados del ensayo de Proctor Modificado.....	159
4.2.5.	Resultados del ensayo de densidad mínima y máxima para arenas.....	161
4.2.6.	Resultados de los ensayos triaxiales.....	163
4.3.	Resultados del modelo Prototipo (Fase III)	181
4.3.1.	Análisis de Esfuerzos.....	181
4.3.2.	Resultados de Factor de Seguridad.....	192
4.3.3.	Resultados de desplazamientos generados.....	196
4.3.4.	Resultados de desplazamiento bajo carga aplicada.....	203
4.4.	Resultados del modelo físico a escala reducida (Fase IV).....	209
4.4.1.	A 1.50 metros de separación.....	210

4.4.2.	A 3.00 metros de separación.....	212
4.4.3.	A 4.50 metros de separación.....	214
4.4.4.	A 6.00 metros de separación.....	216
4.5.	Resultados de modelo numérico a escala reducida.....	217
4.5.1.	A 1.50 metros de separación.....	219
4.5.2.	A 3.00 metros de separación.....	221
4.5.3.	A 4.50 metros de separación.....	223
4.5.4.	A 6.00 metros de separación.....	225
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	227
5.1.	Descripción de los hallazgos más relevantes y significativos.	227
5.1.1.	Respecto al modelo prototipo.	227
5.1.2.	Respecto al modelo a escala reducida.....	242
5.2.	Limitaciones del estudio.	247
5.2.1.	Respecto a las condiciones de estudio.	247
5.2.2.	Respecto al modelo físico a escala reducida.....	248
5.2.3.	Respecto al modelo numérico a escala reducida.....	249
CONCLUSIONES		250
RECOMENDACIONES.....		252
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		255
ANEXOS.		258

Índice de Tablas.

Tabla 1 Tasa de crecimiento promedio anual, según provincia, 2007 – 2017 en Cusco	6
Tabla 2 Densidad de un suelo granular.....	26
Tabla 3 Métodos de prevención de la amenaza o el riesgo.....	33
Tabla 4 Métodos de elusión de amenazas de deslizamientos	34
Tabla 5 Estructuras de control de masas en movimiento.....	35
Tabla 6 Métodos de conformación topográfica para equilibrar fuerzas	36
Tabla 7 Ventajas y desventajas de los diversos tipos de muro rígido.....	39
Tabla 8 Parámetros de entrada del modelo lineal elástico	51
Tabla 9 Parámetros del modelo de Mohr-Coulomb.....	52
Tabla 10 Parámetros del modelo Hiperbólico.....	55
Tabla 11 Parámetros del modelo de Hardening Soil.....	58
Tabla 12 Sugerencias para R_{inter}	62
Tabla 13 Eventos internacionales de investigación con modelos físicos en geotecnia	69
Tabla 14 Escalas de modelación para diferentes parámetros en estudios geotécnicos	72
Tabla 15 Ensayos a realizar.	74
Tabla 16 Matriz de operacionalización de variables.....	81
Tabla 17 Dimensiones del muro que conforman el sistema escalonado.....	115
Tabla 18 Dimensiones del muro a escala que conforman el sistema escalonado	117
Tabla 19 Escalamiento de densidad para muros	121
Tabla 20 Pruebas de compactación para modelo a escala.	129
Tabla 21 Granulometría de material S1	135
Tabla 22 Granulometría de material S2	137
Tabla 23 Análisis granulométrico del material S3.....	139
Tabla 24 Análisis granulométrico del material S4.....	140
Tabla 25 Curva Granulométrica de la muestra S4	141
Tabla 26 Determinación de límite líquido	141
Tabla 27 Determinación de límite líquido	142
Tabla 28 Determinación de límite líquido	143
Tabla 29 Determinación de límite líquido	144
Tabla 30 Determinación del límite Plástico.....	145
Tabla 31 Límite plástico muestra S4.....	146
Tabla 32 Recolección de datos para clasificación SUCS	147
Tabla 33 Datos para clasificación AASHTO	148
Tabla 34 Recolección de datos para clasificación SUCS, muestra S2.....	150
Tabla 35 Datos para clasificación AASHTO para material S2.....	151
Tabla 36 Recolección de datos para clasificación SUCS, muestra S3.....	153
Tabla 37 Datos para clasificación AASHTO	154
Tabla 38 Recolección de datos para clasificación SUCS, muestra S4.....	156
Tabla 39 Datos para clasificación AASHTO	157
Tabla 40 Obtención de densidad seca máxima según Proctor Modificado	159
Tabla 41 Obtención de % de humedad óptima para compactación	160
Tabla 42 Cálculo de densidad mínima para material S3.....	161
Tabla 43 Cálculo de densidad máxima para muestra S3	161
Tabla 44 Esfuerzos p y q que producen la falla	164
Tabla 45 Obtención del E50 prom.	165

Tabla 46	Esfuerzo de falla y deformación de fluencia para calibración.	166
Tabla 47	Determinación de valores a y b para los 3 confinamientos	167
Tabla 48	Obtención del R_f y b corregido para los 3 confinamientos	167
Tabla 49	Obtención del m.....	167
Tabla 50	Parámetros de salida para modelo de Hardening Soil	168
Tabla 51	Parámetros del modelo Hardening Soil para una presión de referencia (P_{ref}).....	169
Tabla 52	Esfuerzos p y q que producen la falla	171
Tabla 53	Obtención del E_{50} prom	172
Tabla 54	Esfuerzo de falla y deformación de fluencia para calibración.	172
Tabla 55	Determinación de valores a y b para los 3 confinamientos	173
Tabla 56	Obtención del R_f y b corregido para los 3 confinamientos	174
Tabla 57	Obtención del m.....	174
Tabla 58	Parámetros de salida para modelo de Hardening Soil	175
Tabla 59	Parámetros del modelo Hardening Soil para una presión de referencia (p_{ref}).....	176
Tabla 60	Momentos en pantalla y zapata para diferentes separaciones entre muros.....	182
Tabla 61	Esfuerzo cortante en pantalla y zapata para diferentes separaciones entre muros.....	185
Tabla 62	Esfuerzo axial en pantalla y zapata para diferentes separaciones entre muros.....	188
Tabla 63	Esfuerzos generados en la pantalla para distintas separaciones entre muros $H=6m$. .	191
Tabla 64	Esfuerzos generados en la pantalla para distintas separaciones entre muros $H=8m$. .	191
Tabla 65	Factores de Seguridad global para las diferentes separaciones entre muros.	196
Tabla 66	Desplazamiento bajo Carga en la corona del talud, modelo numérico prototipo	203
Tabla 67	Desplazamiento bajo Carga en la corona del talud, modelo numérico a escala	217
Tabla 68	Reducción de momentos para diferentes alturas de muro sobre M-1.....	230
Tabla 69	Incremento porcentual del F.S para las diferentes separaciones.....	233
Tabla 70	Incremento de capacidad de carga para distintas separaciones, modelo prototipo.....	236
Tabla 71	Reducción de desplazamientos por aplicación de carga, modelo prototipo.	236
Tabla 72	Resultados del modelo prototipo ante carga para las distintas separaciones.	237
Tabla 73	Reducción de desplazamientos en puntos de control analizados.....	240
Tabla 74	Incremento de capacidad de carga en el modelo a escala reducida.	242
Tabla 75	Reducción de desplazamientos por aplicación de carga en el modelo a escala.....	243
Tabla 76	Resultados del modelo a escala ante carga para las distintas separaciones.	244

Índice de Figuras

<i>Figura 1.</i> Relaciones peso volumen.....	22
<i>Figura 2.</i> Resistencia pico y residual.....	30
<i>Figura 3.</i> Envolvente de falla y círculo de Mohr.....	31
<i>Figura 4.</i> Nomenclatura de taludes y laderas	32
<i>Figura 5.</i> Condiciones de diseño para muros de contención	38
<i>Figura 6.</i> Esquema de muros rígidos.....	39
<i>Figura 7.</i> Tensiones sobre elemento típico.....	42
<i>Figura 8.</i> Modos de deformación	43
<i>Figura 9.</i> Ejemplos de deformaciones planas.....	45
<i>Figura 10.</i> Modelos constitutivos básicos.	50
<i>Figura 11.</i> Modelos constitutivos elastoplásticos clásicos	51
<i>Figura 12.</i> Relación esfuerzo normal deformación axial en modelo Lineal elástico.	52
<i>Figura 13.</i> Relación esfuerzo normal deformación axial en modelo Mohr Coulomb.....	54
<i>Figura 14.</i> Modelo hiperbólico.....	56
<i>Figura 15.</i> Representación de la ecuación de la hipérbola con cambio de variable	56
<i>Figura 16.</i> Acondicionamiento de parámetros a Resultado ensayo triaxial	57
<i>Figura 17.</i> Linealización de la formulación propuesta por Janbu.	57
<i>Figura 18.</i> Parámetros esfuerzos-deformación para modelo de Hardening Soil.....	61
<i>Figura 19.</i> Aplicación en la que se utilizan placas, anclajes e interfaces	61
<i>Figura 20.</i> Malla típica para el análisis de un talud vertical por elementos finitos.....	67
<i>Figura 21.</i> Ubicación del talud en Pje. Mirador, San Sebastián Cusco, Perú	88
<i>Figura 22.</i> Talud descubierto en Pje. Mirador.....	89
<i>Figura 23.</i> Estratos visibles en el talud.....	89
<i>Figura 24.</i> Exploración geotécnica, extracción de muestras.	91
<i>Figura 25.</i> Cuarteo de muestras del talud, material S1, S2, S3 y S4.....	93
<i>Figura 26.</i> Lavado de material para ensayos de clasificación	93
<i>Figura 27.</i> Granulometría de material S1 y S2.....	94
<i>Figura 28.</i> Granulometría de material S3 y S4.....	94
<i>Figura 29.</i> Ensayo de límites de consistencia.....	97
<i>Figura 30.</i> Ensayo de proctor modificado para arena limosa.....	98
<i>Figura 31.</i> Equipo triaxial Estático del laboratorio de Mecánica de Suelos, UNSAAC	102
<i>Figura 32.</i> Tanque de desaireación.....	103
<i>Figura 33.</i> Cámara triaxial del equipo y switch de control	104
<i>Figura 34.</i> Accesorios ejecutar el ensayo triaxial.....	105
<i>Figura 35.</i> Ensayo triaxial UU para muestra a humedad óptima, para $\sigma_3=50\text{kPa}$	109
<i>Figura 36.</i> Ensayo triaxial UU para muestra a humedad óptima, para $\sigma_3=100\text{kPa}$	109
<i>Figura 37.</i> Ensayo triaxial UU para muestra a humedad óptima, para $\sigma_3= 200\text{kPa}$	110
<i>Figura 38.</i> Ensayos triaxial EN SECO compactado, para confinamientos de 50kPa.....	112
<i>Figura 39.</i> Ensayos triaxial EN SECO compactado, para confinamientos de 100kPa.....	113
<i>Figura 40.</i> Ensayo triaxial EN SECO compactado, para confinamientos de 200kPa	113
<i>Figura 41.</i> Predimensionamiento de muros de contención de concreto armado.....	114
<i>Figura 42.</i> Dimensiones de modelo prototipo, talud con muros escalonados de C.A.....	115
<i>Figura 43.</i> Separaciones en modelo prototipo, 1.5m, 3.0m, 4.5m y 6.0m entre muros	116
<i>Figura 44.</i> Dimensiones de muro a escala que conforman el sistema escalonado.	117

<i>Figura 45.</i> Dimensiones de modelo a escala, talud con muros escalonados de C.A.....	118
<i>Figura 46.</i> Separaciones en modelo a escala, 5.0cm, 10.0cm, 15.0cm y 20.0cm entre muros ..	118
<i>Figura 47.</i> Proyección lineal de sistema, prototipo-modelo, Relación cinemática	119
<i>Figura 48.</i> Elaboración de muros metálicos	121
<i>Figura 49.</i> Construcción de marco experimental con perfiles de acero.	123
<i>Figura 50.</i> Forma de armado de marco experimental.....	123
<i>Figura 51.</i> Diseño de apoyos como para la base del equipo universal.....	126
<i>Figura 52.</i> Mesa de trabajo a nivel del equipo universal con los apoyos puestos.....	126
<i>Figura 53.</i> Secado de material para armado de modelo a escala.....	127
<i>Figura 54.</i> Espacio experimental bien implementado para armar el modelo.	127
<i>Figura 55.</i> Marco experimental cuadriculado para registro de desplazamientos.	130
<i>Figura 56.</i> Armado y compactación de modelo a escala.....	130
<i>Figura 57.</i> Modelo físico a escala reducida, separación de 1.50 m entre muros.....	131
<i>Figura 58.</i> Modelo físico a escala reducida, separación de 3.00 m entre muros.....	131
<i>Figura 59.</i> Modelo físico a escala reducida, separación de 4.50 m entre muros.....	132
<i>Figura 60.</i> Modelo físico a escala reducida, separación de 6.00 m entre muros.....	132
<i>Figura 61.</i> Soil test, con propiedades obtenidas en la calibración a humedad óptima	176
<i>Figura 62.</i> Soil test, con propiedades obtenidas en la calibración en estado SECO.	178
<i>Figura 63.</i> Optimización de parámetros con herramienta de PLAXIS.	179
<i>Figura 64.</i> Momentos sobre los muros, separación de 1.50m.....	182
<i>Figura 65.</i> Momentos sobre los muros, separación de 3.0m.....	183
<i>Figura 66.</i> Momentos sobre los muros, separación de 4.5m.....	183
<i>Figura 67.</i> Momentos sobre los muros, separación de 6.0m.....	184
<i>Figura 68.</i> Momentos sobre los muros, separación de 7.0m.....	184
<i>Figura 69.</i> Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 1.50m.....	185
<i>Figura 70.</i> Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 3.0m.....	186
<i>Figura 71.</i> Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 4.5m.....	186
<i>Figura 72.</i> Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 7.0m.....	187
<i>Figura 73.</i> Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 6.0m.....	187
<i>Figura 74.</i> Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 1.5m	188
<i>Figura 75.</i> Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 4.5m	189
<i>Figura 76.</i> Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 3.0m	189
<i>Figura 77.</i> Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 7.0m	190
<i>Figura 78.</i> Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 6.0m	190
<i>Figura 79.</i> Falla Global, incremento de Desplazamientos, separación de 1.50m entre muros ..	192
<i>Figura 80.</i> Falla Global, incremento de Desplazamientos, separación de 3.00m entre muros ..	193
<i>Figura 81.</i> Falla Global, incremento de Desplazamientos, separación de 4.50m entre muros ..	194
<i>Figura 82.</i> Falla Global, incremento de Desplazamientos, separación de 6.00m entre muros ..	195
<i>Figura 83.</i> Desplazamientos totales en la Fase 1 a 1.50m de separación entre muros	196
<i>Figura 84.</i> Desplazamientos totales en la Fase 2 a 1.50m de separación entre muros	197
<i>Figura 85.</i> Desplazamientos totales en la Fase 3 a 1.50m de separación entre muros	197
<i>Figura 86.</i> Desplazamientos totales en la Fase 1 a 3.00m de separación entre muros	198
<i>Figura 87.</i> Desplazamientos totales en la Fase 2 a 3.00m de separación entre muros	198
<i>Figura 88.</i> Desplazamientos totales en la Fase 3 a 3.00m de separación entre muros	199
<i>Figura 89.</i> Desplazamientos totales en la Fase 1 a 4.50m de separación entre muros	199
<i>Figura 90.</i> Desplazamientos totales en la Fase 2 a 4.50m de separación entre muros	200

<i>Figura 91.</i> Desplazamientos totales en la Fase 3 a 4.50m de separación entre muros	200
<i>Figura 92.</i> Desplazamientos totales en la Fase 1 a 6.00m de separación entre muros	201
<i>Figura 93.</i> Desplazamientos totales en la Fase 2 a 6.00m de separación entre muros	201
<i>Figura 94.</i> Desplazamientos totales en la Fase 3 a 6.00m de separación entre muros	202
<i>Figura 95.</i> Colocación de puntos de control, aplicado a todas las separaciones	204
<i>Figura 96.</i> Desplazamientos ante carga máxima para 1.50 de separación.	205
<i>Figura 97.</i> Desplazamientos ante carga máxima para 3.00m de separación.	206
<i>Figura 98.</i> Desplazamientos ante carga máxima para 4.50m de separación.	207
<i>Figura 99.</i> Desplazamientos ante carga máxima para 6.00m de separación.	208
<i>Figura 100.</i> Desplazamientos bajo carga, separación de 1.50m, falla del experimento.....	210
<i>Figura 101.</i> Desplazamientos bajo carga, separación de 1.50m, falla forzada	211
<i>Figura 102.</i> Desplazamientos bajo carga, separación de 3.00m, falla del experimento.....	212
<i>Figura 103.</i> Desplazamientos bajo carga, separación de 3.00m, falla forzada	213
<i>Figura 104.</i> Desplazamientos bajo carga, separación de 4.50m, falla del experimento.....	214
<i>Figura 105.</i> Desplazamientos bajo carga, separación de 4.50m, falla forzada	215
<i>Figura 106.</i> Desplazamientos bajo carga, separación de 6.00m, falla del experimento.....	216
<i>Figura 107.</i> Deformación de malla del modelo numérico a escala, 1.50m de separación..	219
<i>Figura 108.</i> Deformación del modelo numérico a escala bajo carga, 1.50m de separación	219
<i>Figura 109.</i> Flechas de desplazamiento del modelo numérico a escala 1.50, de separacion.	220
<i>Figura 110.</i> Deformación de malla del modelo numérico a escala, 3.00m de separación	221
<i>Figura 111.</i> Deformación del modelo numérico a escala bajo carga, 3.00m de separación	221
<i>Figura 112.</i> Flechas de desplazamiento total del modelo numérico a escala a 3.00 m.	222
<i>Figura 113.</i> Deformación de malla del modelo numérico a escala, 4.50m de separación	223
<i>Figura 114.</i> Deformación del modelo numérico a escala bajo carga, 4.50m de separación	223
<i>Figura 115.</i> Flechas de desplazamiento total del modelo numérico a escala a 4.50 m	224
<i>Figura 116.</i> Deformación de malla del modelo numérico a escala, 6.00m de separación	225
<i>Figura 117.</i> Deformación del modelo numérico a escala bajo, 6.00m de separación	225
<i>Figura 118.</i> Flechas de desplazamiento del modelo numérico a escala 6.00, de separacion	226

Índice de Gráficas.

Gráfica 1 Curva granulométrica, muestra S1.....	136
Gráfica 2 Curva Granulométrica S2	138
Gráfica 3 Curva Granulométrica S3	139
Gráfica 4 Límite líquido	142
Gráfica 5 Límite líquido	143
Gráfica 6 Límite líquido	144
Gráfica 7 Límite líquido	145
Gráfica 8. Carta de plasticidad SUCS, muestra S1.....	147
Gráfica 9 Diagrama de clasificación por el método SUCS, muestra S1.....	148
Gráfica 10 Carta de plasticidad AASHTO, muestra S1.....	149
Gráfica 11 Diagrama de clasificación por el método AASHTO, muestra 1.....	149
Gráfica 12 Carta de plasticidad SUCS, muestra S2.....	150
Gráfica 13 Diagrama de clasificación por el método SUCS, muestra S2.....	151
Gráfica 14 Carta de plasticidad AASHTO, muestra S2.....	152
Gráfica 15 Diagrama de clasificación por el método AASHTO, muestra S2	152
Gráfica 16 Carta de plasticidad SUCS, muestra S3.....	153
Gráfica 17 Diagrama de clasificación por el método SUCS, muestra S3.....	154
Gráfica 18 Carta de plasticidad AASHTO, muestra S3.....	155
Gráfica 19 Diagrama de clasificación por el método AASHTO, muestra S3	155
Gráfica 20 Carta de plasticidad SUCS, muestra S4.....	156
Gráfica 21 Diagrama de clasificación por el método SUCS, muestra S4.....	157
Gráfica 22 Carta de plasticidad AASHTO, muestra S4.....	158
Gráfica 23 Diagrama de clasificación por el método AASHTO, muestra S4	158
Gráfica 24 Gráfica de % de humedad VS Densidad seca.....	160
Gráfica 25 Gráfica esfuerzo deformación para 50kPa, 100kPa y 200kPa, ensayo húmedo.	163
Gráfica 26 Relación entre esfuerzos principales p vs q, según criterio de Mohr-Coulomb.	164
Gráfica 27 Envolvente de falla de Mohr-Coulomb	165
Gráfica 28 Obtención de parámetros a y b, para la curva hiperbólica.....	166
Gráfica 29 Regresión lineal	168
Gráfica 30 Calibración del modelo Hardening Soil para cada confinamiento.	169
Gráfica 31 Gráfica esfuerzo deformación para 50kPa, 100kPa y 200kPa, ensayo seco.....	170
Gráfica 32 Relación entre esfuerzos principales p vs q, según criterio de Mohr-Coulomb	171
Gráfica 33 Envolvente de falla de Mohr-Coulomb	172
Gráfica 34 Obtención de parámetros a y b, para la curva hiperbólica.....	173
Gráfica 35 Regresión Lineal	174
Gráfica 36 Obtención de parámetros a y b, para la curva hiperbólica.....	174
Gráfica 37 Calibración del modelo Hardening Soil , condición SECA.....	175
Gráfica 38 Curvas esfuerzo deformación, PLAXIS Soil test VS Curvas de E. triaxiales	177
Gráfica 39 Curvas esfuerzo deformación, PLAXIS Soil test VS Curvas de E. triaxiales	178
Gráfica 40 Curvas esfuerzo deformación valores, optimizado VS Curvas de E. triaxiales	180
Gráfica 41 Factor de seguridad para 1.50m de separación entre muros	192
Gráfica 42 Factor de seguridad para 3.00m de separación entre muros	193
Gráfica 43 Factor de seguridad para 4.50m de separación entre muros	194
Gráfica 44 Factor de seguridad para 6.00m de separación entre muros	195
Gráfica 45 Desplazamiento bajo carga para las diferentes separaciones entre muros.....	203

Gráfica 46	Desplazamientos de puntos de control bajo carga para 1.50m de separación	205
Gráfica 47	Desplazamientos de puntos de control bajo carga para 3.00m de separación	206
Gráfica 48	Desplazamientos de puntos de control bajo carga para 4.50m de separación	207
Gráfica 49	Desplazamientos de puntos de control bajo carga para 6.00m de separación	208
Gráfica 50	Deformación Vertical VS Carga, en la corona del talud por acción del equipo universal de compresión para las diferentes separaciones.	209
Gráfica 51	Deformación VS carga, en la corona del talud para las diferentes separaciones.....	218
Gráfica 52	Momentos flectores máximos en Pantalla de muros para diferentes separaciones.	228
Gráfica 53	Resultados de Factor de seguridad para las distintas separaciones	233
Gráfica 54	Resultados de Deformación por fases constructivas.....	235
Gráfica 55	Comparativa de desplazamientos, vector M3-1 para las distintas separaciones.....	238
Gráfica 56	Comparativa de desplazamientos, vector M2-1 para las distintas separaciones.....	239
Gráfica 57	Comparativa de desplazamientos, vector M1-1 para las distintas separaciones.....	239
Gráfica 58	Comparación de desplazamientos, modelo numérico y físico a escala reducida. ...	246

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1. Relación de Vacíos.....	21
Ecuación 2. Porosidad y volumen.....	22
Ecuación 3. Porosidad y relación de vacíos.....	23
Ecuación 4. Grado de Saturación.....	23
Ecuación 5. Contenido de Humedad.....	23
Ecuación 6. Peso específico húmedo	24
Ecuación 7. Peso específico seco	24
Ecuación 8. Peso específico húmedo y gravedad específica	25
Ecuación 9. Peso específico seco y gravedad específica	25
Ecuación 10. Relación “yd” y “y”	25
Ecuación 11. Densidad relativa.....	25
Ecuación 12. Esfuerzo cortante para suelos saturados y parcialmente saturados.....	27
Ecuación 13. Presión efectiva	28
Ecuación 14. Principio de equilibrio estático.....	42
Ecuación 15. Compatibilidad Cinemática.....	43
Ecuación 16. Comportamiento constitutivo del material.....	43
Ecuación 17. Matriz Constitutiva para un Material Elástico, Lineal e Isótropo	44
Ecuación 18. Ecuación de Equilibrio del Elemento Finito.	46
Ecuación 19. Ecuación de Equilibrio Global del Sistema	46
Ecuación 20. Aproximación Lineal del Desplazamiento para un elemento finito triangular.	47
Ecuación 21. Aproximación del Desplazamiento mediante Funciones de Forma.....	48
Ecuación 22. Relación Deformación-Desplazamiento para un elemento finito	48
Ecuación 23. Ecuación de la Matriz de Rigidez del Elemento	49
Ecuación 24. Ecuación de Equilibrio del Elemento Finito	49
Ecuación 25. Ecuación de Equilibrio Global del Sistema	49
Ecuación 26. Modelo Hiperbólico de Duncan.	55
Ecuación 27. Relación hiperbólica reducida.....	55
Ecuación 28. Factor de Falla (Rf) del modelo de Duncan y Chang.....	56
Ecuación 29. Corrección del parámetro "a", formulación de Janbu	57
Ecuación 30. Dependencia de la tensión con la rigidez del Suelo Eoed.....	59
Ecuación 31. Dependencia de la rigidez con el estado de esfuerzos, E50	59
Ecuación 32. Dependencia de la rigidez con el estado de esfuerzos, Eur.....	60
Ecuación 33. Relación entre Eur de ref. y E50 ref.....	60
Ecuación 34. E50 para presión de confinamiento de 1kPa	60
Ecuación 35. Ecuación general para calibración de modelo Hardening Soil	60
Ecuación 36. Esfuerzo de falla de Mohr-Coulomb.....	60
Ecuación 37. Reducción de parámetros mecánicos a través del Rinter	62
Ecuación 38. Espesor equivalente para creación de placas en Plaxis.....	63
Ecuación 39. Rigidez axial (EA).....	63
Ecuación 40. Rigidez a la flexión (EI)	63
Ecuación 41. Relación para escala geométrica.	70
Ecuación 42. Relación para escala cinemática o de tiempo.....	70
Ecuación 43. Relación para escala de densidad.....	71
Ecuación 44. % que pasa la malla #200.....	92

Ecuación 45. % Retenido por tamiz. Y % que pasa.....	93
Ecuación 46. Límite Plástico	96
Ecuación 47. Índice de Plasticidad.	96
Ecuación 48. Densidad seca.....	98
Ecuación 49. Cálculo de densidad mínima	99
Ecuación 50. Fuerza Calibrada	108
Ecuación 51. Deformación unitaria.	108
Ecuación 52. Área corregida.....	108

Lista de abreviaturas

AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
APV	Asociación Pro-Vivienda
ASTM	American Society for Testing and Materials
C.A.	Concreto Armado
CBR	California Bearing Ratio (Relación de Soporte de California)
CD	Consolidated Drained (Ensayo Triaxial Consolidado Drenado)
CH	Arcilla de alta plasticidad (Clasificación SUCS)
CU	Consolidated Undrained (Ensayo Triaxial Consolidado No Drenado)
DIC	Digital Image Correlation (Correlación de Imágenes Digitales)
EC-K0	Modelo constitutivo elástico con rigidez dependiente del estado de esfuerzos
FEM	Finite Element Method (Método de Elementos Finitos)
FLAC	Fast Lagrangian Analysis of Continua (Software de modelado geotécnico)
F.S.	Factor de Seguridad
GP-GM	Grava pobremente gradada con limo (Clasificación SUCS)
HKUST	Hong Kong University of Science and Technology
H.R.B.	Highway Research Board (Sistema de clasificación de suelos AASHTO)
HS	Hardening Soil (Modelo Constitutivo de Endurecimiento del Suelo)
ICPMG	International Conference on Physical Modelling in Geotechnics
IG	Índice de Grupo (Clasificación AASHTO)
ISSMGE	International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering
K-G	Modelo constitutivo elástico bilineal de Kondner-Gromko
MEF	Método de Elementos Finitos
MTC	Ministerio de Transportes y Comunicaciones
NATM	New Austrian Tunnelling Method (Nuevo Método Austriaco de Túneles)

NLT	Norma de Laboratorio de Transporte
NP	No Plástico
NTP	Norma Técnica Peruana
O.E.	Objetivo Específico (usado en la Matriz de Consistencia)
O.G.	Objetivo General (usado en la Matriz de Consistencia)
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
P.E.	Problema Específico (usado en la Matriz de Consistencia)
P.G.	Problema General (usado en la Matriz de Consistencia)
PSI	Pounds per Square Inch (Libras por pulgada cuadrada)
SC-SM	Arena arcillosa-limosa (Clasificación SUCS)
SEM	Sequential Excavation Method (Método de Excavación Secuencial)
SP-SM	Arena limosa pobremente gradada (Clasificación SUCS)
SRM	Strength Reduction Method (Método de Reducción de Resistencia)
SUCS	Sistema Unificado de Clasificación de Suelos
TBM	Tunnel Boring Machine (Máquina Perforadora de Túneles)
TC2	Comité Técnico 2 (de la ISSMGE)
UDEC	Universal Distinct Element Code (Software de modelado geotécnico)
UU	Unconsolidated Undrained (Ensayo Triaxial No Consolidado No Drenado)

RESUMEN

La presente investigación evaluó el efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, para determinar una distancia óptima que garantice independencia estructural y maximice la estabilidad global del talud en suelo areno-limoso

La metodología se basó en la modelación numérica (MEF) con PLAXIS, empleando el modelo constitutivo Hardening Soil (HS), para simular con precisión el comportamiento del suelo ante cargas. Se analizaron separaciones de 1.5 m a 6.0 m en un modelo prototipo a humedad óptima. Para la validación, se construyó un modelo físico a escala 1:30 en condición seca, contrastando su comportamiento con un modelo numérico a escala bajo las mismas condiciones.

El análisis de esfuerzos para muros de 4.0 m de altura definió la separación óptima en 6.0 m, estableciendo la relación fundamental $S \approx 1.5H$, la separación óptima es 1.5 veces la altura del muro. En esta configuración óptima, y en comparación con la separación mínima de 1.5 m, el Factor de Seguridad global se incrementó en 43.94%, la capacidad de carga última del sistema aumentó en 200%, y los desplazamientos en la corona, bajo una carga de servicio de 100 kN/m, se redujeron en 48.1%, concentrándose la deformación principalmente en el muro superior.

La consistencia entre los resultados experimentales y la simulación confirma la capacidad predictiva del modelo numérico desarrollado, validando los hallazgos del estudio. Se concluye que la separación es un factor de diseño crítico, proporcionando datos cuantificables para la construcción de sistemas de contención más eficientes.

Palabras clave: Muros escalonados, Plaxis, Modelo a escala, Estabilidad de taludes.

ABSTRACT

This research evaluated the effect of the spacing between stepped reinforced concrete walls on the slope's mechanical behavior, to determine an optimal distance that ensures structural independence and maximizes overall slope stability in sandy-silty soil.

The methodology was based on numerical modeling (FEM) with PLAXIS, using the Hardening Soil (HS) constitutive model to accurately simulate soil behavior under loads. Spacings of 1.5 m to 6.0 m were analyzed in a prototype model at optimal moisture content. For validation, a 1:30 scale physical model was constructed in dry conditions, comparing its behavior with a scaled numerical model under the same conditions.

Stress analysis for 4.0 m high walls defined the optimal spacing at 6.0 m, establishing the fundamental relationship $S \approx 1.5H$; the optimal spacing is 1.5 times the wall height. In this optimal configuration, and compared to the minimum spacing of 1.5 m, the overall Safety Factor increased by 43.94%, the system's ultimate load capacity increased by 200%, and displacements at the crown, under a service load of 100 kN/m, were reduced by 48.1%, with the deformation concentrated primarily in the upper wall.

The consistency between the experimental and simulation results confirms the predictive capacity of the developed numerical model, validating the study's findings. It is concluded that spacing is a critical design factor, providing quantifiable data for the construction of more efficient containment systems.

Keywords: Stepped walls, Plaxis, Scale model, Slope stability.

1. INTRODUCCIÓN

La expansión urbana en la geografía accidentada de Cusco presenta un desafío constante para la ingeniería civil, exigiendo soluciones que garanticen la seguridad de las infraestructuras en laderas y taludes. En este contexto, donde las intervenciones deben ser precisas y seguras, los muros de contención escalonados emergen como una solución de ingeniería superior, gracias a su adaptabilidad topográfica y a un menor impacto constructivo en zonas ya habitadas.

Sin embargo, la eficacia de este sistema de estabilización depende de una variable de diseño crítica y poco documentada: la separación entre los muros. Esta distancia determina si la estructura actúa como un conjunto de elementos independientes y eficientes, o como un sistema interconectado que puede comprometer la estabilidad global. Por ello, esta investigación se centra en responder una pregunta fundamental: ¿cómo influye la separación en el comportamiento mecánico del talud y cuál es la distancia óptima para maximizar el rendimiento del sistema?

Para aislar con precisión el efecto de esta variable, el alcance del estudio se delimitó intencionadamente a un único tipo de suelo, un areno-limoso altamente representativo de la geotecnia local de la formación San Sebastián, además de por sus características idóneas para material de experimentación en un modelo a escala debido a lo homogéneo de su composición. Esta restricción metodológica fue fundamental para eliminar la interferencia de otras variables y así poder cuantificar de manera inequívoca el impacto de la distancia en la respuesta estructural.

Para abordar esta interrogante, se empleó una metodología dual que combina la precisión de la modelación numérica avanzada (MEF) con la validación empírica de un modelo físico a escala. El objetivo final es establecer criterios de diseño claros y cuantificables que permitan optimizar el factor de seguridad, la capacidad de carga y los desplazamientos del sistema. De

este modo, la presente tesis busca proporcionar una referencia técnica robusta que contribuya a la construcción de infraestructuras de contención más seguras y resilientes en los complejos entornos topográficos de la región.

1.1. Planteamiento del problema

El crecimiento demográfico en las principales ciudades del Perú ha impulsado la construcción de viviendas en zonas de alto riesgo, como laderas o quebradas, debido a la falta de planificación urbana adecuada y la migración interna. Este fenómeno se refleja en los alrededores de la ciudad de Cusco, donde un aumento anual del 2% en la población ha llevado a la urbanización de áreas vulnerables.

En estas zonas, la propuesta de sistemas de estabilización debe ser especialmente cuidadosa, debido a que muchas viviendas ya están construidas, y cualquier intervención en el terreno puede generar riesgos adicionales. El corte para la construcción de muros elevados con zapatas extensas puede desestabilizar el talud y, en consecuencia, afectar viviendas aledañas, siendo necesario plantear diferentes sistemas de estabilización capaces de adaptarse a las condiciones expuestas. En este contexto, los muros escalonados emergen como una alternativa eficaz, segura y estética.

A pesar de su evidente potencial para abordar esta problemática, la escasez de bibliografía tanto a nivel local como nacional sobre el diseño y disposición adecuados de los muros escalonados representa una limitación significativa para los ingenieros. Esto dificulta la búsqueda de soluciones efectivas que mejoren la estabilidad del talud y reduzcan los riesgos estructurales. Si bien la teoría de Rankine se centra en el cálculo de la presión activa al analizar

el empuje del terreno contra el muro, no se ha investigado en condiciones específicas de muros escalonados. Además, la particularidad del estudio exige un análisis diferente.

Sin una solución adecuada, existe el riesgo de construir sistemas de contención ineficientes que comprometan la estabilidad del talud ante sollicitaciones externas. La falta de una separación adecuada entre muros escalonados puede resultar en un comportamiento interdependiente que incrementa la inestabilidad. Además, si se opta por muros adyacentes sin considerar adecuadamente la sobrecarga y la interacción entre ellos, se incrementa la posibilidad de falla estructural en el muro de contención.

Como respuesta a esta problemática, la presente investigación propone evaluar la influencia de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud. Este análisis permitirá determinar cómo una mayor separación entre los muros contribuye al mejor comportamiento mecánico del talud, además de identificar la distancia óptima que garantice un comportamiento independiente entre ellos para las condiciones específicas del caso estudiado. Esto no solo asegura una estabilidad óptima del talud, sino que también permite optimizar el diseño de un muro de contención al considerar un comportamiento independiente dentro de un sistema escalonado. La implementación de modelos numéricos y físicos, como los propuestos en esta investigación, proporcionará una solución técnica precisa, que servirá como referencia técnica para futuros proyectos que opten por este sistema de estabilización. Esto asegurará la construcción de un sistema de contención más seguro y eficiente, previniendo fallas estructurales, mejorando la estabilidad global del talud y optimizando el diseño para condiciones más exigentes.

Tabla 1*Tasa de crecimiento promedio anual, según provincia, 2007 – 2017 en Cusco*

Provincia	2007		2017		Variación intercensal 2007-2017		Tasa de crecimiento promedio anual
	Absoluto	%	Absoluto	%	Absoluto	%	
Total	1 171 403	100,0	1 205 527	100,0	34 124	2,9	0,3
Cusco	367 791	31,4	447 588	37,2	79 797	21,7	2,0
Acomayo	27 357	2,3	22 940	1,9	-4 417	-16,1	-1,7
Anta	54 828	4,7	56 206	4,7	1 378	2,5	0,2
Calca	65 407	5,6	63 155	5,2	-2 252	-3,4	-0,3
Canas	38 293	3,3	32 484	2,7	-5 809	-15,2	-1,6
Canchis	96 937	8,3	95 774	7,9	-1 163	-1,2	-0,1
Chumbivilcas	75 585	6,5	66 410	5,5	-9 175	-12,1	-1,3
Espinar	62 698	5,4	57 582	4,8	-5 116	-8,2	-0,8
La Convención	166 833	14,2	147 148	12,2	-19 685	-11,8	-1,2
Paruro	30 939	2,6	25 567	2,1	-5 372	-17,4	-1,9
Paucartambo	45 877	3,9	42 504	3,5	-3 373	-7,4	-0,8
Quispicanchi	82 173	7,0	87 430	7,3	5 257	6,4	0,6
Urubamba	56 685	4,8	60 739	5,0	4 054	7,2	0,7

Nota. Fuente: Adaptado de resultados definitivos-Cusco (p.24), por INEI (2018)

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

P.G: ¿De qué manera la separación entre los muros escalonados de concreto armado afecta en el comportamiento mecánico del talud en suelo areno-limoso, Cusco, 2024?

1.2.2. Problemas Específicos

PE1: ¿Cómo influye la separación entre los muros escalonados de concreto armado en el factor de seguridad global del talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024?

PE2: ¿Qué efecto tiene la separación entre muros escalonados de concreto armado sobre los desplazamientos generados por sobrecarga en el talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024?

PE3: ¿Qué efecto tiene la separación entre muros escalonados de concreto armado en la resistencia ante carga generada en la corona del talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024?

1.3. Justificación de la Investigación

El porqué de la investigación, el crecimiento urbano descontrolado en áreas vulnerables, como laderas o quebradas, exige soluciones efectivas de estabilización de taludes adaptadas al contexto local, evitando cortes bruscos que desestabilicen las viviendas aledañas. Los muros escalonados de concreto armado son una opción viable, pero la falta de estudios específicos sobre la aplicación de este sistema a nuestro contexto expone riesgos significativos.

Esta investigación se realiza con el propósito de evaluar la influencia de separación de muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, además de identificar una distancia óptima de separación entre muros escalonados de concreto armado que garantice un comportamiento mecánico independiente de cada muro. El desarrollo del estudio es importante porque ofrece un marco de referencia técnico aplicable a casos reales previa evaluación particular de cada proyecto, optando por estabilizar el talud mediante separación entre muros y en caso se prevea una influencia mutua de las cargas, se busca desarrollar un diseño que mitigue sus efectos, asegurando así la seguridad estructural y la integridad del talud en áreas vulnerables.

Por otra parte, se sabe que los fenómenos geotécnicos son complejos y difíciles de predecir, por lo que es necesario recurrir a la modelización numérica. Los modelos constitutivos son una herramienta valiosa para recrear las condiciones del suelo y predecir comportamientos geotécnicos. Sin embargo, estos modelos dependen de simplificaciones y supuestos que, si bien son útiles, no siempre capturan con fidelidad la realidad física. En este contexto, el uso de

modelos físicos a escala surge como una herramienta clave, permitiendo la evaluación experimental de problemas geotécnicos mediante la aplicación de las leyes de similitud.

Para este proyecto, se propone el uso de modelos a escala en taludes con muros de contención escalonados, considerando la similitud geométrica, cinemática y dinámica. Este enfoque permitirá realizar una primera aproximación experimental del comportamiento del talud bajo condiciones controladas, abriendo además una nueva vía de investigación en la modelación física dentro de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC), incentivando estudios más detallados en el futuro.

La relevancia de esta investigación es evidente en el contexto de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente en los siguientes:

ODS 9: Industria, innovación e infraestructura: La presente investigación expone el uso de una solución adaptada a una problemática real, brindando información para el correcto entendimiento del fenómeno geotécnico gracias a los puntos estudiados en este trabajo. De esta forma, se posiciona como una solución efectiva para la construcción de sistemas de contención más eficientes en zonas vulnerables, promoviendo prácticas de ingeniería sostenibles y contribuyendo a la creación de infraestructuras más seguras y resilientes.

ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles: Este objetivo se centra en hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles.

Esta investigación contribuye al ODS al aportar conocimiento para mejorar la estabilidad de taludes en zonas vulnerables. Además, el uso del sistema de muros escalonados favorece la planificación urbana sostenible y contribuye a crear comunidades más resilientes frente a desastres naturales.

ODS 13: Acción por el clima: Esta investigación también contribuye a la adaptación frente a los efectos del cambio climático al proponer un sistema de contención que previene cualquier desprendimiento de talud causado por precipitaciones pluviales intensas o eventos naturales. Esto garantiza una mayor estabilidad del terreno en zonas vulnerables, mejorando la resiliencia ante fenómenos climáticos extremos.

Además, la implementación de estas soluciones contribuirá indirectamente al **ODS 1: Fin de la pobreza**, al reducir la vulnerabilidad de las familias que habitan en estas zonas y al asegurar que tengan un hogar seguro y estable, lo que es fundamental para mejorar su calidad de vida.

1.3.1. Justificación por conveniencia

La conveniencia de esta investigación radica en su potencial para aportar soluciones efectivas en la estabilización de taludes en zonas urbanizadas de alto riesgo. Con la expansión urbana en áreas vulnerables, es crucial desarrollar criterios técnicos que permitan la construcción segura de estructuras de contención, como los muros escalonados, los cuales son una alternativa eficaz para minimizar los riesgos en viviendas aledañas ante prominentes cortes de talud. Estos muros, al estar diseñados con una separación y disposición óptimas, ofrecen estabilidad adicional y se adaptan mejor a las condiciones del terreno, lo que resulta fundamental en la protección de las infraestructuras y comunidades en estas áreas.

El análisis de la influencia de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, brindará un marco de referencia sólido para su implementación adecuada.

1.3.2. Justificación por relevancia social

La relevancia social de esta investigación es significativa, ya que aborda un problema crítico en zonas urbanas de rápido crecimiento, donde la construcción en áreas inestables pone en riesgo tanto a las viviendas como a las familias que las habitan.

Los principales beneficiarios serán los residentes de estas áreas, quienes verán reducida la posibilidad de que sus viviendas se vean afectadas por la inestabilidad del terreno. Asimismo, los ingenieros proyectistas contarán con un marco técnico más sólido para desarrollar proyectos seguros y sostenibles en terrenos complejos, contribuyendo a mejorar la calidad de vida de las personas y a garantizar la seguridad de las zonas urbanas en expansión. El uso de este sistema, a su vez, promoverá un desarrollo urbano más ordenado y resiliente.

1.3.3. Justificación por implicancias prácticas

La investigación tiene implicaciones prácticas relevantes, ya que contribuye a la solución de problemas reales relacionados con la estabilidad de taludes en zonas urbanas vulnerables. Al evaluar la influencia de la separación entre muros escalonados, se ha identificado una distancia óptima de referencia que puede guiar el diseño de sistemas de contención más seguros. No obstante, se reconoce que en proyectos reales las condiciones pueden variar, y en muchos casos será necesario adaptar la separación según las restricciones del terreno o del proyecto. En tales situaciones, los resultados de esta investigación ofrecen una base técnica que permitirá anticipar los efectos de la interacción entre muros y diseñar soluciones estructurales eficientes.

Además, esta investigación generará un marco de referencia aplicable a otros contextos similares en Cusco y otras regiones con características parecidas. Esto facilitará el diseño y ejecución de proyectos de estabilización de taludes en terrenos, mejorando la estabilidad en áreas urbanas vulnerables y brindando soluciones prácticas para la expansión urbana segura. Además,

esta investigación constituye un punto de partida para establecer criterios normativos en el diseño y disposición de muros escalonados bajo diversas condiciones generales. Esto será posible si se extiende el estudio mediante ensayos en centrífuga, evaluando la variación de las dimensiones de los muros para distintas condiciones del suelo. De esta manera, se podrían desarrollar guías técnicas más precisas y aplicables a escenarios generales.

1.3.4. Justificación por viabilidad

La viabilidad de esta investigación es alta, ya que los investigadores cuentan con acceso libre al lugar donde se extraerán las muestras de suelo para clasificación y ensayos especiales, lo que facilita la recolección de datos iniciales.

En cuanto a los recursos físicos, se cuenta con un espacio de experimentación, el cual será adaptado para el desarrollo del modelo físico a escala, garantizando condiciones controladas y replicables durante los ensayos. Asimismo, la universidad dispone de un laboratorio de mecánica de suelos debidamente equipado para los ensayos (clasificación del suelo, Proctor modificado y triaxial UU, entre otros), asegurando la calidad y confiabilidad de los datos obtenidos.

Por otro lado, el presupuesto asignado es suficiente para cubrir los costos asociados a los materiales, herramientas y construcción del modelo a escala.

1.3.5. Justificación por valor teórico

La investigación llenará un vacío de conocimiento significativo en el ámbito de la estabilización de taludes mediante el uso de muros escalonados de concreto armado.

Actualmente, existe escasa bibliografía específica sobre cómo la separación entre estos muros influye en el comportamiento mecánico del talud, lo que limita la comprensión sobre este fenómeno, impidiendo brindar soluciones claras respaldadas por un estudio.

Al analizar esta variable, se espera obtener resultados que puedan generalizarse a principios más amplios, aplicables a otras áreas con condiciones similares. Los hallazgos permitirán desarrollar nuevas pautas teóricas sobre la interacción entre muros escalonados para las condiciones geométricas y tipo de suelo estudiadas, pero no podrá englobar todos los casos particulares de tipo de suelo o geometrías de muros de contención.

Además, esta investigación ofrecerá un conocimiento más profundo sobre la relación entre la separación de muros escalonados y la estabilidad del terreno, aportando datos que antes no se conocían en el contexto local. Esto no solo permitirá explorar de manera fructífera el fenómeno en ambientes urbanos vulnerables, sino que también se podrán sugerir ideas, recomendaciones y líneas para futuros estudios que profundicen en variaciones de diseño o en el uso de otros materiales de construcción en terrenos similares.

En resumen, la investigación no solo generará un aporte teórico significativo, sino que también sentará las bases para la formulación de hipótesis y modelos que podrán aplicarse en otras investigaciones y proyectos de ingeniería civil.

1.3.6. Justificación por unidad metodológica

Esta investigación contribuirá al desarrollo y perfeccionamiento de métodos para recolectar y analizar datos sobre un fenómeno geotécnico mediante el uso de modelos físicos a escala reducida y formatos de recolección de datos. Al emplear estos modelos, se podrán experimentar de forma controlada las variables de estudio, como la separación entre muros escalonados y su impacto en el comportamiento mecánico del talud en suelos areno-limosos. Esto permitirá obtener datos empíricos que mejorarán la comprensión de la interacción entre las estructuras y el suelo.

El enfoque metodológico de utilizar modelos físicos a escala, complementado con simulaciones numéricas, proporcionará un instrumento sólido para evaluar y definir las relaciones entre las variables en condiciones reales. Además, la investigación contribuirá a la definición entre variables, estableciendo una dependencia entre la separación de muros escalonados y cómo afecta al comportamiento mecánico del talud.

A través de esta metodología, se busca no solo mejorar la forma en que se experimenta sobre fenómenos geotécnicos, sino también establecer un marco que permita un análisis más riguroso y adaptable a diferentes condiciones para futuras investigaciones.

1.4. Objetivos de la Investigación

1.4.1. Objetivo General

OG: Determinar la influencia de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud en suelo areno-limoso, a fin de establecer una distancia óptima entre muros donde se comporten independientemente, Cusco, 2024.

1.4.2. Objetivos Específicos

OE1: Determinar cómo la distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado influye en el factor de seguridad global del talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024

OE2: Determinar cómo la distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado influye en los desplazamientos generados por sobrecarga en talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024

OE3: Determinar cómo la distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado influye en la capacidad ante carga generado en la corona del talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024

1.5. Delimitación de la investigación

1.5.1. Delimitación espacial

La investigación se llevará a cabo en la ciudad de Cusco, Perú, iniciando con una primera fase de recolección de datos en campo, en la cual se procederá a la caracterización del talud ubicado en el Pasaje Mirador, perteneciente a la Asociación Pro-Vivienda Diego Quispe Tito, en el distrito de San Sebastián. En este sector, se identificaron distintos estratos del terreno, y se seleccionó específicamente el estrato de suelo areno-limoso como base para el estudio.

Además, se utilizarán las instalaciones del laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco para realizar los diferentes ensayos de laboratorio y la experimentación con el modelo físico a escala adaptada al equipo universal.

1.5.2. Delimitación temporal

El estudio abarca el periodo comprendido entre el año 2024 y principios de 2025, tiempo en el cual se realizarán tanto la modelación numérica como la construcción y pruebas del modelo físico a escala. Durante este tiempo, se analizarán los comportamientos del talud bajo diferentes distancias de separación entre muros escalonados de concreto armado.

1.5.3. Delimitación conceptual.

El estudio se centra únicamente en el análisis del comportamiento bajo condiciones estáticas. Se utilizarán modelos físicos a escala y modelos numéricos para realizar la comparación y validación de los resultados. NO se incluirán estudios del comportamiento bajo

cargas dinámicas y, respecto al modelo a escala, solo se analizarán efectos producto de la carga ejercida.

La investigación se enmarca en un caso de estudio idealizado, diseñado para aislar y explicar un fenómeno geotécnico específico. Para lograr esto, las variables se han restringido deliberadamente:

Geometría: No se pretende modificar el diseño interno de los muros. Se adaptará un único pre-dimensionamiento Das (2012). para una configuración de 3 escalones, manteniendo la proporcionalidad constante, 4 metros de alto para el caso base y un análisis complementario de 6.0 y 8.0 metros de alto.

Material: Se emplea un solo tipo de suelo homogéneo. Este material se analiza en dos condiciones específicas y controladas que responden a los objetivos de la tesis:

- Condición Seca: Se utiliza para la validación experimental en el modelo físico a escala, permitiendo aislar la respuesta mecánica pura del sistema.
- Condición Parcialmente Saturada (Humedad Óptima): Se utiliza para el análisis del prototipo a escala real, representando un escenario post-constructivo a corto plazo más realista.

Este enfoque permite reducir la complejidad y centrar el análisis exclusivamente en la influencia de la separación entre muros.

2. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. ANTECEDENTES EMPÍRICOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1.1. Antecedente local

Muñoz y Merma (2023) realizaron un análisis comparativo entre dos soluciones de contención convencionales, muros de gaviones y muros en voladizo de concreto armado, para estabilizar un talud específico en el distrito de Santiago, Cusco. El estudio se centra principalmente en evaluar y contrastar los costos, el tiempo de ejecución y el alcance de cada alternativa.

El principal aporte de este estudio es que establece un antecedente local sobre el uso de muros de concreto armado como solución de ingeniería en la región de Cusco. Al haberse enfocado en una estructura monolítica convencional, dicho trabajo permite resaltar la novedad de la presente investigación, posicionando el análisis de muros escalonados y el efecto de su separación como un campo de estudio necesario y no abordado en el contexto local.

Por su parte, Huallpa (2019) investigó los factores geotécnicos que causan inestabilidad en la ladera de la quebrada de Qolcohuaycco en Cusco. La metodología se basó en la obtención de parámetros como cohesión, ángulo de fricción y permeabilidad, para luego evaluar la estabilidad con el programa Slide V-5.0 en condiciones naturales y saturadas. La investigación comprobó que el tipo de suelo y la permeabilidad son los factores geotécnicos más incidentes en la inestabilidad de la ladera, y que la disminución de la resistencia por saturación y la erosión pluvial reducen el factor de seguridad, demostrando el potencial de deslizamiento de la zona.

El estudio de Huallpa (2019) cobra especial importancia para la presente investigación al constituir una referencia local, directa y fundamental. Al tratarse de un análisis realizado en una zona geográficamente cercana y con condiciones de suelo areno-limoso similares a las del

material empleado en este trabajo, los parámetros que identifica, como la permeabilidad, la cohesión y el ángulo de fricción proporcionan valores de referencia para este trabajo.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

En el ámbito nacional, Blas (2023) realizó una investigación para estabilizar un talud en Huaraz, comparando los factores de seguridad del talud natural y el estabilizado mediante análisis numéricos con el software Slide y, de forma paralela, a través de modelos físicos a escala. Tras realizar la caracterización geotécnica del suelo para obtener parámetros como cohesión y ángulo de fricción, el análisis numérico reveló un aumento en el factor de seguridad del 28.33% en el tramo más crítico, pasando de 0.86 a 1.20 tras la estabilización.

El estudio de Blas (2023) es de particular relevancia para la investigación actual debido a su detallada explicación sobre la construcción de un modelo experimental a escala. El enfoque en el escalamiento geométrico, la similitud de densidad y la adaptación del modelo a un equipo CBR para controlar la carga de falla son referencias metodológicas valiosas. Resulta interesante que, si bien se validó la mejora del talud, el estudio no compara los resultados del modelo físico con un análisis de elementos finitos como Plaxis, lo cual sirve como referencia para entender el comportamiento del talud ante carga y validar los resultados de un modelo numérico.

Mamani y Rivera (2018) analizaron y modelaron un muro de contención de concreto armado proyectado para ser construido sobre una falla geológica en la carretera departamental HV-101 en Huancavelica. Para este análisis, que buscaba dar solución a los constantes deslizamientos en la zona, se utilizó el software Plaxis 2D con parámetros obtenidos de ensayos de mecánica de suelos

La metodología propuesta por Mamani y Rivera (2018) es útil para el presente estudio, ya que el uso de modelos numéricos con Plaxis 2D permite comparar y validar los modelos físicos a

escala. Su enfoque, que además resalta la importancia de los ensayos de suelos para cumplir con la norma CE.020, guía y estructura esta investigación al proporcionar una base metodológica sólida.

Por otro lado, la investigación de Cahuana y Yanqui (2019) se enfocó en el comportamiento del empuje activo, analizando experimentalmente la distribución de la presión lateral de un suelo granular sobre un muro de contención rígido sometido a movimientos de traslación y rotación. El estudio concluyó que la distribución de la presión varía según la densidad del relleno: es lineal para suelos sueltos, coincidiendo con las teorías de Rankine y Coulomb, pero no lineal para suelos densos, donde se observan dos picos de presión.

El aporte del estudio de Cahuana y Yanqui (2019) a esta tesis es fundamental en dos áreas clave. En primer lugar, justifica teóricamente la necesidad de emplear herramientas de análisis numérico, al evidenciar experimentalmente que los modelos clásicos son insuficientes para predecir el comportamiento de suelos con mayor compacidad. En segundo lugar, su metodología valida un principio crucial adoptado en nuestro propio modelo físico: la importancia de preparar un relleno de suelo homogéneo y reproducible para garantizar la consistencia y fiabilidad de los resultados. De esta manera, el trabajo de Cahuana y Yanqui proporciona el fundamento conceptual para que la presente investigación avance hacia un problema de mayor complejidad, como son un sistema de muros escalonados.

Finalmente, Chirinos (2017) desarrolló el diseño geotécnico para un tramo del túnel de la Línea 2 del Metro de Lima, utilizando el software Plaxis 2D y 3D para analizar el comportamiento del suelo frente a distintas metodologías constructivas como NATM/SEM y TBM. Sus conclusiones se centraron en la eficiencia y seguridad de la sección circular del túnel y las ventajas económicas de ciertos métodos de sostenimiento. La relevancia de esta tesis para la

investigación actual radica en su correcta aplicación de Plaxis y el uso de modelos constitutivos, lo que ofrece un marco metodológico robusto para el análisis computacional. El enfoque de Chirinos en la parametrización precisa del terreno es un recurso clave que puede emplearse para mejorar la precisión y eficiencia de las simulaciones numéricas en la evaluación de la estabilidad de los muros escalonados en este estudio.

2.1.3. Antecedente internacional

La investigación de (Romero, Pacheco y Becharra, 2007) analizó el comportamiento de un muro de gravedad a través de un modelo físico a escala reducida. En su estudio, observaron que la superficie de falla generada en el relleno se asemejaba a la cuña teórica de Rankine y que la imposición de una presión pasiva ayudaba a estabilizar el muro. Para lograrlo, aplicaron leyes de similitud geométrica, cinemática y dinámica, con el fin de poder extrapolar los resultados del modelo al prototipo real.

El trabajo de Romero et al. (2007) es altamente relevante, ya que proporciona un marco práctico sobre el uso de modelos físicos a escala. La aplicación de las leyes de similitud y el uso de vectores de desplazamiento para identificar las zonas de mayor movimiento son metodologías de referencia para evaluar la interacción de los muros escalonados. Asimismo, las recomendaciones sobre la selección de materiales equivalentes, como el uso de yeso para simular concreto, son directamente aplicables en el desarrollo de los experimentos de la investigación actual.

Por otra parte, Barrera (2014) demostró la efectividad de los taludes escalonados para la estabilización y el control de la erosión. Mediante una combinación de modelos numéricos (Slide 5.0) y un modelo físico a escala con un simulador de lluvia, confirmó que la configuración

escalonada aumenta el factor de seguridad y reduce drásticamente el escurrimiento y la erosión en comparación con un talud de pendiente constante.

Este trabajo constituye un antecedente internacional de gran relevancia por su enfoque metodológico. Al igual que en la presente tesis, Barrera (2014) combina la modelación numérica con la construcción de un modelo físico a escala, reforzando la solidez de esta estrategia dual de investigación. Adicionalmente, su estudio es un claro ejemplo de cómo en este tipo de investigaciones, ante la dificultad de definir una "población y muestra" en términos estadísticos, el rigor se centra en la selección y caracterización exhaustiva de un material de estudio bajo condiciones específicas de estudio, que se convierte en la base para todo el análisis.

Finalmente, Gomez (2011) se centró en la iniciación de la modelación física de un muro de contención con geoceldas para ser ensayado en una centrífuga geotécnica. La investigación se enfocó en la caracterización y el escalamiento de las propiedades de las geoceldas para desarrollar un modelo a escala que simulará el comportamiento del prototipo real, concluyendo que estas mejoran sustancialmente la resistencia y rigidez del suelo al generar un confinamiento efectivo.

Si bien este trabajo no representa un aporte directo al utilizar una metodología de centrífuga, resulta valioso como referencia metodológica para el escalamiento de materiales. El proceso detallado para ajustar las propiedades de los materiales a fin de representar fielmente las condiciones reales puede aplicarse en la investigación actual, garantizando que el modelo físico simule con precisión el comportamiento de los muros de contención.

2.2. Bases Teóricas.

2.2.1. Definición Conceptual.

2.2.1.1. *Propiedades Geotécnicas del Suelo.*

Relación de peso-volumen.

En la naturaleza los suelos son sistemas de tres fases que consisten en partículas de suelo sólidas, agua y aire (o gas). Para desarrollar las relaciones peso-volumen para un sólido, las tres fases se pueden separar como se muestra en la figura 1. Con base en esta separación, se pueden definir las relaciones del volumen (Das, 2012, p.5).

La relación de vacíos, e , es la relación del volumen de vacíos al volumen de sólidos de un suelo en una masa de suelo dada (Das, 2012, p.5):

Ecuación 1. Relación de vacíos.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (1)$$

Donde:

V_v = volumen de vacíos

V_s = volumen de sólidos del suelo

Se presenta las relaciones peso volumen:

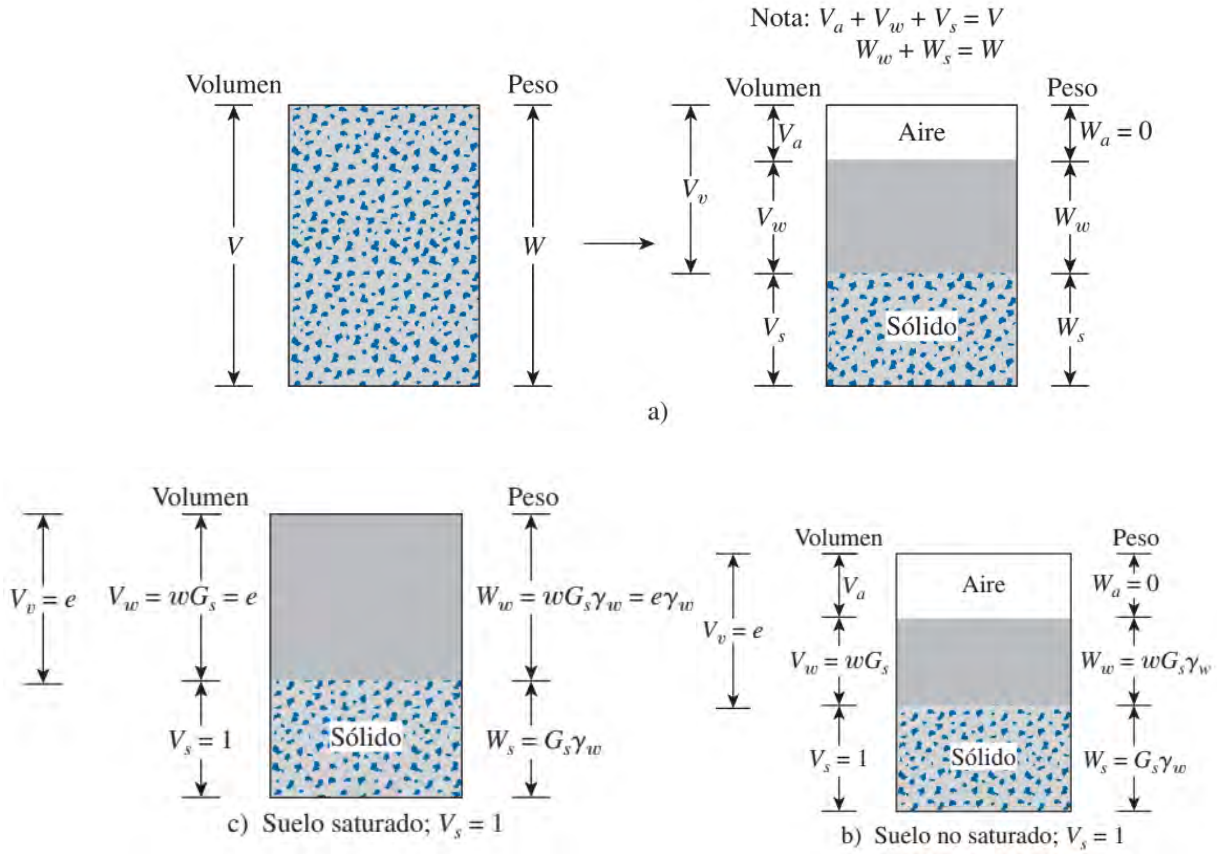


Figura 1. Relaciones peso volumen

Nota. Adaptado de Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica (p. 6), por Braja Das, 2014, CENGAGE learning

La porosidad, n , es la relación del volumen de vacíos entre el volumen de la muestra de suelo (Das, 2012, p.6):

Ecuación 2. Porosidad y volumen.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2)$$

Donde:

V = volumen total de suelo

Además:

Ecuación 3. Porosidad y relación de vacíos

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_s + V_v} = \frac{\frac{V_v}{V_s}}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_v}{V_s}} = \frac{e}{1 + e} \quad (3)$$

El grado de saturación, S, es la relación del volumen de agua en los espacios vacíos entre el volumen de vacíos, que en general se expresa como un porcentaje (Das, 2012, p.7):

Ecuación 4. Grado de Saturación.

$$S(\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \quad (4)$$

donde

V_w = volumen de agua

Observe que, para suelos saturados, el grado de saturación es 100%.

Las relaciones de peso son el contenido de humedad, el peso específico húmedo, el peso específico seco y el peso específico saturado, que con frecuencia se definen como sigue (Das, 2012, p.7):

Ecuación 5. Contenido de Humedad

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \quad (5)$$

donde

W_s = peso de los sólidos del suelo

W_w = peso del agua

Ecuación 6. Peso específico húmedo

$$\gamma = \frac{W}{V} \quad (6)$$

donde

W = peso total de la muestra de suelo = $W_s + W_w$

Ecuación 7. Peso específico seco

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (7)$$

Cuando una masa de suelo está completamente saturada (es decir, todo el volumen de vacíos está ocupado por agua), el peso específico húmedo de un suelo resulta igual al peso específico saturado (γ_{sat}). Por lo tanto. $\gamma = \gamma_{sat}$ si $V_v = V_w$ (Das, 2012, p.7).

Ahora, se pueden desarrollar más relaciones útiles considerando una muestra representativa de suelo en la que el volumen de sólidos de suelo es igual a la unidad, como se muestra en la figura. Observe que si $V_s = 1$, entonces, de la **Ecuación 1**. $V_v = e$, y el peso de los sólidos del suelo es (Das, 2012, p.7):

$$W = G_s \gamma_w$$

Donde

G_s = gravedad específica de los sólidos del suelo

γ_w = Peso específico del agua (9.81 kN/m³)

Además, de la **Ecuación 5: Contenido de Humedad**, el peso del agua es $W_w = wW_s$. Por lo que, para la muestra de suelo bajo consideración, $W_w = wW_s = wG_s\gamma_w s$. Ahora, para la relación general para el peso específico húmedo dado en la **Ecuación 6**. (Das, 2012, p.8)

Ecuación 8. *Peso específico húmedo y gravedad específica*

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{G_s \gamma_w (1 + w)}{1 + e} \quad (8)$$

De manera similar, el peso específico seco que se muestra en la **Ecuación 7**, peso específico seco es:

Ecuación 9. *Peso específico seco y gravedad específica*

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{W_s}{V_s + V_v} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \quad (9)$$

De las ecuaciones **Ecuación 8:** Peso específico húmedo y gravedad específica **Ecuación 9:** Peso específico seco y gravedad específica observe que:

Ecuación 10. *Relación “ γ_d ” y “ γ ”*

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w} \quad (10)$$

De acuerdo con la **Ecuación 4:** Grado de saturación

$$S = \frac{V_w}{V_v}$$

Densidad Relativa:

En suelos granulares, el grado de compactación en el campo se puede medir de acuerdo con la densidad relativa, definida como.

Ecuación 11. *Densidad relativa*

$$D_r(\%) = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 \quad (11)$$

Donde:

e_{max} = Relación de vacíos del suelo en el estado más suelto

e_{min} = Relación de vacíos en el estado más denso

e = Relación de vacíos in situ

La densidad de un suelo granular está relacionada a veces con la densidad relativa del suelo. En la tabla 1.5 se da la correlación general de la densidad y Dr. Para arenas naturales, las magnitudes de e_{max} y e_{min} , pueden variar ampliamente. Las razones principales de estas variaciones amplias son el coeficiente de uniformidad, C_u , y la redondez de las partículas. (Das, 2012, p.10)

Tabla 2
Densidad de un suelo granular.

Densidad Relativa, Dr. (%)	Descripción
0-20	Muy suelto
20-40	Suelto
40-60	Medio
60-80	Denso
80-100	Muy denso

Nota. Adaptado de Fundamentos de la Ingeniería Geotécnica (p. 11), por Braja Das, 2012, CENGAGE learning

2.2.1.2. *Esfuerzo y resistencia a la cortante.*

La modelación o representación matemática del fenómeno de falla al cortante en un deslizamiento se realiza utilizando las teorías de la resistencia de materiales. Las rocas y los suelos al fallar al corte se comportan de acuerdo a las teorías tradicionales de fricción y cohesión, según la ecuación generalizada de Coulomb. Ec. para suelos saturados, Ec. para suelos parcialmente saturados. (Suarez, 1998, p.81)

Ecuación 12. *Esfuerzo cortante para suelos saturados y parcialmente saturados*

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \varphi' \quad (12)$$

$$\tau = c' + (\sigma - \mu) \tan \varphi' + (\mu - \mu_a) \tan \varphi'$$

Donde:

τ = Esfuerzo de resistencia al corte

c' = Cohesión o cementación efectiva

σ = Esfuerzo normal total

μ = Presión del agua intersticial o de poros

μ_a = Presión del aire intersticial

φ' = Ángulo de fricción interna del material

φ'' = Ángulo de fricción del material no saturado

El análisis de la ecuación de Coulomb requiere predefinir los parámetros, ángulo de fricción y cohesión, los cuales se consideran como propiedades intrínsecas del suelo. La presencia del agua reduce el valor de la resistencia del suelo dependiendo de las presiones internas o de poros de acuerdo a la ecuación de Coulomb, en la cual el factor u está restando al valor de la presión normal. La presión resultante se conoce con el nombre de presión efectiva σ' . (Suarez, 1998, p.81)

Ecuación 13. Presión efectiva

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (13)$$

σ' = Presión efectiva

σ = Esfuerzo normal total

μ = Presión del agua intersticial o de poros

Ángulo de Fricción. El ángulo de fricción. Suarez (1998) afirma que “Es la representación matemática del coeficiente de rozamiento, el cual es un concepto básico de la física” (p.81): Derivado de la **Ecuación 12**.

$$\text{Coeficiente de rozamiento} = \text{Tan } \varphi. \quad (14)$$

El ángulo de fricción depende de varios factores entre ellos algunos de los más importantes son el tamaño de los granos, forma de los granos, la distribución de los tamaños de granos y densidad (Suarez, 1998, p.82).

Cohesión. La cohesión es una medida de la cementación o adherencia entre las partículas de suelo. La cohesión en mecánica de suelos es utilizada para representar la resistencia al cortante producida por la cementación, mientras que en la física este término se utiliza para representar la tensión. En suelos eminentemente granulares en los cuales no existe ningún tipo de cementante o material que pueda producir adherencia, la cohesión se supone igual a 0 y a estos suelos se les denomina Suelos no Cohesivos (Suarez, 1998, p.81).

Cohesión aparente. En los suelos no saturados el agua en los poros produce un fenómeno de adherencia por presión negativa o fuerzas capilares. Esta cohesión aparente desaparece con la saturación. El fenómeno de cohesión aparente se estudia a profundidad en el capítulo. (Suarez, 1998, p.82)

Concepto de esfuerzo efectivo.

Una masa de suelo saturada consiste de dos fases distintas: el esqueleto de partículas y los poros entre partículas llenos de agua. Cualquier esfuerzo impuesto sobre el suelo es soportado por el esqueleto de partículas y la presión en el agua. Típicamente, el esqueleto puede transmitir esfuerzos normales y de corte por los puntos de contacto entre partículas y el agua a su vez puede ejercer una presión hidrostática, la cual es igual en todas las direcciones. Los esfuerzos ejercidos por el esqueleto solamente, se conocen como esfuerzos efectivos y los esfuerzos hidrostáticos del agua se les denomina presión de poros. Los esfuerzos efectivos son los que controlan el comportamiento del suelo y no los esfuerzos totales. En problemas prácticos el análisis con esfuerzos totales podría utilizarse en problemas de estabilidad a corto plazo y las presiones efectivas para analizar la estabilidad a largo plazo. (Suarez, 1998, p.82)

Desde el punto de vista de la relación esfuerzo – deformación, en estabilidad de taludes se deben tener en cuenta dos tipos de resistencia:

Resistencia máxima o resistencia pico: Es la resistencia a la corte máxima que posee el material que no ha sido fallado previamente, la cual corresponde al punto más alto en la curva esfuerzo - deformación. La utilización de la resistencia pico en el análisis de estabilidad asume que la resistencia pico se obtiene simultáneamente a lo largo de toda la superficie de falla. Sin embargo, algunos puntos en la superficie de falla han alcanzado deformaciones mayores que otros, en un fenómeno de falla progresiva y asumir que la resistencia pico actúa simultáneamente en toda la superficie de falla puede producir errores en el análisis. (Suarez, 1998, p.82)

Resistencia residual: Es la resistencia al corte que posee el material después de haber ocurrido la falla. Skempton (1964) observó que, en arcillas sobre consolidadas, la resistencia calculada del análisis de deslizamientos después de ocurridos, correspondía al valor de la resistencia residual y recomendó utilizar para el cálculo de factores de seguridad, los valores de

los parámetros obtenidos para la resistencia residual ϕ_r y c_r . Sin embargo, en los suelos residuales la resistencia pico tiende a ser generalmente, muy similar a la resistencia residual. Otro factor que determina las diferencias entre la resistencia pico y residual es la sensibilidad, la cual está relacionada con la pérdida de resistencia por el remoldeo o la reorientación de las partículas de arcilla. (Suarez, 1998, p.83)

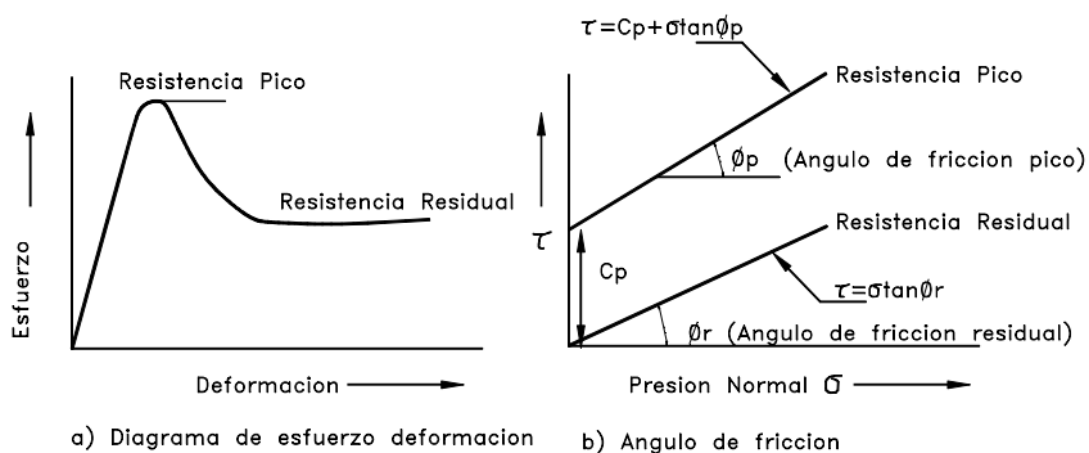


Figura 2. Resistencia pico y residual

Nota. Adaptado de Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales (p. 83), por Suarez J., 1998,

Círculo de Mohr

En un análisis en dos dimensiones, los esfuerzos en un punto pueden ser representados por un elemento infinitamente pequeño sometido a los esfuerzos σ_x , σ_y , y τ_{xy} . Si estos esfuerzos se dibujan en unas coordenadas $\tau - \sigma$, se puede trazar el círculo de Esfuerzos de Mohr. En este círculo se definen los valores de σ máximo (σ_1) y σ mínimo (σ_3), conocidos como Esfuerzos principales. Para interpretar correctamente el fenómeno de falla al cortante en un talud debe tenerse en cuenta cuál es la dirección de los esfuerzos principales en cada sitio de la superficie de falla. El esfuerzo σ_1 es vertical en la parte superior de la falla y horizontal en la parte inferior. (Suarez, 1998, p.85)

Envolvente de Falla.

El círculo de Mohr se utiliza para representar o describir la resistencia al cortante de los suelos, utilizando la envolvente de falla Mohr – Coulomb, lo cual equivale a que una combinación crítica de esfuerzos se ha alcanzado. Los esfuerzos por encima de la envolvente de falla no pueden existir. (Suarez, 1998, p.85)

Suarez (1998), afirma: “En la práctica normal de Ingeniería, generalmente, esta curva se define como una recta aproximada dentro de un rango seleccionado de esfuerzos” (p.85), en el cual. Según **Ecuación 12**:

$$s = c' + \sigma' \tan \phi'$$

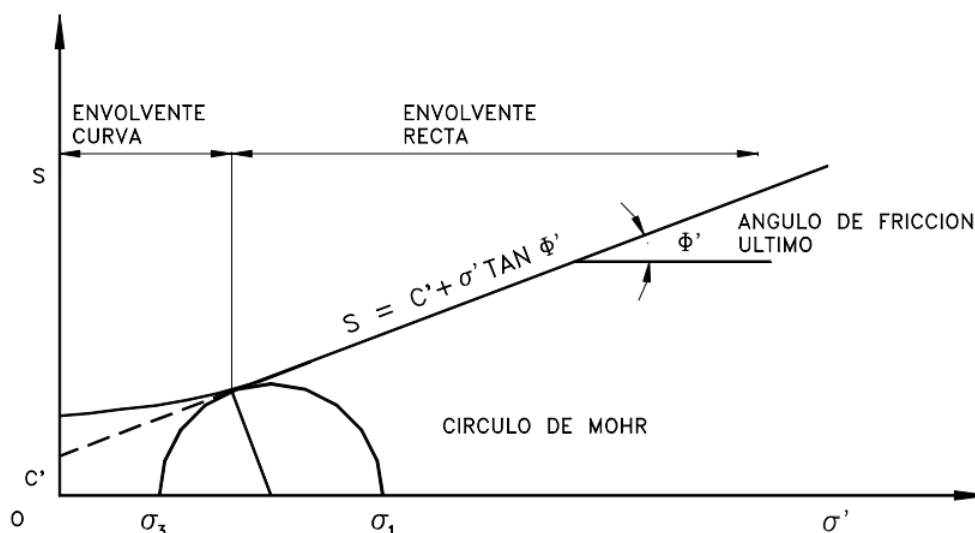


Figura 3. Envolvente de falla y círculo de Mohr

Nota. Adaptado de Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales (p. 85), por Suarez., 1998,

Donde:

c' = Intercepto del eje de resistencia (cohesión) y

ϕ' = Pendiente de la envolvente (ángulo de fricción).

Trayectoria de esfuerzos. El método de la trayectoria de esfuerzos permite estudiar el comportamiento del suelo en el campo o el laboratorio. La trayectoria de esfuerzos muestra

estados sucesivos de esfuerzos en un espacio de Esfuerzos p - q , donde p y q corresponden a los máximos esfuerzos normales y de cortante en el círculo de Mohr. (Suarez, 1998, p.86)

2.2.1.3. Introducción al estudio de Taludes.

Nomenclatura de Talud.

Un talud o ladera es una masa de tierra que no es plana, sino que posee pendiente o cambios de altura significativos. En la literatura técnica se define como ladera cuando su conformación actual tuvo como origen un proceso natural y talud cuando se conformó artificialmente. (Suarez, 1998, p.1)

Las laderas que han permanecido estables por muchos años pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad. Los taludes se pueden agrupar en tres categorías generales: Los terraplenes, los cortes de laderas naturales y los muros de contención. Además, se pueden presentar combinaciones de los diversos tipos de taludes y laderas. (Suarez, 1998, p.2)

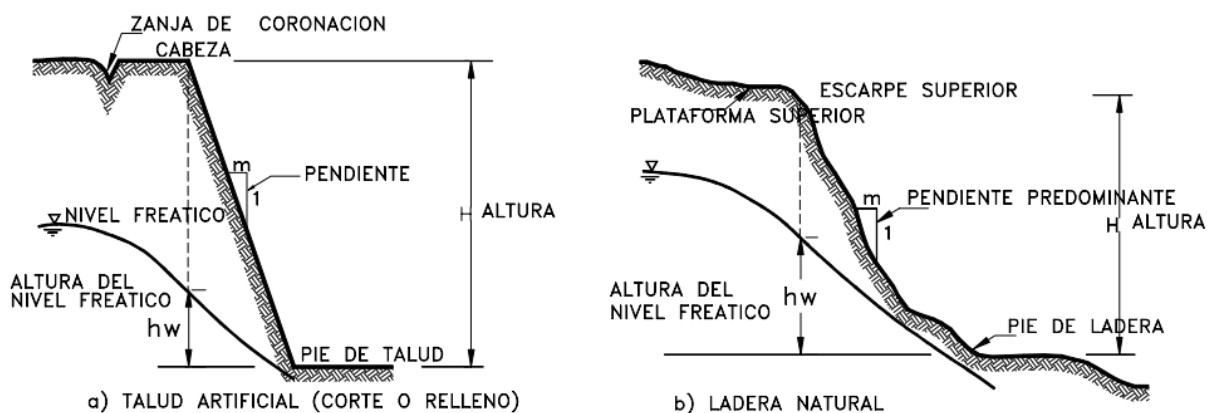


Figura 4. Nomenclatura de taludes y laderas

Nota. Adaptado de *Deslizamientos de Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (p. 2), por Suarez (1998)

Prevención y estabilización de taludes.

Métodos para disminuir o eliminar el riesgo: Suarez (1998), afirma que:” Una vez estudiado el talud, definidos los niveles de amenaza y riesgo, el mecanismo de falla y analizados los factores de equilibrio, se puede pasar al objetivo final que es el diseño del sistema de prevención control o estabilización”(p.385).

Existen varias formas de enfocar y resolver cada problema específico y la metodología que se requiere emplear depende de una serie de factores técnicos, sociales, económicos, políticos; con una gran cantidad de variables en el espacio y en el tiempo. A continuación, se presentan algunas de las metodologías que se han utilizado para disminuir o eliminar el riesgo a los deslizamientos de tierra. (Suarez, 1998, p.385)

Prevención:

La prevención incluye el manejo de la vulnerabilidad, evitando la posibilidad de que se presenten riesgos o amenazas. La prevención debe ser un programa del estado, en todos sus niveles mediante una legislación y un sistema de manejo de amenazas que permita disminuir los riesgos a deslizamiento en un área determinada.(Suarez, 1998, p.385)

Tabla 3
Métodos de prevención de la amenaza o el riesgo

Método	Ventajas	Desventajas
Disuasión con medidas coercitivas	Son muy efectivas cuando la comunidad está consciente del riesgo y colabora con el estado	El manejo de los factores socioeconómicos y sociales es difícil.
Planeación del uso de la tierra	Es una solución ideal para zonas urbanas y es fácil de implementar.	No se puede aplicar cuando ya existe el riesgo.
Códigos técnicos	Presenta herramientas precisas para el control y prevención de amenazas.	Se requiere de una entidad que los haga cumplir.
Aviso y Alarma	Disminuye en forma considerable el riesgo cuando es inminente.	Generalmente, se aplica después de ocurrido el desastre.

Nota. Adaptado de *Deslizamientos de Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (p. 386), por Suarez (1998)

Elusión de la Amenaza

Suarez (1998), indica que: “Eludir la amenaza consiste en evitar que los elementos en riesgo sean expuestos a la amenaza de deslizamiento”(p.387).

Tabla 4

Métodos de elusión de amenazas de deslizamientos

Método	Aplicaciones	Limitaciones
Variantes o relocalización del proyecto	Se recomienda cuando existe el riesgo de activar grandes deslizamientos difíciles de estabilizar o existen deslizamientos antiguos de gran magnitud. Puede ser el mejor de los métodos si es económico hacerlo.	Puede resultar costoso y el nuevo sitio o alineamiento puede estar amenazado por deslizamientos.
Remoción total de deslizamientos	Es atractivo cuando se trata de volúmenes pequeños de excavación.	La remoción de los deslizamientos puede producir nuevos movimientos
Remoción parcial de materiales inestables	Se acostumbra el remover los suelos subsuperficiales inestables cuando sus espesores no son muy grandes.	Cuando el nivel freático se encuentra subsuperficial se dificulta el proceso de excavación
Modificación del nivel del proyecto o subrasante de una vía	La disminución de la altura de los cortes en un alineamiento de gran longitud puede resolver la viabilidad técnica de un proyecto.	Generalmente, al disminuir la altura de los cortes se desmejoran las características del proyecto.
Puentes o viaductos sobre los movimientos	Muy útil en terrenos de pendientes muy altas	Se requiere cimentar los puentes sobre suelo estable y las pilas deben ser capaces de resistir las fuerzas laterales del material inestable

Nota. Adaptado de *Deslizamientos de Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (p. 387), por Suarez (1998)

Control

Métodos tendientes a controlar la amenaza activa antes de que se produzca el riesgo a personas o propiedades. Generalmente, consisten en estructuras que retienen la masa en

movimiento. Este tipo de obras se construyen abajo del deslizamiento para detenerlo después de que se ha iniciado. (Suarez, 1998, p.387)

Tabla 5

Estructuras de control de masas en movimiento

Método	Ventajas	Desventajas
Bermas	Generalmente son económicas y rápidas de construir.	Se requiere un espacio grande a mitad de talud.
Trincheras	Sirven al mismo tiempo para controlar las aguas lluvias	Los cantos fácilmente pasan por encima.
Estructuras de retención	Retienen las masas en movimiento	Se pueden requerir estructuras algo costosas.
Cubiertas de protección	Son uno de los métodos más efectivos para disminuir el riesgo en carreteras.	Son muy costosas.

Nota. *Adaptado de Deslizamientos de Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (p. 386), por Suarez (1998)

Estabilización.

La estabilización de un talud comprende los siguientes factores:

- 1.) Determinar el sistema o combinación de sistemas de estabilización más apropiados, teniendo en cuenta todas las circunstancias del talud estudiado.
- 2.) Diseñar en detalle el sistema a emplear, incluyendo planos y especificaciones de diseño.
- 3.) Instrumentación y control durante y después de la estabilización.

Debe tenerse en cuenta que, en taludes, nunca existen diseños detallados inmodificables y que las observaciones que se hacen durante el proceso de construcción tienden generalmente, a introducir modificaciones al diseño inicial y esto debe preverse en las cláusulas contractuales de construcción. (Suarez, 1998, p.387)

Estructuras de contención

Métodos en los cuales se van a colocar fuerzas externas al movimiento aumentando las fuerzas resistentes, sin disminuir las actuantes. Las estructuras de contención son obras

generalmente masivas, en las cuales el peso de la estructura es un factor importante y es común colocar estructuras ancladas en las cuales la fuerza se transmite al deslizamiento por medio de un cable o varilla de acero. Cada tipo de estructura tiene un sistema diferente de trabajo y se deben diseñar de acuerdo a su comportamiento particular. (Suarez, 1998, p.390)

Tabla 6

Métodos de conformación topográfica para equilibrar fuerzas

Método	Ventajas	Desventajas
Relleno o berma de roca o suelo en la base del deslizamiento.	Efectivos en deslizamientos no muy grandes especialmente en los rotacionales actuando como contrapeso.	Se requiere una cimentación competente para colocar el relleno.
Muros de contención convencionales, de tierra armada etc.	Útiles para estabilizar masas relativamente pequeñas.	Se requiere una buena calidad de cimentación. Son poco efectivos en taludes de gran altura.
Pilotes	Son efectivos en movimientos poco profundos, en los cuales existe suelo debajo de la superficie de falla que sea competente para permitir el hincado y soporte de los pilotes.	No son efectivos en deslizamientos profundos o cuando aparece roca o suelo muy duro debajo de la superficie de falla. Poco efectivos en deslizamientos rotacionales. .
Anclajes o pernos	Efectivos en roca, especialmente cuando es estratificada.	Se requieren equipos especiales y son usualmente costosos.
Pantallas ancladas	Útiles como estructuras de contención de masas de tamaño pequeño a mediano.	Existen algunas incertidumbres sobre su efectividad en algunos casos, especialmente, cuando hay aguas subterráneas y son generalmente costosas.

Nota. Adaptado de *Deslizamientos de Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (p. 386), por Suarez (1998)

Estructuras de Contención

El propósito de una estructura de contención es el resistir las fuerzas ejercidas por la tierra contenida, y transmitir esas fuerzas en forma segura a la fundación o a un sitio por fuera de la masa analizada de movimiento. En el caso de un deslizamiento de tierra el muro ejerce una fuerza para contener la masa inestable y transmite esa fuerza hacia una cimentación o zona de

anclaje por fuera de la masa susceptible de moverse. Las deformaciones excesivas o movimientos de la estructura de contención o del suelo a su alrededor deben evitarse para garantizar su estabilidad. Deben diferenciarse dos condiciones de diseño de una estructura de contención totalmente diferentes así. (Suarez, 1998, p.473)

Condición de talud estable

Este es el caso típico de muro de contención analizado en los textos de mecánica de suelos y fundaciones. Se supone que el suelo es homogéneo y se genera una presión de tierras de acuerdo a las teorías de Rankine o Coulomb y la fuerza activa tiene una distribución de presiones en forma triangular. (Suarez, 1998, p.473)

Condición de deslizamiento

En el caso de que exista la posibilidad de ocurrencia de un deslizamiento o se trate de la estabilización de un movimiento activo, la teoría de presión de tierras de Rankine o de Coulomb no representa la realidad de las fuerzas que actúan sobre el muro y generalmente el valor de las fuerzas actuantes es muy superior a las fuerzas activas calculadas por teorías tradicionales. El hecho de que exista un deslizamiento o un factor de seguridad bajo, equivale a que se han generado en el talud deformaciones que producen un aumento muy grande de fuerzas sobre la estructura a diseñar. (Suarez, 1998, p.473)

Suarez (1998), afirma que: “Es común que los muros o estructuras de contención fallen en el caso de deslizamientos a pesar de que fueron diseñados de acuerdo a un procedimiento universalmente aceptado”(p.473)

El costo de construir una estructura de contención es generalmente, mayor que el de conformar un talud, por lo tanto, debe estudiarse con mucho cuidado su efectividad como método de

estabilización y durante el diseño debe hacerse todo el esfuerzo por mantener su altura lo más baja posible. (Suarez, 1998, p.473)

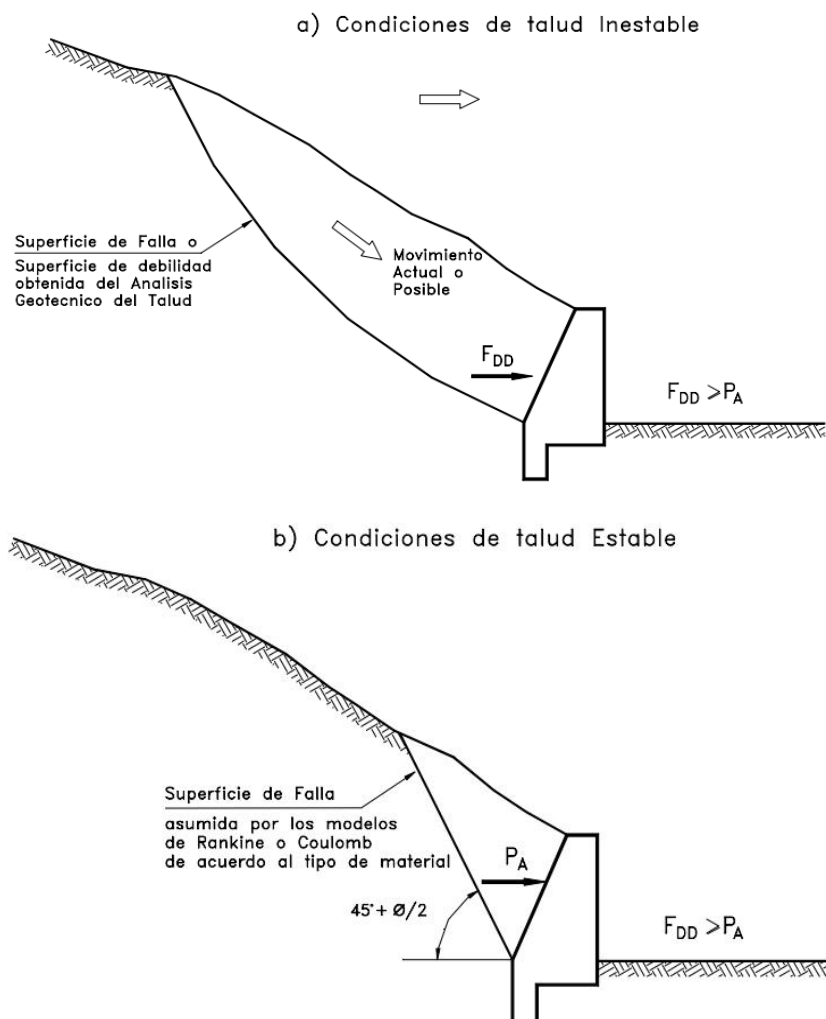


Figura 5. Condiciones de diseño para muros de contención

Nota. Adaptado de *Deslizamientos de Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (p. 474), por Suarez (1998)

Tipos de Estructura

Como afirma Suarez (1998) “Existen varios tipos generales de estructura, y cada una de ellas tiene un sistema diferente de transmitir las cargas” (p.474)

Muros masivos rígidos

Suarez (1998) menciona: “Son estructuras rígidas, generalmente de concreto, las cuales no permiten deformaciones importantes sin romperse. Se apoyan sobre suelos competentes para transmitir fuerzas de su cimentación al cuerpo del muro y de esta forma generar fuerzas de contención” (1998)

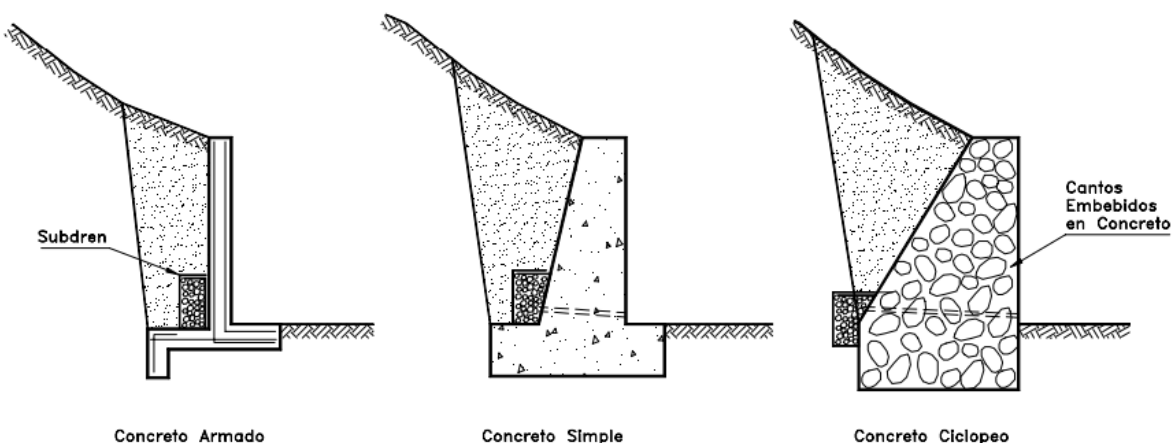


Figura 6. Esquema de muros rígidos

Nota. Adaptado de Deslizamientos de Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales (p. 474), por Suarez (1998)

Tabla 7

Ventajas y desventajas de los diversos tipos de muro rígido

Método	Ventajas	Desventajas
Reforzado	Los muros de concreto armado pueden emplearse en alturas grandes (superiores a diez metros), previo su diseño estructural y estabilidad. Se utilizan métodos convencionales de construcción, en los cuales la mayoría de los maestros de construcción tienen experiencia.	Requieren de buen piso de cimentación. Son antieconómicos en alturas muy grandes y requieren de formaletas especiales. Su poco peso los hace inefectivos en muchos casos de estabilización de deslizamientos de masas grandes de suelo.

Concreto simple	Relativamente simples de construir y mantener, pueden construirse en curvas y en diferentes formas para propósitos arquitectónicos y pueden colocarse enchapes para su apariencia exterior.	Se requiere una muy buena fundación y no permite deformaciones importantes, se necesitan cantidades grandes de concreto y un tiempo de curado, antes de que puedan trabajar efectivamente. Generalmente son antieconómicos para alturas de más de tres metros.
Concreto ciclópeo	Similares a los de concreto simple. Utilizan bloques o cantos de roca como material embebido, disminuyendo los volúmenes de concreto.	El concreto ciclópeo (cantos de roca y concreto) no puede soportar esfuerzos de flexión grandes.

Nota. Adaptado de Deslizamientos de Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales (p. 474), por Suarez (1998)

Litología

Desde el punto de vista litológico los materiales se clasifican de acuerdo a su génesis o formación (Abramson, 1996) diferenciándose dos grupos de materiales diversos que son: la roca y el suelo. Las rocas a su vez se clasifican de acuerdo a su origen así (Suarez J., 1998).

Suelos aluviales

Los suelos aluviales son depósitos transportados por el agua en movimiento y depositados cuando la velocidad del agua ha disminuido; estos materiales pueden ser de origen fluvial o lacustre y pueden contener partículas finas, gruesas o entremezcladas. Los depósitos aluviales generalmente, son estratificados y la permeabilidad en la dirección horizontal es mayor que en la dirección vertical. Los suelos aluviales, compuestos por arcilla tienden a ser blandos y los de arena tienden a ser sueltos. Debido a su poca cementación, los materiales aluviales son propensos a erosión y deslizamientos. En ocasiones, los suelos aluviales presentan una matriz de arcilla cementando los granos de arena, grava y limos. Estos cementantes son generalmente, óxidos de hierro o arcillas. Los suelos aluviales cementados forman, en ocasiones, terrazas altas con niveles freáticos colgados muy susceptibles a los deslizamientos (Suarez J., 1998).

2.2.1.4. Métodos numéricos aplicados a geotécnica

2.2.1.4.1. Introducción al Análisis Geotécnico

Casi todas las estructuras de ingeniería civil, desde cimentaciones de edificios hasta taludes y túneles, interactúan con el suelo. La ingeniería geotécnica es la disciplina encargada de analizar esta interacción para garantizar la estabilidad y funcionalidad de dichas estructuras. El ingeniero de diseño debe evaluar tanto las fuerzas que actúan sobre el suelo y los elementos estructurales como los potenciales movimientos que se puedan generar, tanto en condiciones de servicio como en condiciones de falla última. (Potts y Zdravkovid, 1999)

Tradicionalmente, el diseño geotécnico se ha basado en análisis simplificados y enfoques empíricos. Sin embargo, la llegada de hardware y software computacional sofisticado ha permitido avances significativos, posibilitando modelar el comportamiento de las estructuras geotécnicas de una manera mucho más realista. (Potts & Zdravkovid, 1999)

Requerimientos para una Solución Teórica General

Según Potts & Zdravkovid (1999) “Para que una solución teórica a un problema geotécnico sea considerada completa y exacta, debe satisfacer simultáneamente cuatro condiciones fundamentales: Equilibrio, Compatibilidad, el Comportamiento Constitutivo del material y las Condiciones de Frontera”

Equilibrio: Para cuantificar cómo se transmiten las fuerzas a través de un medio continuo como el suelo, se utiliza el concepto de **tensión** (o esfuerzo), que es la fuerza por unidad de área. Estas tensiones no pueden variar de forma aleatoria, sino que deben obedecer las ecuaciones de equilibrio. Para un problema tridimensional, despreciando efectos de inercia, las tensiones deben satisfacer las siguientes ecuaciones. (Potts & Zdravkovid, 1999)

Ecuación 14. Principio de equilibrio estático

$$\begin{aligned}\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \gamma &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0\end{aligned}\tag{14}$$

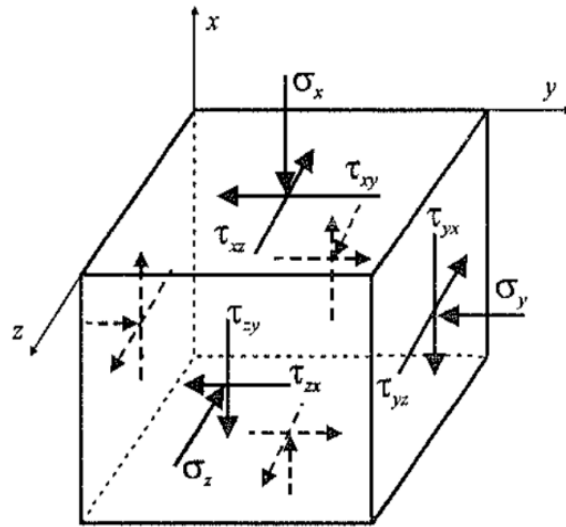


Figura 7. Tensiones sobre elemento típico

Nota. Adaptado de *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering, Theory* (p. 5), por Potts & Zdravkovid (1999)

Compatibilidad: Este principio asegura que la deformación del material sea físicamente posible, es decir, que no se generen huecos ni superposiciones de material durante la deformación. Matemáticamente, esto se expresa relacionando las seis componentes de deformación. Si las deformaciones se definen mediante las funciones continuas u, v, w en las direcciones x, y, z , respectivamente, asumiendo la teoría de deformaciones pequeñas y una convención de signo positivo para la compresión. (Potts & Zdravkovid, 1999).

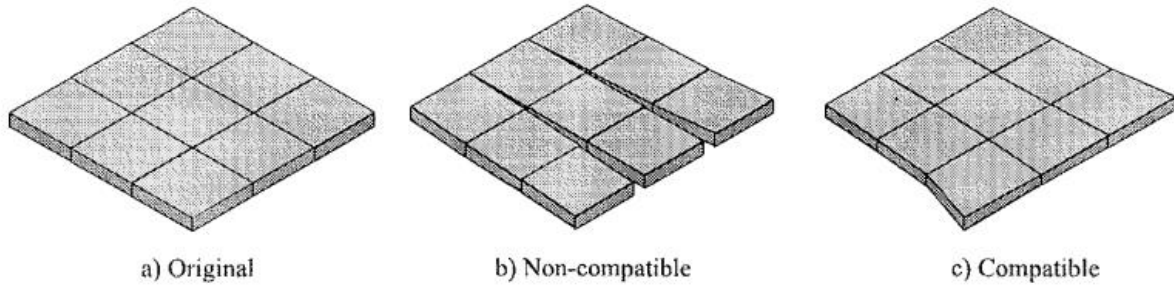


Figura 8. Modos de deformación

Nota. Adaptado de *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering, Theory* (p. 6), por Potts & Zdravkovid (1999)

Ecuación 15. Compatibilidad Cinemática

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= -\frac{\partial u}{\partial x} ; \varepsilon_y = -\frac{\partial v}{\partial y} ; \varepsilon_z = -\frac{\partial w}{\partial z} \\ \gamma_{xy} &= -\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} ; \gamma_{yz} = -\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} ; \gamma_{xz} = -\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z}\end{aligned}\quad (15)$$

Comportamiento Constitutivo: Describe el comportamiento tensión-deformación del suelo y proporciona el vínculo entre el equilibrio y la compatibilidad. Se expresa matemáticamente a través de una matriz **constitutiva** **[D]** que relaciona los incrementos de tensión con los incrementos de deformación. (Potts & Zdravkovid, 1999). Su forma general es

Ecuación 16. Comportamiento constitutivo del material

$$\begin{Bmatrix} \Delta\sigma_x \\ \Delta\sigma_y \\ \Delta\sigma_z \\ \Delta\tau_{xy} \\ \Delta\tau_{xz} \\ \Delta\tau_{zy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{13} & D_{14} & D_{15} & D_{16} \\ D_{21} & D_{22} & D_{23} & D_{24} & D_{25} & D_{26} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & D_{35} & D_{36} \\ D_{41} & D_{42} & D_{43} & D_{44} & D_{45} & D_{46} \\ D_{51} & D_{52} & D_{53} & D_{54} & D_{55} & D_{56} \\ D_{61} & D_{62} & D_{63} & D_{64} & D_{65} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta\varepsilon_x \\ \Delta\varepsilon_y \\ \Delta\varepsilon_z \\ \Delta\gamma_{xy} \\ \Delta\gamma_{xz} \\ \Delta\gamma_{zy} \end{Bmatrix}\quad (16)$$

$$\{\Delta\sigma\} = [D]\{\Delta\varepsilon\}$$

Para un material elástico lineal e isótropo, esta matriz depende únicamente del Módulo de Young (E) y el Coeficiente de Poisson (μ), adoptando **[D]** la siguiente forma:

Ecuación 17. Matriz Constitutiva para un Material Elástico, Lineal e Isótropo

$$[D] = \frac{E}{(1 + \mu)} \begin{bmatrix} (1 - \mu) & \mu & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & (1 - \mu) & \mu & 0 & 0 & 0 \\ \mu & \mu & (1 - \mu) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{2} - \mu\right) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{2} - \mu\right) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \left(\frac{1}{2} - \mu\right) \end{bmatrix} \quad (17)$$

Idealización Geométrica: El Caso de Deformación Plana

Potts & Zdravkovid (1999) afirman “Debido a la complejidad de resolver las ecuaciones anteriores para geometrías tridimensionales, en muchos problemas geotécnicos como muros de contención, cimentaciones continuas o la estabilidad de taludes largos, se puede aplicar una simplificación de considerable magnitud conocida como **deformación plana (Plane Strain)**).

Esta idealización se aplica cuando una de las dimensiones del problema es muy grande en comparación con las otras dos y las cargas son perpendiculares a dicha dimensión. Se asume que no hay desplazamiento en esa dirección (eje z), lo que significa que $w = 0$ y, por lo tanto, las deformaciones $\varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}$ son cero. Esto reduce el problema de 3D a 2D, simplificando enormemente el análisis. (Potts & Zdravkovid, 1999)

Al considerar $w = 0$, y reemplazando en la **Ecuación 15**, se tiene.

$$\varepsilon_z = -\frac{\partial w}{\partial z} = 0; \gamma_{yz} = -\frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} = 0; \gamma_{xz} = -\frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} = 0$$

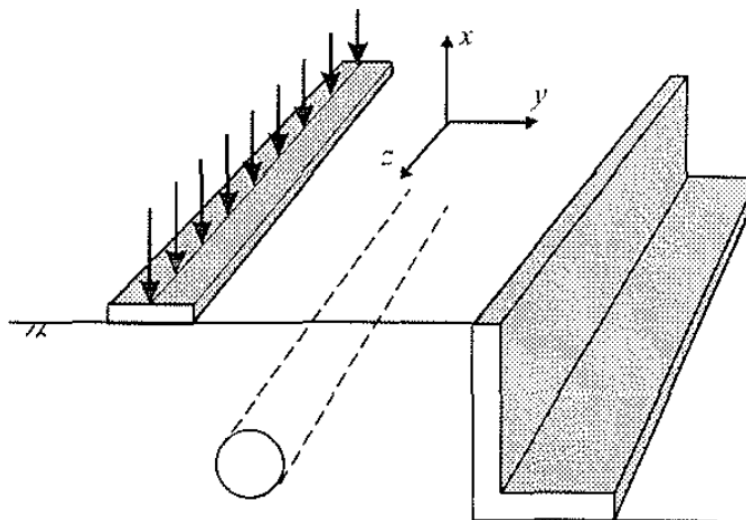


Figura 9. Ejemplos de deformaciones planas

Nota. Adaptado de *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering, Theory* (p. 5), por Potts & Zdravkovic (1999)

Discretización de elementos

Potts & Zdravkovic (1999) "Este es el proceso de modelamiento de la geometría del problema a analizar, se realiza mediante el ensamblaje de pequeñas regiones llamadas elementos finitos. Estos elementos tienen nodos definidos sobre los elementos de contorno, o dentro del mismo elemento".

Primera variable de aproximación. Una primera variable debe ser seleccionada (por ejemplo: desplazamientos, esfuerzos, etc.) y reglas sobre cómo esta debería variar a lo largo del elemento finito deben ser establecidas. Esta variación debe ser establecida en términos de valores nodales. En ingeniería geotécnica es usual adoptar desplazamientos como la primera variable. (Potts & Zdravkovic, 1999)

Ecuaciones de elemento. El uso de un apropiado principio variacional (por ejemplo: mínima energía potencial) para derivar las ecuaciones de elemento:

Ecuación 18. Ecuación de Equilibrio del Elemento Finito.

$$[K_E]\{\Delta d_E\} = \{\Delta R_E\} \quad (18)$$

Donde $[K_E]$ es la matriz de rigidez del elemento $\{\Delta d_E\}$, es el vector de desplazamiento nodal incremental y $\{\Delta R_E\}$ es el vector de las fuerzas nodales incrementales en el elemento.

Ecuaciones globales. Combina las ecuaciones del elemento para formar las ecuaciones globales:

Ecuación 19. Ecuación de Equilibrio Global del Sistema

$$[K_G]\{\Delta d_G\} = \{\Delta R_G\} \quad (19)$$

Donde $[K_G]$ es la matriz de rigidez global, $\{\Delta d_E\}$ es el vector todos los desplazamientos nodales incrementales y $\{\Delta R_E\}$ es el vector de todas las fuerzas nodales incrementales.

Condiciones de borde. Se requiere formular condiciones de borde y modificar las ecuaciones globales. Las cargas (como líneas y puntos de carga, presiones, etc.) afectan el vector $\{\Delta R_G\}$, mientras que los desplazamientos afectan el vector $\{\Delta d_G\}$.

Resolver las ecuaciones globales. Las ecuaciones globales presentan un gran número de ecuaciones simultáneas, que son resueltas para obtener los desplazamientos $\{\Delta d_G\}$ para todos los nodos. A partir de estos desplazamientos nodales se pueden evaluar cantidades secundarias, tales como esfuerzos y deformaciones.

2.2.1.4.2. Desarrollo del método.

Visión General del Método

El Método de Elementos Finitos (MEF) es un procedimiento numérico que descompone un problema complejo en pasos manejables. El enfoque más común en ingeniería geotécnica es el "basado en desplazamientos", donde los desplazamientos son la variable principal a resolver. El proceso sigue una secuencia lógica de pasos para llegar a la solución. (Potts y Zdravkovid, 1999)

Paso 1: Discretización del Dominio

El primer paso consiste en modelar la geometría del problema bajo investigación (por ejemplo, el suelo y una estructura) dividiéndola en un ensamblaje de pequeñas regiones llamadas elementos finitos. Para problemas en dos dimensiones, estos elementos suelen tener forma triangular o cuadrilateral. La geometría de cada elemento se define por las coordenadas de puntos clave llamados nodos, ubicados en sus esquinas y, a veces, en los puntos medios de sus lados para representar geometrías curvas con mayor precisión. (Potts y Zdravkovid, 1999)

El conjunto de todos los elementos y nodos se conoce como **mallado de elementos finitos**. El diseño de esta mallado es crucial: se requiere una mayor densidad de elementos (elementos más pequeños) en zonas donde se esperan grandes variaciones de tensión, como cerca de una carga aplicada o en las esquinas de una excavación, para obtener resultados precisos. (Potts y Zdravkovid, 1999)

Paso 2: Aproximación del Desplazamiento y Funciones de Forma [N]

Esta es la aproximación fundamental del método. Se asume que la variación del campo de desplazamientos (u en la dirección x , v en la dirección y) dentro de cada elemento sigue una función polinómica simple. Para un elemento triangular simple de 3 nodos (i, j, m), esta variación es lineal. (Potts & Zdravkovid, 1999)

Ecuación 20. *Aproximación Lineal del Desplazamiento para un elemento finito triangular.*

$$u = a_1 + a_{2x} + a_{3y} \quad (20)$$

$$v = b_1 + b_{2x} + b_{3y}$$

En la formulación general, estas constantes ($a_1, b_1, etc.$) se reemplazan por un sistema más potente que utiliza **Funciones de Forma [N]**. Estas funciones relacionan el desplazamiento

en cualquier punto del interior del elemento con los valores de desplazamiento en sus nodos.

(Potts & Zdravkovid, 1999). La ecuación generalizada es

Ecuación 21. *Aproximación del Desplazamiento mediante Funciones de Forma.*

$$\begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = [N] \{u_i u_j u_m v_i v_j v_m^T\} = [N] \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix}_{\{nodes\}} \quad (21)$$

Paso 3: Relación Deformación-Desplazamiento (Matriz [B])

Una vez que el desplazamiento está definido por las funciones de forma, las deformaciones $\{\Delta\epsilon\}$ se pueden calcular a partir de las derivadas de los desplazamientos, según las ecuaciones de compatibilidad. Esto establece una relación directa entre las deformaciones en cualquier punto del elemento y los desplazamientos de sus nodos $\{\Delta d\}_n$ a través de la matriz de deformación-desplazamiento [B]. (Potts & Zdravkovid, 1999)

Ecuación 22. *Relación Deformación-Desplazamiento para un elemento finito*

$$\begin{Bmatrix} \Delta\epsilon_x \\ \Delta\epsilon_y \\ \Delta\gamma_{xy} \\ \Delta\epsilon_z \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \dots & 0 & \frac{\partial N_n}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \dots & \frac{\partial N_n}{\partial y} & \frac{\partial N_n}{\partial x} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta v_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta v_2 \\ \vdots \\ \Delta u_n \\ \Delta v_n \end{Bmatrix} \quad (22)$$

$$\{\Delta\epsilon\} = [B]\{\Delta d\}_n$$

La matriz [B] se deriva de las funciones de forma [N] y depende exclusivamente de la geometría del elemento.

Paso 4: Ecuaciones del Elemento (Matriz de Rigidez $[K_E]$)

En este paso se combinan la geometría del elemento (a través de la matriz [B]) y las propiedades del material (a través de la matriz constitutiva [D]) para formar la matriz de rigidez del elemento $[K_E]$. Utilizando el principio de mínima energía potencial, se llega a la siguiente ecuación integral que define la rigidez del elemento. (Potts y Zdravkovid, 1999)

Ecuación 23. Ecuación de la Matriz de Rigidez del Elemento

$$[K_E] = \int_{Vol} [B]^T [D] [B] dVol \quad (23)$$

Esta matriz es fundamental, ya que representa la relación entre las fuerzas nodales y los desplazamientos nodales para un único elemento. Dado que esta integral es compleja, generalmente se resuelve numéricamente mediante un proceso llamado integración gaussiana, evaluando las propiedades en puntos específicos dentro del elemento conocidos como "puntos de Gauss". (Potts y Zdravkovid, 1999)

Esta matriz finalmente nos da la ecuación para un solo elemento:

Ecuación 24. Ecuación de Equilibrio del Elemento Finito

$$[K_E] \{\Delta d_E\} = \{\Delta R_E\} \quad (24)$$

Paso 5: Ensamblaje de Ecuaciones Globales (Matriz $[K_G]$)

Una vez que se tiene la matriz de rigidez para cada elemento individual, el siguiente paso es ensamblarlas en una única y gran matriz de rigidez directa, suma las contribuciones de cada matriz de elemento en las posiciones correspondientes a los nodos que comparten, creando un sistema que representa toda la malla. La matriz global resultante es típicamente grande, simétrica y "bandeada" (la mayoría de sus términos no nulos se agrupan alrededor de la diagonal principal). (Potts & Zdravkovid, 1999)

Paso 6: Solución del Sistema

El ensamblaje de todas las ecuaciones de los elementos da como resultado el sistema global de ecuaciones:

Ecuación 25. Ecuación de Equilibrio Global del Sistema

$$[K_G] \{\Delta d_G\} = \{\Delta R_G\} \quad (25)$$

Donde, $[K_G]$ es la matriz de rigidez global de toda la estructura, $\{\Delta d_G\}$ es el vector de todos los desplazamientos nodales desconocidos del problema, $\{\Delta R_G\}$ es el vector de todas las fuerzas externas aplicadas en los nodos (cargas, peso propio, etc.). (Potts & Zdravkovid, 1999)

Antes de resolver, este sistema se modifica para incluir las **condiciones de frontera** (nodos con desplazamiento restringido, como los de la base de la malla).

Finalmente, la solución del método se obtiene al resolver este gran sistema de ecuaciones simultáneas para encontrar los desplazamientos nodales desconocidos $\{\Delta d_G\}$. Una vez que se conocen los desplazamientos en todos los nodos, se pueden calcular, como paso final, las deformaciones y tensiones en cada elemento utilizando las matrices $[B]$ y $[D]$ respectivamente.

2.2.1.4.3. Modelos constitutivos.

Con el objetivo de predecir el comportamiento de los suelos sometidos a diferentes tipos de carga surgen los primeros modelos matemáticos, los cuales usan relaciones constitutivas en su formulación. Estos modelos presentan relaciones esfuerzo - deformación para caracterizar el material y pueden clasificarse en modelos elásticos y plásticos. (Ibañez, 2003)

Según los esquemas que se muestran en la Figura 10 y Figura 11:

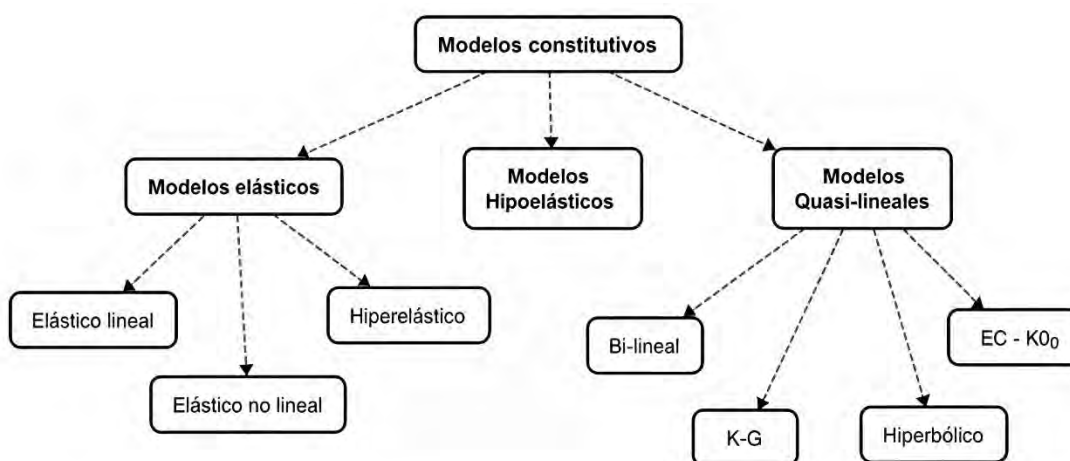


Figura 10. Modelos constitutivos básicos.

Nota. Adaptado de *Modelagem constitutiva para solos com ênfase em solos não saturados*, (p. 35), por Ibañez (2003)

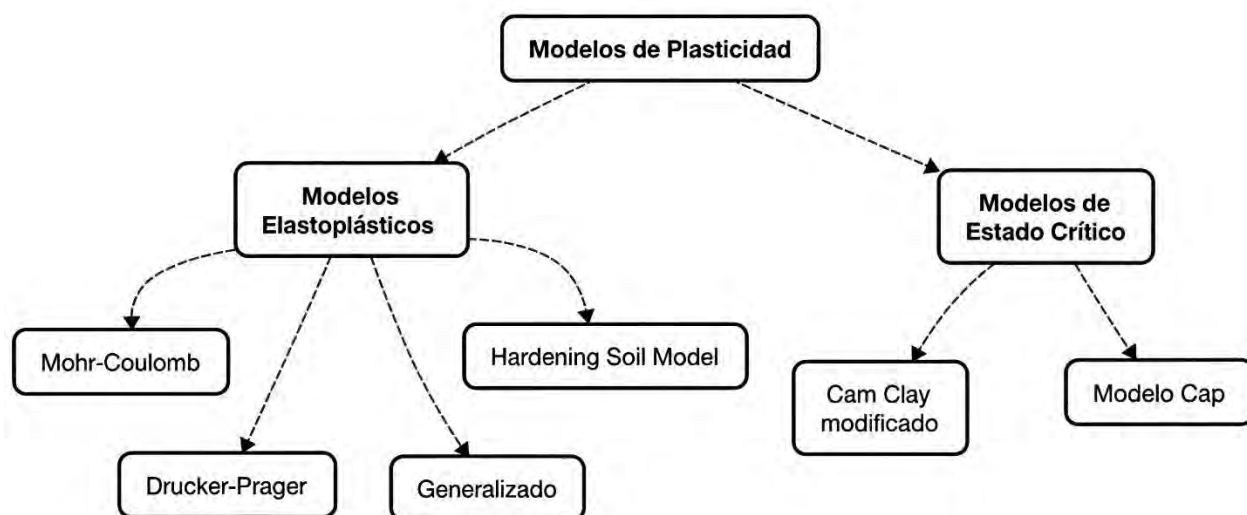


Figura 11. Modelos constitutivos elastoplásticos clásicos

Nota. Adaptado de *Modelagem constitutiva para solos com ênfase em solos não saturados*, (p. 35), por Ibañez (2003)

a) Modelo Constitutivo lineal elástico.

El modelo elástico lineal se basa en la ley de elasticidad isotrópica de Hooke. Implica dos parámetros elásticos básicos, es decir, el módulo de Young E y el coeficiente de Poisson ν .

Aunque el modelo elástico lineal no es adecuado para modelar el suelo, puede utilizarse para modelar volúmenes rígidos en el suelo, como muros de hormigón o formaciones rocosas intactas.

(Bentley Systems, 2024, p.6)

Tabla 8

Parámetros de entrada del modelo lineal elástico

Parámetro	Descripción
E	Elasticidad
ν	Relación de Poisson

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica: Clase N°04* (diap. 6), por Rojas (2024)

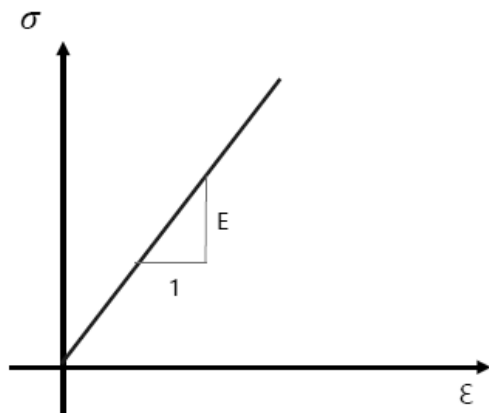


Figura 12. Relación esfuerzo normal deformación axial en modelo Lineal elástico.

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°04 (diap. 6), por Rojas (2024)

b) Modelo Constitutivo de Mohr-Coulomb.

El modelo de Mohr-Coulomb lineal elástico perfectamente plástico implica cinco parámetros de entrada, es decir, E y ν para la elasticidad del suelo; ϕ y c para la plasticidad del suelo, ψ y como un ángulo de dilatación. Este modelo de Mohr-Coulomb representa una aproximación de "primer orden" del comportamiento del suelo o roca. Se recomienda utilizar este modelo para un primer análisis del problema considerado. Para cada capa se estima una rigidez media constante o una rigidez que aumenta linealmente con la profundidad. Debido a esta rigidez constante, los cálculos tienden a ser relativamente rápidos y se obtiene una primera estimación de las deformaciones. (Bentley, 2024a)

Tabla 9

Parámetros del modelo de Mohr-Coulomb

Parámetro	Descripción
c	Cohesión
ϕ	Ángulo de fricción interna
E	Elasticidad
ν	Relación de Poisson
ψ	Ángulo de dilatancia

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°04 (diap. 7), por Rojas (2024)

Ángulo de fricción: Los altos ángulos de fricción, como los que se encuentran en arenas densas, incrementan considerablemente el esfuerzo computacional plástico. Además, estos altos ángulos de fricción pueden estar sujetos a un comportamiento de ablandamiento por deformación, lo que significa que estos altos ángulos no son sostenibles bajo grandes deformaciones. Por lo tanto, se recomienda evitar altos ángulos de fricción al realizar cálculos preliminares para un proyecto. (Bentley Systems, 2024, p.38)

Cohesión: El software Plaxis puede manejar arenas no cohesivas ($c = 0$), pero algunas opciones pueden no funcionar bien. Para evitar complicaciones, se recomienda que los suelos arenosos no cohesivos sean ingresados con un valor mínimo cercano a la superficie (usando $c > 0.2$ kPa). Esto es para evitar que el valor de cohesión usado se convierta en un valor de tracción, lo cual sería poco realista para suelos no cohesivos. (Bentley, 2024a)

Coefficiente de Poisson (ν), En los ensayos triaxiales estándar, se observa que la relación de volumen disminuye significativamente al inicio, lo que implica la necesidad de seleccionar un valor bajo para la relación de Poisson (ν). En algunos casos, como problemas de descarga específicos, puede ser razonable usar un valor bajo para ν . Sin embargo, generalmente, se recomienda utilizar valores más altos al usar el modelo Mohr-Coulomb. (Bentley Systems, 2024, p.36)

La selección de la relación de Poisson es particularmente sencilla cuando se utiliza el modelo elástico o el modelo Mohr-Coulomb en condiciones de carga unidimensional. En este tipo de carga, Plaxis utiliza una relación de Poisson de 0.3 a 0.4, un rango considerado adecuado. En suelos altamente compactados, ν puede acercarse a 0.15, mientras que, para condiciones de descarga, ν debe estar entre 0.15 y 0.25. (Bentley Systems, 2024, p.37)

Ángulo de dilatancia (ψ). Se especifica en grados. A diferencia de las capas sobre consolidadas, los suelos arcillosos tienden a mostrar poca dilatancia ($\psi \approx 0$). La dilatancia de la arena depende tanto de su densidad como del ángulo de fricción. En general, la dilatancia de los suelos es mucho menor que el ángulo de fricción. (Bentley Systems, 2024, p.40)

Para las arenas de cuarzo, el orden de magnitud de la dilatancia es $\psi \approx \phi - 30^\circ$. Cuando el ángulo de fricción (ϕ) es menor a 30° , el ángulo de dilatancia es generalmente cero. Un valor pequeño y negativo para ψ solo es realista para arenas extremadamente sueltas. (Bentley Systems, 2024, p.40)

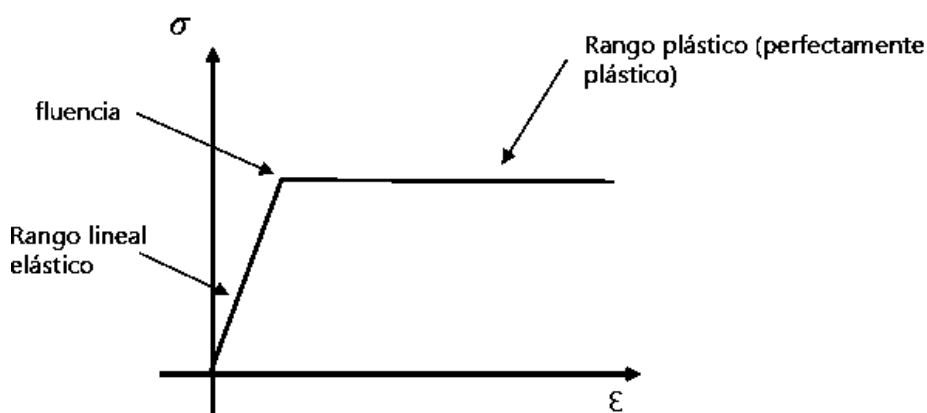


Figura 13. Relación esfuerzo normal deformación axial en modelo Mohr Coulomb

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°04 (diap. 7), por Rojas (2024)

c) Modelo constitutivo Hiperbólico.

El modelo hiperbólico fue propuesto inicialmente por Konder y Zelasko (1963), posteriormente fue presentado en forma ajustada por Duncan y Chang (1970), partiendo del supuesto de que las curvas esfuerzo-deformación del suelo pueden aproximarse a una curva hiperbólica que relaciona el esfuerzo desviador con la deformación axial. Los parámetros que se

requieren para trabajar con el modelo se encuentran en función del esfuerzo de confinamiento y del esfuerzo cortante.

Tabla 10

Parámetros del modelo Hiperbólico

Parámetro	Descripción
c (kPa)	Cohesión
ϕ	Ángulo de Fricción
K	Módulo de carga inicial
n	Exponente de rigidez inicial
Rf	Relación de falla
Kb	Módulo de carga inicial
m	Exponente de rigidez inicial
Kur	Módulo de descarga y recarga

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°06 (diap. 5), por Rojas (2024)

Relación hiperbólica

Ecuación 26. *Modelo Hiperbólico de Duncan.*

$$-\varepsilon_1 = \frac{1}{E_i} * \frac{q}{(1 - \frac{q}{q_a})} \quad (26)$$

q_a : Valor asintótico de la resistencia al corte

E_i : Rigidez inicial.

Relaciones asintóticas para modelo hiperbólico

$$a = \frac{1}{E_i} ; b = \frac{1}{q_a}$$

Ecuación 27. *Relación hiperbólica reducida.*

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{(a + \varepsilon_1 b)} \quad (27)$$

$\sigma_1 - \sigma_3$: Esfuerzo desviador

ε_1 : Deformación axial.

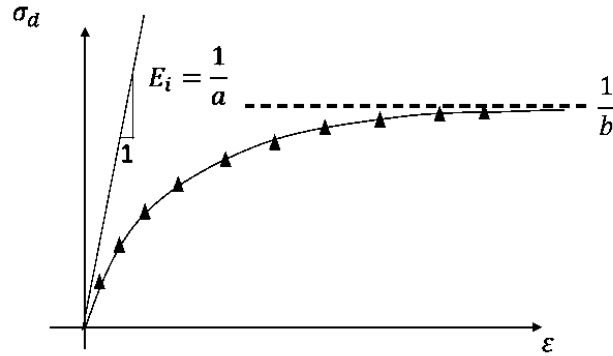


Figura 14. Modelo hiperbólico

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°06 (diap. 6), por Rojas (2024)

Ecuación de la hipérbola con cambio de variable, derivado de la **Ecuación 27**

$$\frac{\varepsilon_1}{\sigma_1 - \sigma_3} = \varepsilon_1 b + a$$

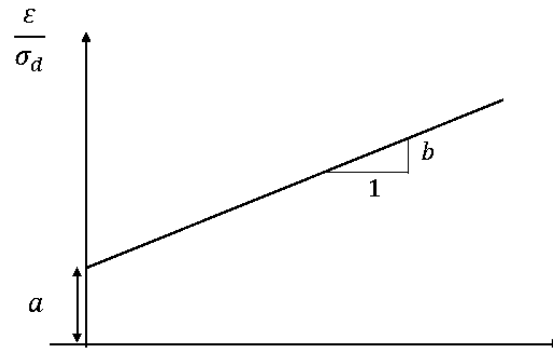


Figura 15. Representación de la ecuación de la hipérbola con cambio de variable

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°06 (diap. 8), por Rojas (2024)

Escalamiento Duncan y Chang (corrección del “b”)

Ecuación 28. Factor de Falla (R_f) del modelo de Duncan y Chang

$$R_f = \frac{q_f}{q_a}, \text{ siendo } R_f \leq 1 \quad (28)$$

q_f : Esfuerzo desviador de falla real (máx.) del resultado de laboratorio

q_a : Valor asintótico del Esf. desviador $\left(\frac{1}{b}\right)$

R_f : Factor de escala o factor de falla (0.8-1)

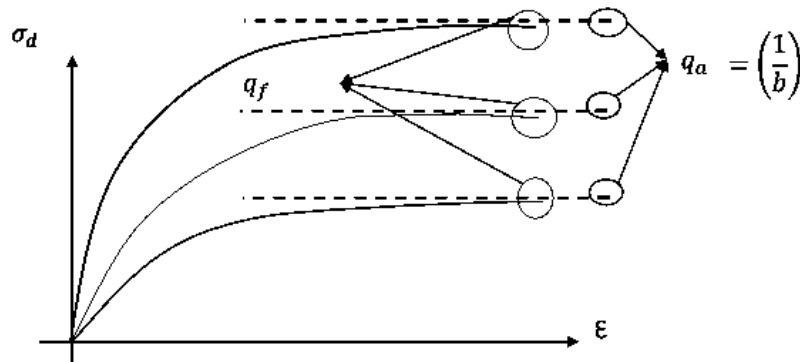


Figura 16. Acondicionamiento de parámetros a Resultado ensayo triaxial

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°06 (diap. 10), por Rojas (2024)

Formulación de Janbu (1963) (corrección del “a”)

Basado en el efecto del esfuerzo confinante sobre el módulo de elasticidad inicial.

Ecuación 29. Corrección del parámetro "a", formulación de Janbu

$$E_i = \frac{1}{a} = K * P_a * \left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)^n \quad (29)$$

Estos parámetros K y n se van a estimar a partir de los esfuerzos de confinamiento, linealizando la **Ecuación 29**, se tiene:

$$\ln(E_i/P_a) = \ln(K) + n * \ln\left(\frac{\sigma_3}{P_a}\right)$$

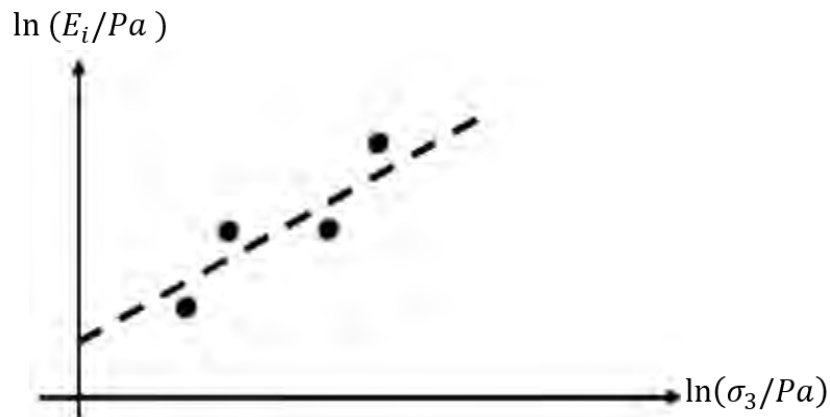


Figura 17. Linealización de la formulación propuesta por Janbu.

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°06 (diap. 10), por Rojas (2024)

d) Modelo constitutivo Hardening Soil

El modelo **Hardening Soil** es un modelo avanzado, útil para simular el comportamiento de diferentes tipos de suelos, tanto blandos como rígidos. Bajo cargas desviadoras primarias, los suelos presentan una disminución de la rigidez y simultáneamente desarrollan deformaciones plásticas irreversibles. En el caso particular de un ensayo triaxial drenado, la relación entre deformación axial y esfuerzo desviador observada puede aproximarse mediante una curva hiperbólica. Esta relación fue inicialmente formulada por Kondner (1963) y luego utilizada en el conocido modelo hiperbólico de Duncan & Chang (1970). Sin embargo, el modelo **Hardening Soil** supera ampliamente al modelo hiperbólico, primero al emplear la teoría de la plasticidad en vez de la teoría elástica, y segundo, al incluir mecanismos adicionales como el endurecimiento por compresión. (Bentley Systems, 2024, p.67)

Tabla 11
Parámetros del modelo de Hardening Soil

Parámetro	Descripción
c	Cohesión
ϕ	Ángulo de fricción interna
σ_3	Esfuerzo de confinamiento
E50	Rigidez secante en ensayos triaxiales
Eoed	Rigidez tangente para carga primaria edométrica
Eur	Rigidez en descarga-recarga
ν	Relación de Poisson (default=0.2)
ψ	Ángulo de dilatancia
ko	Coeficiente de presión lateral de tierras
Rf	Coeficiente de reducción
m	Dependencia de la rigidez al estado de esfuerzos
qf	Esfuerzo de falla
qa	Esfuerzo asíntota

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°07 (diap. 06), por Rojas (2024)

(Bentley, 2024a), explica: Una característica fundamental del modelo **Hardening Soil** es dependencia de la tensión con la rigidez del suelo. Para condiciones edométricas, esta

dependencia implica una relación específica entre el módulo edométrico E_{oed} y el esfuerzo, descrita por la ecuación

Ecuación 30. Dependencia de la tensión con la rigidez del Suelo E_{oed} .

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma_3}{p^{ref}} \right)^m \quad (30)$$

E_{oed}^{ref} : Módulo edométrico de referencia.

σ_3 : Esfuerzo aplicado.

p^{ref} : Presión de referencia.

m : Parámetro que controla la dependencia del esfuerzo (habitualmente $m \approx 1$ para suelos blandos).

Relación hiperbólica.

Se utiliza el mismo principio establecido en el modelo Hiperbólico, pero lo supera en alto grado por hacer uso de la teoría de plasticidad en vez de la de elasticidad, por incluir en su formulación el fenómeno de dilatancia en el suelo y por la introducción de una superficie de fluencia variable en el espacio.

Ecuación 31. Dependencia de la rigidez con el estado de esfuerzos, E_{50}

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{ccos(\varphi) - \sigma'_3 \sin(\varphi)}{ccos(\varphi) + p^{ref} \sin(\varphi)} \right)^m \quad (31)$$

Esa ecuación base para la calibración del modelo e indica la dependencia de la rigidez con el estado de esfuerzos.

Donde:

E_{50}^{ref} : Módulo de rigidez de referencia correspondiente al confinamiento de referencia

Para las trayectorias de tensión de descarga y recarga, se utiliza otro módulo de rigidez dependiente de la tensión:

Ecuación 32. Dependencia de la rigidez con el estado de esfuerzos, E_{ur}

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{ccos(\varphi) - \sigma_3' \sin(\varphi)}{ccos(\varphi) + p^{ref} \sin(\varphi)} \right)^m \quad (32)$$

E_{ur}^{ref} : Módulo de Young de referencia y recarga, correspondientes a la presión de referencia.

(Bentley, 2024a), Manual Plaxis indica que, en muchos casos prácticos, conviene establecer que:

Ecuación 33. Relación entre E_{ur} de ref. y E_{50} ref.

$$E_{ur}^{ref} = 3 * E_{50}^{ref} \quad (33)$$

Para fines de calibración del modelo, se toma como referencia un $p^{ref} = 1kPa$ obteniendo:

Ecuación 34. E_{50} para presión de confinamiento de $1kPa$

$$E_{50} = a(\sigma_3)^m \quad (34)$$

Se linealiza la **Ecuación 34**, se tiene.

$$\ln(E_{50}) = \ln(a) + m * \ln(\sigma_3)$$

La **Ecuación 26**, deriva en una expresión general necesario para la calibración del modelo de Hardening Soil.

Ecuación 35. Ecuación general para calibración de modelo Hardening Soil

$$\sigma_a = q = q_a * \left(\frac{1}{1 + \frac{q_a}{2E_{50} * \varepsilon_1}} \right) \quad (35)$$

Ecuación 36. Esfuerzo de falla de Mohr-Coulomb

$$qf = \frac{2 * \tan(\varphi)}{1 - \tan(\varphi)} * (\sigma_3 + c * \cot(\varphi))$$

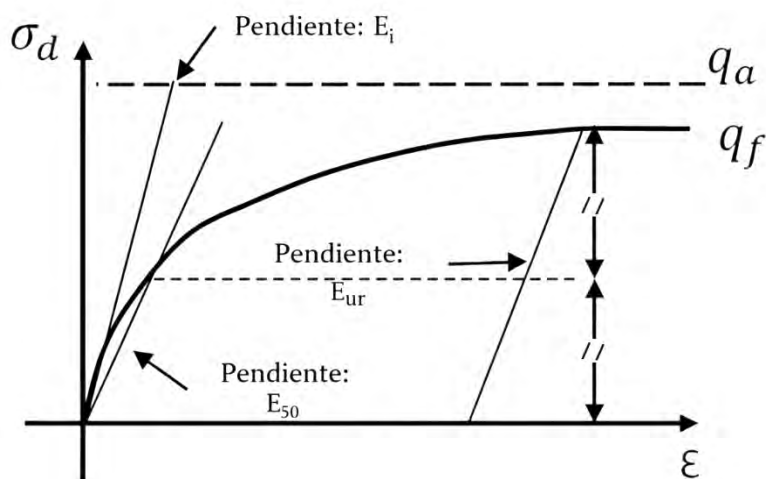


Figura 18. Parámetros esfuerzos-deformación para modelo de Hardening Soil.

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°07 (diap. 06), por Rojas (2024)

2.2.1.4.4. Elementos estructurales en Plaxis

Las placas, que en realidad son elementos de viga, son objetos estructurales que se utilizan para modelar estructuras esbeltas en el terreno con una significativa rigidez a la flexión y rigidez axial. Pueden utilizarse para simular la influencia de muros, placas, láminas o revestimientos que se extienden en la dirección z . En la Figura 19 se muestran ejemplos de estructuras geotécnicas con placas. (Bentley, 2024)

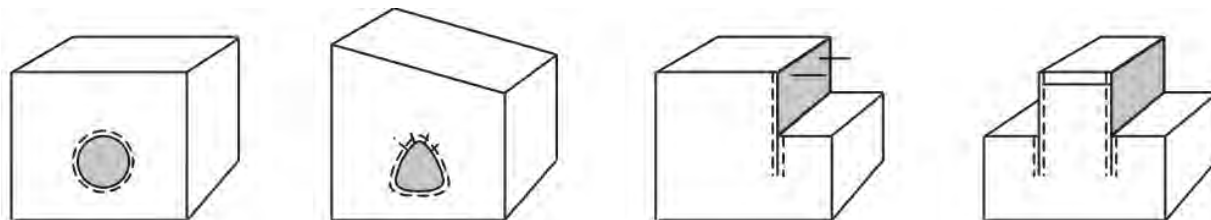


Figura 19. Aplicación en la que se utilizan placas, anclajes e interfaces

Nota. Adaptado de *PLAXIS 2D 2024.2 Reference Manual 2D*, (p. 101), por Bentley (2024)

Interacción Suelo-Estructura

Para un modelado adecuado de la interacción entre la placa y el suelo circundante, se pueden añadir elementos de **interfaz**. Estos elementos permiten simular el comportamiento en la zona de contacto, que suele ser más débil y flexible que el suelo adyacente. La resistencia de la interfaz se relaciona con la del suelo a través de un factor de reducción de resistencia (R_{inter}). (Bentley, 2024)

Ecuación 37. Reducción de parámetros mecánicos a través del R_{inter}

$$\begin{aligned} c_{inter} &= R_{inter} * c_{soil} \\ \tan(\phi)_{inter} &= R_{inter} * \tan(\phi)_{soil} \\ G_{inter} &= (R_{inter})^2 * G_{soil} \end{aligned} \tag{37}$$

Según Rojas (2024), R_{inter} es un valor arbitrario y nunca debe ser crítico para el proyecto

Tabla 12
Sugerencias para R_{inter}

Tipo de Interacción	Valor de R_{inter}
Interacción arena y acero	$\approx 0.6 - 0.7$
Interacción arcilla y acero	≈ 0.5
Interacción arena y concreto	$\approx 0.8 - 1$
Interacción arcilla y concreto	$\approx 0.7 - 1$
Interacción suelo y <i>geogrid</i>	≈ 1
Interacción suelo y geotextil	$\approx 0.5 - 0.9$

Nota. Adaptado de *Elementos finitos aplicados a la ingeniería geotécnica*: Clase N°05 (diap. 8), por Rojas (2024)

Propiedades de Placas, Anclajes.

Las propiedades de las placas se definen en conjuntos de datos de materiales específicos para ellas. Los parámetros más importantes son la rigidez a flexión (EI) y la rigidez axial (EA). A partir de estos dos valores, el programa calcula un espesor de placa equivalente (d_{eq}) mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 38. *Espesor equivalente para creación de placas en Plaxis.*

$$d_{eq} = \sqrt{12 \frac{EI}{EA}} \quad (38)$$

Ecuación 39. *Rigidez axial (EA)*

$$EA = E \cdot b \cdot h \quad (39)$$

Ecuación 40. *Rigidez a la flexión (EI)*

$$EI = E \cdot \frac{bh^3}{12} \quad (40)$$

Este espesor equivalente es crucial, ya que influye en la distancia entre los puntos de tensión del elemento. Por esta razón, si se modifican las propiedades de una placa durante un análisis por fases, la relación EI/EA debe permanecer constante para no alterar la distribución de momentos flectores y evitar desequilibrios en el modelo. (Bentley, 2024b)

2.2.1.4.5. Ventajas y Desventajas del MEF.

Ventajas del MEF

En primer lugar, podemos mencionar la rapidez para el cálculo y análisis del suelo por métodos numéricos, lo cual demandaría más tiempo y esfuerzo al ser analizado por métodos analíticos. De esta forma se puede realizar el diseño para diferentes casos y condiciones que modifiquen el diseño y se pueda elegir el caso más crítico del diseño (Tal es el caso con el

análisis de las combinaciones de fuerzas amplificadas con los que deben cumplir las normas y criterios de diseño exigidos para la construcción de un túnel). (Chirinos, 2017, p.37)

En segundo lugar, está la facilidad del uso del programa para analizar y diseñar cualquier estructura y geometría especificada, ya que al contar con una interfaz CAD el programa permite adoptar cualquier diseño que sea ingresado por el usuario. Además, permite obtener los resultados y diagramas de una forma más precisa siempre y cuando los datos ingresados correspondan a los valores reales elegidos de los materiales a diseñar. (Chirinos, 2017, p.38)

Chirinos (2017) menciona: “En tercer lugar, se reducen los errores de cálculo, ya que la computadora se encarga de realizar todas las operaciones automáticamente siempre y cuando los parámetros y propiedades estén correctamente definidos por el usuario” (p.37)

Desventajas del MEF

La principal desventaja del uso de un programa de elementos finitos yace en que el resultado solo es aplicable para las condiciones del problema con la configuración geométrica de estructuras y materiales generados y tales resultados no se pueden interpretar o son válidos para otro problema similar. Lo necesario para evaluar otro caso similar, es simular el proceso de modelación completamente de nuevo con las diferencias de cada caso aplicado. (Chirinos, 2017, p.38)

Otra desventaja del uso de estos programas yace en la simplificación de los modelos constitutivos, lo cual limita a tomar factores de seguridad adecuados para el diseño de las estructuras analizadas. Sin embargo, esta limitación se ha ido reduciendo conforme ha ido avanzando la tecnología y generación de los programas de elementos finitos especializados en geomateriales. Tal es el caso de los modelos Hardening-Soil Model y Soft-Soil-Creep Model que simulan un comportamiento más realista del suelo. (Chirinos, 2017, p.38)

Una última desventaja consiste en el ingreso de datos inconsistentes, con lo cual se aleja de calcular un modelo que se asemeje a la realidad de los casos simplemente porque los datos asumidos no corresponden a valores reales de un material. (Chirinos, 2017, p.38)

2.2.1.5. Métodos Numéricos en Taludes.

El auge que ha tomado en los últimos años el uso del computador prácticamente, ha obligado a su empleo para el análisis de estabilidad de taludes, en la mayoría de los casos. Este sistema ha permitido incorporar más información en los modelos de análisis y permite analizar situaciones que no eran posibles con los sistemas manuales. Actualmente, se conocen programas comerciales de software para computador, tales como Slope/w, Stable y Talren, los cuales permiten de una forma rápida y sencilla obtener los factores de seguridad de taludes o laderas con cierto grado de complejidad y por cualesquiera de los métodos de análisis. Algunos métodos emplean los elementos finitos, con muy poco éxito en la estabilidad de taludes específicos, y otros emplean análisis de equilibrio por interacción, siendo este último sistema muy empleado universalmente. (Suarez, 1998, p.133)

Análisis por elementos finitos

El método de elementos finitos resuelve muchas de las deficiencias de los métodos de equilibrio límite, este método fue introducido por Clough y Woodward (1967). El método esencialmente divide la masa de suelo en unidades discretas que se llaman elementos finitos. Estos elementos se interconectan en sus nodos y en bordes predefinidos. El método típicamente utilizado es el de la formulación de desplazamientos, el cual presenta los resultados en forma de esfuerzos y desplazamientos a los puntos nodales. La condición de falla obtenida es la de un fenómeno progresivo en donde no todos los elementos fallan simultáneamente. Aunque es una herramienta muy poderosa su utilización es muy compleja y su uso muy limitado para resolver

problemas prácticos. Wong (1984) menciona la dificultad de obtener factores de seguridad a la falla. (Suarez, 1998, p.134)

Suarez (1998), menciona “Aunque su utilización no está muy expandida existen algunos programas de análisis de estabilidad de taludes utilizando métodos numéricos. De estos se conocen los programas FLAC, UDEC (Benko y Stead, 1993), Plaxis entre otros” (p.134)

En el método FLAC los materiales son representados por zonas para formar una malla de acuerdo a la geometría y se puede seleccionar una variedad de relaciones esfuerzo/deformación. En el método UDEC el talud se divide en bloques de acuerdo al sistema de juntas o grietas, los cuales pueden ser rígidos o deformables. Un análisis por elementos finitos debe satisfacer las siguientes características. (Suarez, 1998, p.134)

Primero, “Debe mantenerse el equilibrio de esfuerzos en cada punto, el cual es realizado empleando la teoría elástica para describir los esfuerzos y deformaciones. Para predecir el nivel de esfuerzos se requiere conocer la relación esfuerzo – deformación”(Suarez, 1998, p.134).

Segundo, Las condiciones de esfuerzos de frontera deben satisfacerse. Existe dificultad en la mayoría de los casos prácticos reales para definir la relación esfuerzo - deformación, por lo difícil que es describir los depósitos de suelos naturales en términos de esfuerzo - deformación. Otra limitante es el poco conocimiento de los esfuerzos reales “in situ” que se requieren para incorporar en el modelo. Solamente en casos de proyectos de grandes presas y cortes en roca para objetivos mineros, se han desarrollado programas exitosos de estudio de taludes por elementos finitos. Generalmente, se usa un análisis en dos direcciones por la facilidad de su aplicación, de acuerdo a la capacidad de los computadores sencillos. (Suarez, 1998, p.134)

El análisis planar o en dos direcciones asume cero esfuerzos o cero deformaciones en las superficies laterales del modelo, por lo tanto, para que se simulen las condiciones de campo se requiere que existan esas condiciones. El empleo de análisis en dos direcciones se puede ampliar aplicando al modelo una carga hidrostática lateral. (Suarez, 1998, p.134)

En la figura 20, se muestra una malla típica para el análisis de un talud por elementos finitos (Ashford y Sitar 1994). Generalmente, las mallas analizadas contienen elementos de tamaño uniforme con anchos(w) y alturas(h) iguales. El tamaño y forma de los elementos influye en forma importante sobre los resultados obtenidos. Es común que entre más pequeños sean los elementos se obtienen mayores niveles de esfuerzos de tensión en la cresta del talud, para el caso de la figura 4.10. La altura del elemento es tal vez el factor más importante y se recomiendan por lo menos diez niveles de elementos entre el pie y la cabeza del talud para simular en forma precisa el comportamiento del talud. (Suarez, 1998, p.135)

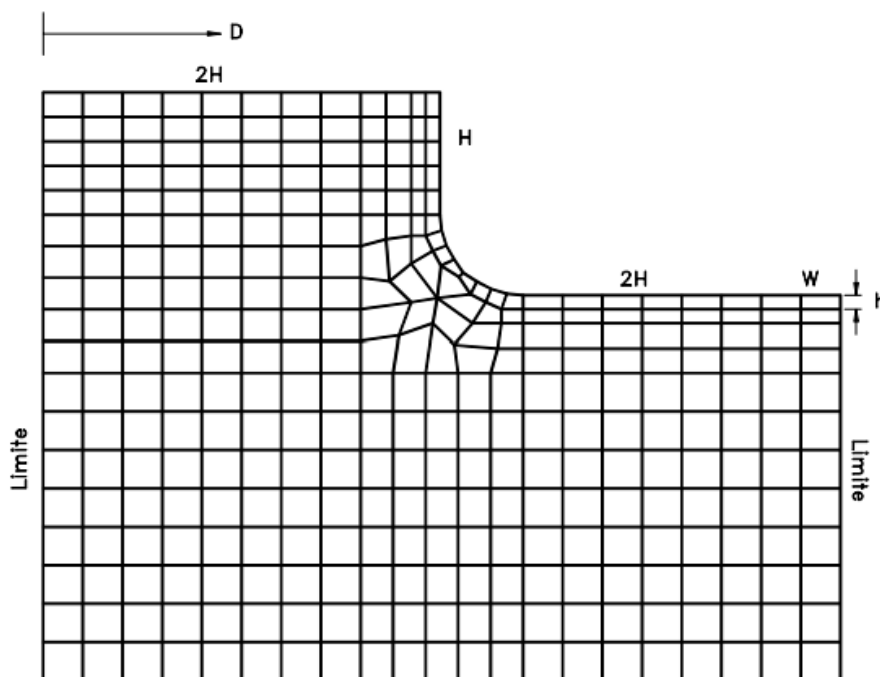


Figura 20. Malla típica para el análisis de un talud vertical por elementos finitos

Nota. Adaptado de *Deslizamientos de Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (p. 135), por Suarez (1998)

Existe en la literatura una gran cantidad de sistemas de elementos finitos con sus respectivos programas de computador, especialmente para taludes en roca, donde los defectos geológicos de la roca, más que la resistencia de la roca en sí, controlan la estabilidad de un talud determinado. Los modelos numéricos son muy útiles para analizar fallas en las cuales no existe una superficie continua de cortante como es el caso de las fallas por “volteo”. La incorporación de los defectos o discontinuidades dentro del modelo permiten estudiar el comportamiento del talud. Los elementos finitos pueden emplearse para estudiar las diversas posibilidades de falla en un talud con juntas o para encontrar los efectos de varios sistemas de estabilización para el estudio en casos generales, donde las propiedades de los suelos o rocas y condiciones de frontera se pueden suponer. (Suarez, 1998, p.135)

2.2.1.6. Modelación física en fenómenos geotécnicos.

La modelación física en el mundo actual se ha convertido en parte esencial del diseño de estructuras y en las investigaciones del fenómeno de interacción entre estructuras y masa de suelo o roca. Desde el año 1981 se han organizado en congresos mundiales la socialización de los resultados de estas investigaciones, así, la Sociedad Internacional de Mecánica de suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), con su Comité Técnico (TC2), bajo la dirección británica de Andrew Schofield organizó en el año 1985 las primeras conferencias de investigaciones en centrífugas. Durante los años 1998 a 2001, bajo la dirección de Kenji Ishihara la ISSMGE extendió y modificó el nombre de TC2 por el de “Ensayos en Modelación Física y Centrífuga”, creándose desde entonces la Conferencia Internacional en Modelación Física en Geotecnia (ICPMG). Otros eventos de importancia en el tema se registran en la Tabla 13 (Torres, 2008). En el último encuentro ICPMG celebrado en Hong Kong en el año 2006 y organizado por la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong (HKUST), se presentaron 239 artículos y

ponencias de investigaciones en el área, de 30 países del mundo. La próxima conferencia 7th ICPMG se llevarán a cabo en el año 2010 en la ciudad de Zúrich. (Torres, 2008, p.51)

Tabla 13

Eventos internacionales de investigación con modelos físicos en geotecnia

Eventos	Año	Lugar
Small Conference on Centrifuge Testing	1985	Inglaterra
Centrifuge 88 1st International conference	1990	París
Centrifuge 91 2nd International conference	1991	Boulder
Centrifuge 94 3rd International conference	1994	Singapur
Centrifuge 98 4th International conference	1998	Tokio
ICPMG' 02 International Conference on Physical Modelling in Geotechnics	2002	Newfoundland
ICPMG' 06 International Conference on Physical Modelling in Geotechnics	2006	Hong Kong

Nota. Adaptado de *Principios de estudios de fenómenos geotécnicos complejos a través de modelos* (p. 61), por Torres (2008)

Fundamentos básicos en la modelación física por el método de materiales equivalentes

La teoría de análisis dimensionales entre sistemas se encuentra definida en el teorema de Buckingham: “Si una ecuación es dimensionalmente homogénea, ella puede ser reducida a una relación entre un completo conjunto de productos dimensionales”. Lo cual fue demostrado por una rigurosa demostración matemática por Langhaar (1951). (Torres, 2008. p.51)

El método de materiales equivalentes desarrollado desde los años 30, consiste en utilizar materiales artificiales dentro de un modelo que en escala reducida tengan un comportamiento mecánico similar al del suelo en escala natural; desde el modelo, se podrá extrapolar resultados para poder predecir comportamientos del objeto real en estudio. (Torres, 2008, p.51)

Torres (2008), menciona “El paso del objeto real al modelo físico debe realizarse con determinadas reglas. Estas reglas fundamentan la teoría de la semejanza”(p.52)

La pregunta acerca de las condiciones de semejanza es una de las más importantes en los modelos físicos. Fenómenos semejantes son aquellos que suceden en sistemas geométricos semejantes; es decir, si los procesos suceden en todos los puntos similares geométricos, en momentos similares del tiempo con una relación más o menos constante de magnitud. (Torres, 2008, p.52)

Torres (2008) “Para la modelación de cualquier fenómeno mecánico es suficiente establecer el valor de magnitud de tres unidades fundamentales: longitud, tiempo y masa” (p.52)

Una vez establecidas las magnitudes de estos tres parámetros, es muy fácil obtener los demás parámetros de la modelación (fuerza, cargas, esfuerzos, velocidad, etc.) (Torres, 2008, p.52)

La semejanza geométrica se establece a través del factor de escala con la relación entre la dimensión del modelo y el objeto real:

Ecuación 41. Relación para escala geométrica.

$$\frac{l_n}{l_m} = a_l \quad (41)$$

Dónde: l_n y l_m son las medidas longitudinales natural y en el modelo respectivamente.

Similarmente la semejanza cinemática o temporal se da con la relación de tiempos:

Ecuación 42. Relación para escala cinemática o de tiempo.

$$\frac{t_n}{t_m} = a_t \quad (42)$$

La semejanza material se da con la relación entre densidades ρ que incluye a las masas y a los volúmenes.

Ecuación 43. Relación para escala de densidad.

$$\frac{\rho_n}{\rho_m} = a_\rho$$

Torres (2008) "Utilizando las anteriores magnitudes se pueden obtener las relaciones de semejanza para cualquier parámetro del sistema mecánico"(p.52)

El más general de los casos, del cual todos los demás se derivan como casos particulares, es el caso de semejanza simple. Las ecuaciones fundamentales que rigen la semejanza simple en condiciones estáticas son:

$$\begin{aligned} \frac{a_p}{a_E} \cdot a_l^2 &= 1; & \frac{a_M}{a_E} \cdot a_l^2 &= 1; & a_\gamma \cdot \frac{a_l}{a_E} &= 1 \\ \frac{a_q}{a_E} &= 1; & \frac{a_u}{a_l} &= 1; & a_\phi \cdot \frac{a_l}{a_E} &= 1 \end{aligned}$$

Donde a_E expresa el factor de escala de los módulos elásticos, a_m es el factor de escala entre momentos, a_r es la relación entre pesos específicos, a_p es la relación entre fuerzas, a_q es la relación entre cargas distribuidas, a_u es la relación de desplazamientos y a_ϕ es la relación de fuerzas volumétricas. (Torres, 2008, p.52)

Las seis anteriores ecuaciones contienen ocho escalas, por consiguiente, dos escalas se pueden elegir arbitrariamente y las demás deben ser determinadas a partir de las ecuaciones mencionadas, generalmente se seleccionan las escalas a_l y a_p arbitrariamente.

La escala a_l Se define por la capacidad dimensional de las paredes de prueba donde se construye el modelo del objeto real.

Si se define con antelación la escala, a_p se hace necesario diseñar y caracterizar las diferentes mezclas de suelo artificial y crear una curva donde se especifiquen las propiedades mecánicas de cada mezcla, es decir, se deben determinar los cambios en las propiedades físico mecánicas de mezclas de suelos artificiales en dependencia con la proporción de los materiales

que las constituyen, en donde los suelos artificiales se asemejen a las características mecánicas de un suelo real para su modelación física, respetando las leyes de semejanza en el campo gravitacional de 1g (una gravedad). (Torres, 2008, p.52)

Tabla 14

Escalas de modelación para diferentes parámetros en estudios geotécnicos

Parámetro	Unidad de Medida	Convención	Dimensión	Escala
Dimensiones geométricas	m	l	L	a_l
Tiempo	s	t	T	a_t
Densidad	$N \cdot s^2/m^4$	ρ	$P \cdot L^{-4} \cdot T^2$	a_ρ
Fuerza Puntual	N	P	P	$a_P = a_\rho \cdot a_l^4 / a_t^2$
Carga Repartida	N/m^2	q	$P \cdot L^{-2}$	$a_q = a_\rho \cdot a_l^2 / a_t^2$
Presión, Módulo Elástico, Esfuerzo	Pa	Q, E, σ	$P \cdot L^{-2}$	$a_Q = a_E = a_\sigma = a_\rho \cdot a_l^4 / a_t^2$
Coeficiente de Poisson	-	ν	L	a_ν
Deformación Relativa	-	ε	l	a_ε
Peso Volumétrico, Fuerzas Volumétricas	N/m^3	γ, Φ	$P \cdot L^{-3}$	$a_\gamma = a_\Phi = a_\rho \cdot a_l / a_t^2$
Desplazamientos	m	u	L	$a_u = a_l$
Período de oscilación	s	T_o	T	$a_{T_o} = a_t$
Velocidad de desplazamientos, propagación de onda	m/s	V, C	$L \cdot T^{-1}$	$a_V = a_C = a_l / a_t$
Ángulo de Fricción Interna	°	Φ	-	a_Φ
Coeficiente de fortaleza	-	f	l	a_f

Nota. Adaptado de *Principios de estudios de fenómenos geotécnicos complejos a través de modelos* (p. 53), por Torres (2008)

Para la ejecución de un modelo físico por el método de materiales equivalentes de un proceso geotécnico o de una estructura en particular se requieren de laboratorios especiales dotados con paredes o marcos de prueba y provistos de los instrumentos de medida necesarios y de registro de datos, para almacenar los cambios de los parámetros estudiados, los marcos

deberán tener dimensiones determinadas para garantizar la escala geométrica seleccionada.

(Torres, 2008, p.53)

2.2.2. Definición Operacional

El plan operativo de esta investigación se basó en lo siguiente.

- La aplicación de técnicas específicas para la recolección, análisis y validación de datos tanto experimentales como numéricos.

- La ejecución de tareas de acuerdo a la viabilidad técnica y temporal del proyecto para cumplir con los objetivos específicos.

- El uso de los recursos disponibles para obtener y analizar los resultados de los modelos físico y numérico, con el fin de contrastar las hipótesis planteadas.

2.2.2.1. FASE 1: Procedimiento de campo.

La investigación se desarrolló considerando una condición específica de suelo, la cual será seleccionada tras la caracterización del talud.

La fase de exploración en campo se realizó en conformidad con la norma E.050 para exploraciones en campo. El procedimiento consistió en la extracción de muestras a cielo abierto, asegurando la correcta obtención de especímenes tanto alteradas como inalteradas. Las muestras obtenidas de las calicatas fueron enviadas al laboratorio de la universidad para llevar a cabo los ensayos estándares y especiales. Se elaboró el perfil estratigráfico según lo especificado en este informe, en conformidad con las normativas vigentes.

Exploración en Campo. Análisis de 02 calicatas para el muestreo, una en el tajo abierto del talud existente y la última en el pie de talud.

Muestreo y registros de exploración. Las muestras obtenidas fueron protegidas. Para luego llevar al laboratorio donde se podrá obtener sus propiedades y características físico-

mecánicas, antes se realizó una inspección visual y descripción de los estratos, incluyendo color, espesor de estratos y granulometría, además de medir la humedad con muestras en bolsas herméticas.

2.2.2.2. FASE 2: Procedimiento de Gabinete y Laboratorio

Ensayos de laboratorio. Se desarrollaron ensayos estándar de clasificación para cada muestra y ensayos especiales para la obtención de parámetros mecánicos del suelo escogido. Todo en base a la normativa vigente.

Tabla 15
Ensayos a realizar.

Descripción del ensayo	Datos a obtener	Unidad	Normativas	Objetivo
Contenido de humedad	Porcentaje de humedad	%	NTP 339.127	Clasificación de Suelos
Análisis granulométrico	Material retenido	%	NTP 339.128	
	Material pasante	%		
	Límite líquido	%		
Límites de consistencia	Límite plástico	%	NTP 339.129	
	Índice de plasticidad	%		
Clasificación: H.R.B. y SUCS	H.R.B. SUCS	Descripción Descripción	NTP 339.134	
Densidad mínima	Densidad mínima (yd min)	g/cm3	NLT-204	Definir nivel de compactación en seco
Densidad máxima	Densidad mínima (yd máx.)	g/cm3	NLT-205	
			NTP 339.141	Para compactación óptima de material
Proctor modificado	% Humedad optimo	%	MTC E 115	
Triaxial UU	Esfuerzo desviador	kg/cm2	ASTM D2850	Obtención de propiedades mecánicas (c, Φ y E)
	Deformación	mm		
Triaxial en Seco	Esfuerzo desviador	kg/cm2	Referencia: Bishop & Henkel (1962)	Obtención de propiedades mecánicas (c, Φ y E)
	Deformación	mm		

Nota. Fuente: Elaboración propia.

2.2.2.3. FASE 3: Modelamiento numérico.

Análisis de modelo prototipo en Plaxis 2D.

El estudio se centró en una en condición de suelo parcialmente saturada. El análisis numérico se ejecutó de forma secuencial: primero, se simularon las fases constructivas para determinar los desplazamientos iniciales; segundo, se analizaron los esfuerzos en cada configuración para definir la separación óptima que garantiza la independencia estructural; y finalmente, se evaluó la capacidad de carga y los desplazamientos del sistema bajo una carga aplicada en la corona del talud.

Procedimiento para creación de modelos en Plaxis.

-Definición de Geometría. Se importó la sección del talud y la disposición de los muros desde un archivo de AutoCAD a Plaxis 2D.

-Modelo de Suelo. Se asignaron las propiedades del suelo utilizando el modelo constitutivo Hardening Soil, calibrado con los resultados de los ensayos de laboratorio.

-Modelado de Muros. Para creación y representación de muros de concreto armado se crea la geometría de estos con interfaces alrededor, por otro lado, para el análisis de esfuerzos se representaron a través de elementos tipo Plates también con interfaces.

-Aplicación de Carga. Se generó una platea rígida para la aplicación de carga.

-Generación de malla. Se procedió con la creación de malla, realizando un refinamiento en las interfaces y en otras zonas críticas.

-Cálculo por fases. Se detallan las fases constructivas y de carga, incluyendo la etapa “Safety” para obtener el factor de seguridad.

-Monitorio de resultados. Se colocaron puntos de análisis a lo largo del talud para analizar los desplazamientos.

Este procedimiento se repitió para cada una de las separaciones estudiadas (1.5 m, 3.0 m, 4.5 m y 6.0 m) hasta determinar el comportamiento óptimo del sistema.

Análisis Complementario para Generalización de Resultados

Adicionalmente, para explorar una posible generalización de los hallazgos, se realizó un análisis numérico complementario para muros con alturas de 6.0 m y 8.0 m. Utilizando el mismo criterio de independencia basado en el análisis de esfuerzos, se evaluaron distintas separaciones para estas nuevas geometrías con el fin de investigar si la distancia óptima guardaba una relación directa y consistente con la altura del muro.

Análisis de modelo numérico a escala en Plaxis 3D.

Para validar y complementar los resultados del modelo físico a escala, se desarrolló un modelo numérico tridimensional en PLAXIS 3D. El análisis se enfocó en simular la respuesta del sistema y el mecanismo de falla bajo la carga aplicada en la corona del talud. La creación del modelo sigue los pasos del modelo prototipo, con la diferencia fundamental de que los parámetros del suelo se calibraron para una condición seca, en concordancia con el estado del material definido para el ensayo físico a escala reducida.

2.2.2.4. FASE 4: Construcción del Modelo a escala.

Luego de haber elaborado los modelos numéricos para todas las condiciones de separación y haber obtenido la distancia óptima de separación, se procederá a la construcción del modelo físico a escala reducida.

Escalamiento según Teoría de Semejanza.

Es importante tener principal cuidado al escalar las condiciones expuestas, de esto depende la fidelidad de los resultados con respecto al prototipo.

-Escalamiento de Longitud $\frac{l_n}{l_m} = a_l$: Es imperante destacar que la escala del modelo está restringida a las medidas del **equipo universal de compresión** para controlar la carga ejercida en el modelo a escala reducida.

-Escalamiento de Masa $\frac{\rho_n}{\rho_m} = a_\rho$: Se respetará la relación peso/volumen tanto para los muros de concreto como para el terreno.

-Escalamiento de Tiempo $\frac{t_n}{t_m} = a_t$: A los sistemas en movimiento con similaridad geométrica se les considera en similaridad cinemática.

En base a esto se podrá escalar condiciones más complejas como, desplazamientos y esfuerzos, datos relevantes en esta investigación.

Construcción de la estructura de la probeta

Se elaboró un procedimiento ideal a escala reducida con el objetivo de visualizar las características de desempeño interno del suelo durante los ensayos de compactación, la formación del talud a escala y el ensayo de carga en el talud.

Una vez montada la estructura mediante soldadura (utilizando ángulos y placas de acero), se procedió a colocar el vidrio laminado, previa medición interna y corte en fábrica.

Antes de esto, se aplicó cinta de doble contacto para mitigar el impacto de la carga lateral generada por el relleno durante la compactación del suelo.

FASE 5. Experimentación en modelo a escala reducida.

Se comienza con el armado del modelo compactando el material seco y colocando los muros en base a la disposición a analizar previamente calculada, se experimenta para distintas disposiciones de separación entre muros logrando la falla de talud gracias al equipo universal, observando así el círculo de falla y desplazamientos previos a este.

Hecho esto procedió con el llenado de fichas de recolección de datos.

2.2.3. Definición de Términos Básicos

Modelación Física: El estudio de fenómenos geotécnicos mediante la construcción de un modelo a escala reducida, que debe cumplir con leyes de semejanza para poder extrapolar los resultados al objeto real (Torres, 2008).

Teoría de la Semejanza: El conjunto de reglas y condiciones que aseguran que los eventos en un modelo a escala y en el objeto real cumplan con las mismas leyes físicas y relaciones matemáticas, permitiendo una comparación válida (Torres, 2008).

Método de Materiales Equivalentes: Una técnica de modelación física que consiste en usar materiales artificiales en el modelo a escala, cuyas propiedades mecánicas se comportan de manera similar a las del suelo en escala natural (Torres, 2008).

Modelación Numérica (o Matemática): El uso de herramientas computacionales y métodos matemáticos para resolver problemas de alta complejidad, como los fenómenos geotécnicos, que son difíciles de analizar con métodos analíticos tradicionales (Potts & Zdravkovid, 1999).

Método de los Elementos Finitos (FEM): Una técnica numérica que consiste en dividir (discretizar) un dominio complejo (como el terreno) en una malla de elementos más pequeños y simples (la malla), para luego resolver las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de todo el sistema (Potts & Zdravkovid, 1999).

Modelo Constitutivo (Constitutive Model): La relación matemática que describe el comportamiento del material, específicamente la relación entre los esfuerzos y las deformaciones. Es el ingrediente que une el equilibrio y la compatibilidad (Potts & Zdravkovid, 1999).

Talud estabilizado. Un talud estabilizado es una ladera o pendiente cuya estabilidad ha sido mejorada mediante técnicas de ingeniería para prevenir deslizamientos o erosión. Esto se logra aplicando métodos geotécnicos y estructurales que aumentan la resistencia del suelo y disminuyen las fuerzas desestabilizadoras (Suarez, 1998).

Comportamiento mecánico. El comportamiento mecánico se refiere a la forma en que un material responde a las fuerzas externas.

Comportamiento mecánico del talud. El comportamiento mecánico del talud se refiere a cómo una pendiente de terreno, ya sea natural o artificial, responde a las fuerzas que actúan sobre ella, como la gravedad, el agua o las cargas externas.

Muros de concreto armado. Estas estructuras son capaces de resistir los movimientos del suelo debido a las presiones de la tierra sobre el muro, y este a su vez se apoya en una cimentación por fuera de la masa inestable.

Muros escalonados. También conocidos como muros aterrazados o en gradas (*tiered retaining walls* en inglés), son un sistema de contención que utiliza una serie de dos o más muros de retención individuales, dispuestos uno detrás de otro a diferentes elevaciones para estabilizar un talud (Block, 2018).

Factor de Seguridad (FS): La relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas actuantes. Un valor de FS mayor a 1 indica una condición estable; un valor cercano o menor a 1 indica inestabilidad inminente o falla (Suarez, 1998).

Capacidad de Carga Última. Se refiere a la máxima presión o carga por unidad de área o longitud que el suelo o un sistema suelo-estructura puede soportar sin presentar una falla por corte o un asentamiento excesivo. Es el estado límite de resistencia del sistema (Bowles, 1986).

2.3. Hipótesis.

2.3.1. Hipótesis general

La distancia de separación entre muros escalonados de concreto armado influye significativamente en el comportamiento mecánico de un talud en suelo areno-limoso, postulándose que existe una separación óptima en la cual los muros alcanzan un comportamiento independiente, maximizando así la estabilidad del conjunto, Cusco, 2024.

2.3.2. Hipótesis específica

A medida que aumenta la distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado, el factor de seguridad global del talud en suelo areno-limoso, mejora significativamente, Cusco, 2024.

La distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado tiene un efecto directo en la reducción de los desplazamientos del talud en suelo areno-limoso, tal como se observa en los modelos físico y numérico, Cusco, 2024.

La distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado tiene un efecto directo en el aumento en la capacidad de carga de talud en suelo areno-limoso, tal como se observa en los modelos físico y numérico, Cusco, 2024.

2.4. Identificación de variables e indicadores.

2.4.1. Identificación de Variables.

Variable Independiente (X): **Separación** entre muros escalonados de C. A (Se manipula)

Variables Dependientes (Y): **Comportamiento mecánico del talud.**

Dimensiones de Y: Factor de seguridad (F.S), Desplazamientos y Capacidad de carga.

2.4.2. Operacionalización de variables

Tabla 16*Matriz de operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ITEM
<i>Y: Comportamiento Mecánico del Talud.</i>	Respuesta del sistema suelo-estructura ante solicitaciones de carga, descrita en términos de su estabilidad, resistencia y patrones de deformación.	El análisis del comportamiento mecánico se dividió en dos etapas. Primero, se evaluó la estabilidad del sistema a través Factor de Seguridad (F.S.) mediante el método de reducción de parámetros c-φ en el software Plaxis. Segundo, se estudió la respuesta ante carga, aplicando una solicitud progresiva en la corona del talud para medir su capacidad de carga máxima y registrar los desplazamientos generados. Finalmente, este comportamiento ante carga fue validado experimentalmente mediante un modelo físico a escala reducida.	Estabilidad	Factor de Seguridad Global Estático	Adimensional
			Desplazamientos	Desplazamientos horizontales	m
				Desplazamientos verticales	m
			Capacidad de carga	Sobrecarga (M. numérico)	kN/m/m
				Carga puntual (M. escala)	Kg
<i>X: Separación entre muros escalonados de C. A</i>	Se refiere a la distancia horizontal medida entre muros de contención escalonados dispuestos de forma sucesiva en un talud.	Se define operacionalmente como el conjunto de distancias horizontales preestablecidas (1.5 m, 3.0 m, 4.5 m, y 6.0 m) que fueron configuradas como geometrías distintas en el software PLAXIS y construidas en el modelo físico para cada uno de los escenarios de análisis.	Separación	Distancia de separación	m

Nota. Fuente: Elaboración propia.

3. METODOLOGÍA.

3.1. Alcance de estudio.

La presente investigación es de nivel **“Explicativo”** porque busca identificar y comprender las **causas** y los **efectos** relacionados con el comportamiento mecánico del talud al variar la separación entre los muros escalonados. A través de los **modelos físico y numérico**, la investigación no sólo pretende describir los fenómenos observados, sino también **explicar** cómo y por qué la distancia entre los muros influye en la estabilidad del talud, proporcionando una comprensión profunda de las **relaciones causales** involucradas.

Menciona que el alcance explicativo tiene la característica de establecer causa – efecto entre sus variables, son más profundas y estructuradas a diferente de los alcances previos. Existen las variables independientes (causas) y las variables dependientes (efectos) y las hipótesis se pueden plantear de forma que se establezca causalidad. (Sampieri, Fernández, Baptista, 2014)

3.2. Diseño de la investigación.

Según el diseño de investigación se trata de un enfoque **“Experimental”**, ya que se manipula la **variable independiente** (la separación entre los muros escalonados) con el objetivo de determinar la **distancia óptima** que permita un comportamiento independiente de los muros de contención. En cada experimento, se verificará el **comportamiento mecánico del talud** mediante la implementación de un **modelo físico a escala reducida** y su correspondiente **modelo numérico**, lo que permitirá comparar y validar los resultados obtenidos en ambos enfoques.

Sampieri et al. (2014) afirman que un modelo o diseño experimental se define como un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes (supuestas

causas) para analizar las consecuencias que esta manipulación tiene sobre una o más variables dependientes (supuestos efectos), dentro de una situación de control para el investigador.

La esencia de un experimento es que requiere la manipulación intencional de una acción para analizar sus posibles resultados. El investigador genera deliberadamente una situación para estudiar sus efectos, a diferencia de la investigación no experimental, donde los fenómenos solo se observan en su ambiente natural. (Sampieri et al., 2014)

Para que un estudio sea considerado un experimento "puro", debe cumplir con tres requisitos fundamentales. **Manipulación intencional** de una o más variables independientes, **medición del efecto** que la variable independiente tiene sobre la variable dependiente y **control o validez interna** de la situación experimental, lo que asegura que los resultados se deban a la manipulación y no a otros factores. (Sampieri et al., 2014)

El tipo o enfoque de la investigación es “**Cuantitativa**”, porque el desarrollo de la misma representa un conjunto de procesos, siendo secuencial y probatoria, además posee la imperante necesidad de medir y estimar magnitudes de los fenómenos o problemas de investigación.

Sampieri et al. (2014) Afirma. El enfoque cuantitativo (que representa, como dijimos, un conjunto de procesos) es secuencial y probatorio. Cada etapa precede a la siguiente y no podemos “brincar” o eludir pasos. El orden es riguroso, aunque desde luego, podemos redefinir alguna fase. Parte de una idea que va acotándose y, una vez delimitada, se derivan objetivos y preguntas de investigación, se revisa la literatura y se construye un marco o una perspectiva teórica. De las preguntas se establecen hipótesis y determinan variables; se traza un plan para probarlas (diseño); se miden las variables en un determinado contexto; se analizan las mediciones obtenidas utilizando métodos estadísticos, y se extrae una serie de conclusiones.

En cuanto a su finalidad es “**Aplicada**”, porque el desarrollo de esta investigación está dirigida a resolver un problema ingenieril real y los resultados obtenidos pueden ser aplicados a futuros proyectos de infraestructura, optimizando seguridad y siendo un punto de partida clave en la planificación urbana.

Sampieri et al. (2014) afirma: La Investigación aplicada se abastece por el tipo básico o puro, ya que, mediante la teoría, se encarga de resolver problemas prácticos, se basa en los hallazgos, descubrimientos y soluciones que se planteó en el objetivo del estudio, normalmente este tipo de investigación se utiliza en la medicina o ingenierías. Los alcances que se pueden plantear aquí son explicativos o predictivos.

3.3. Población de estudio.

Se estudiará el comportamiento mecánico del talud para diferentes disposiciones de muros escalonados en condición de **suelo areno-limoso**, el lugar donde se encuentra mencionada combinación de suelo es en el Pasaje Mirador, perteneciente a la Asociación Pro-Vivienda Diego Quispe Tito, en el distrito de San Sebastián, Cusco. Este sector cuenta con 80 metros lineales de talud expuesto con más de 10 metros de altura.

La elección de este suelo se fundamenta tanto en su **representatividad geológica**, al ser un material areno-limoso característico de la formación San Sebastián que predomina en las laderas inestables de Cusco, como en su **idoneidad experimental**, ya que cumple con las propiedades geotécnicas necesarias para ser ensayado de manera fiable en un modelo físico a escala reducida.

3.4. Tamaño de muestra.

(Sampieri et al., 2014, p.175) Afirma: En las muestras probabilísticas, todos los elementos de la población tienen la misma posibilidad de ser escogidos para la muestra y se

obtienen definiendo las características de la población y el tamaño de la muestra, y por medio de una selección aleatoria o mecánica de las unidades de muestreo/análisis.

Según Sampieri et al. (2014) "En las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o los propósitos del investigador. (p.176)

La investigación utiliza una **muestra no probabilística**, lo que implica que la selección de la muestra no se realiza a partir de fórmulas de probabilidad, sino mediante decisiones tomadas por el investigador, basadas en criterios específicos vinculados a los objetivos del estudio. En este caso, se ha seleccionado una geometría de talud de 10 metros de alto con suelo areno-limoso, donde se dispondrán los 3 niveles de muros escalonados para su análisis. En este sentido **se dispone adoptar una altura constante de 10 metros para todos los modelos con diferentes separaciones entre muros escalonados de concreto armado.**

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Las técnicas empleadas en la investigación contemplan tanto fuentes primarias como secundarias. Las fuentes primarias se utilizarán para comparar los análisis y cálculos que faciliten el desarrollo de los resultados. La recolección de datos se llevará a cabo mediante los siguientes instrumentos.

Observación directa: En vista que será necesario el uso de formatos de toma de datos para los ensayos geotécnicos.

Ensayos de Laboratorio: Se realizarán ensayos en muestras de suelo con el fin de determinar propiedades geotécnicas como la cohesión, el ángulo de fricción, la densidad y la compacidad, lo cual permitirá caracterizar el suelo en el área de estudio.

- Fichas técnicas para recolección y análisis de datos de EMS.

- Fichas técnicas para procesamiento de resultados en laboratorio.

Modelos a Escala: Se emplearán modelos físicos a escala reducida para simular el comportamiento del talud y su interacción con los muros escalonados, observando su respuesta bajo diferentes condiciones de carga y separación.

Simulación Numérica: Se utilizará software especializado, como PLAXIS, para realizar simulaciones numéricas que evalúen el comportamiento del talud y de los muros en distintos escenarios, ofreciendo un análisis más detallado.

Revisión Bibliográfica: Se llevará a cabo una revisión de la literatura existente sobre muros de contención, técnicas de estabilización de taludes y estudios previos relacionados, con el objetivo de establecer un marco teórico y contextualizar la investigación.

3.6. Validez de instrumentos.

3.6.1. Validez.

Para esta investigación se aplicó el método de **validez de contenido**, con el objetivo de asegurar que los instrumentos de recolección de datos fueran pertinentes y adecuados. El proceso se centró en la revisión de los formatos de registro para los ensayos de laboratorio (clasificación, compactación y mecánicos) y la ficha de medición de desplazamientos bajo carga en el modelo físico a escala reducida.

La validación se realizó mediante el **juicio de expertos** en geotecnia e ingeniería civil, quienes evaluaron y confirmaron que dichos instrumentos reflejan correctamente las variables de interés y garantizan la captura de fenómenos observados, como los patrones de desplazamiento y los mecanismos de falla

Asimismo, se utilizó la **validez de criterio**, comparando los resultados obtenidos con los instrumentos del modelo físico a escala con los resultados del modelo numérico en Plaxis. Este

modelo numérico actúa como un criterio estándar y reconocido en estudios geotécnicos. A través de la correlación de desplazamientos, el círculo de falla y la carga última entre ambos modelos, se verificó que los instrumentos de medición utilizados fueran representativos.

3.7. Plan de Análisis de Datos.

El presente plan de análisis de datos describe la secuencia sistemática para procesar e interpretar la información recolectada en cada fase de la investigación, con el fin de cumplir con los objetivos planteados. Se utilizará el software Microsoft Excel para la tabulación de datos de laboratorio y la elaboración de gráficos, y el software **PLAXIS** para la obtención de resultados de los modelos numéricos.

Análisis de datos de Laboratorio: Se procesaron los datos de los ensayos de caracterización (Fase II) siguiendo las Normas Técnicas y bibliografía correspondientes. La calibración de los parámetros para el modelo Hardening Soil se realizó a partir de los ensayos triaxiales, siguiendo las formulaciones teóricas y las recomendaciones del manual de materiales de Plaxis

Análisis del Modelo Prototipo: Se analizaron sistemáticamente los resultados del modelo numérico prototipo (Fase III), evaluando esfuerzos, Factor de Seguridad, desplazamientos y capacidad de carga para cada separación, con el fin de identificar la distancia óptima que cumple con los objetivos de la investigación

Análisis de Validación: Finalmente, se realizó la validación metodológica (Fase IV y V) contrastando las curvas Carga vs. Deformación del modelo físico y el modelo numérico a escala.

3.8. Recolección de datos.

3.8.1. Caracterización del talud.

La presente investigación comprende una fase inicial correspondiente a la exploración de campo, donde se caracteriza un talud ubicado en el Pje. Mirador en el distrito de San Sebastián Cusco, y de ahí se selecciona el material a estudiar con el que además de realizar ensayos de caracterización, se realizan ensayos especiales de laboratorio para determinar sus propiedades mecánicas.

Ubicación: Pasaje Mirador, perteneciente a la Asociación Pro-Vivienda (APV) Diego Quispe Tito, en el distrito de San Sebastián a 4.17km de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco con coordenadas.

Longitud: $71^{\circ}57'35.40''\text{O}$

Latitud: $13^{\circ}31'23.14''\text{S}$



Figura 21. Ubicación del talud en Pje. Mirador, San Sebastián Cusco, Perú

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado por Google Earth.

Se observó que el talud presenta una estratigrafía variada. Para el desarrollo de la presente tesis, se planteó identificar la composición total del talud y, posteriormente, seleccionar el material de interés.



Figura 22. Talud descubierto en Pje. Mirador

Nota. Fuente: Elaboración propia.



Figura 23. Estratos visibles en el talud.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Se tomó como referencia la norma E050 para exploración de campo, así como la extracción de muestras y descripción de las mismas.

Se realizaron 4 muestreos del perfil de talud existente.

Muestreo y registro de exploración: Mediante inspección visual, se realizó una descripción de las características físicas in situ, número de estratos, espesores de estratos, granulometrías aproximadas, presencia de napas freáticas, etc. Además, se extrajo muestras con bolsas herméticas para tener un control sobre el contenido de humedad y realizar una clasificación más precisa.

Cabe mencionar que el talud se encontraba completamente expuesto y aún en proceso de excavación, debido a que se venía ejecutando un proyecto que consistía en la construcción de muros de contención escalonados, la misma que sirvió como idea de referencia para el presente trabajo de investigación.

Recursos designados para la primera fase: La exploración de campo estuvo conformada por ambos tesisistas, el ingeniero residente a cargo de la obra y dos peones que ayudaron en la extracción de muestras. Para la recolección y traslado del material se utilizaron herramientas manuales como picos, palas y carretillas.

Análisis del registro del perfil estratigráfico: El talud en estudio se encuentra completamente expuesto y corresponde a un corte realizado para trabajos preliminares de construcción. A lo largo de todo el tramo se observa una estratigrafía similar en cuanto a la composición del suelo, aunque con variaciones en el espesor de los estratos. La disposición de los horizontes muestra una inclinación descendente a lo largo del eje longitudinal del talud, lo cual indica una pendiente natural del terreno.



Figura 24. Exploración geotécnica, extracción de muestras.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Las muestras fueron trasladadas al laboratorio de mecánica de suelos de la FIC/UNSAAC con la finalidad de desarrollar los ensayos estándares y especiales.

3.8.2. Ensayos para la determinación de las características físicas del suelo

Clasificación del suelo. La clasificación del suelo se lleva a cabo empleando el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Para ello, se realizan ensayos de análisis

granulométrico y se determinan los índices de plasticidad, lo que permite identificar el tipo de suelo según sus características texturales y comportamiento plástico.

Análisis granulométrico por tamizado (NTP 339.128). El análisis granulométrico mediante tamizado se realiza sobre una muestra representativa del suelo, con el objetivo de determinar la distribución porcentual de las partículas que la componen. Consiste en hacer pasar el material seco por una serie de tamices de diferente abertura, hasta alcanzar el tamiz N° 200 (con abertura de 0.074 mm), obteniéndose así la proporción relativa de cada fracción granulométrica.

Equipos y Materiales. Balanzas, Horno, Tamices, Envases y Cepillo. Según el manual de ensayo de materiales la serie de tamices de malla cuadrada.

Procedimiento del ensayo. El análisis granulométrico se llevó a cabo mediante el método por vía húmeda. Inicialmente, la muestra fue lavada sobre el tamiz N° 200 con el propósito de separar los finos adheridos a las partículas más gruesas. Posteriormente, el material retenido fue secado en horno a una temperatura constante durante 24 horas. Una vez seca la muestra, se procedió con el tamizado mecánico, realizando movimientos circulares y laterales que aseguraran una adecuada separación de las partículas. Finalmente, se pesó la cantidad de suelo retenido en cada tamiz utilizando una balanza de precisión, lo que permitió calcular la distribución porcentual de cada fracción granulométrica.

Procesamiento de datos. Para el tratamiento de los resultados del ensayo, se calcula inicialmente el porcentaje de material que pasa por el tamiz de 0.074 mm (malla N° 200), y además se determina el porcentaje de material retenido en cada tamiz, así como el porcentaje acumulado que pasa por cada uno. Estos valores se obtienen aplicando las siguientes fórmulas:

Ecuación 44. % que pasa la malla #200

$$\%pasa\ N^{\circ}200 = \frac{Peso\ total - Peso\ retenido\ Malla\ N^{\circ}200}{Peso\ total} \times 100 \quad (44)$$

Ecuación 45. % Retenido por tamiz. Y % que pasa.

$$\% \text{Retenido} = \frac{\text{Peso retenido en el Tamiz}}{\text{Peso total}} \times 100 \quad (45)$$

$$\% \text{Pasa} = 100 - \% \text{Retenido Acumulado}$$

Con estos datos se procede a graficar la curva granulométrica.



Figura 25. Cuarteo de muestras del talud, material S1, S2, S3 y S4.

Nota. Fuente: Elaboración propia.



Figura 26. Lavado de material para ensayos de clasificación

Nota. Fuente: Elaboración propia.



Figura 27. Granulometría de material S1 y S2

Nota. Fuente: Elaboración propia.



Figura 28. Granulometría de material S3 y S4

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Determinación del Límites de Atterberg (Norma NTP 339.129).

Límite líquido.

El ensayo de límite líquido se realiza con el objetivo de correlacionar las propiedades del suelo con parámetros fundamentales como la compresibilidad, la permeabilidad y la resistencia al corte. Este ensayo es esencial para establecer el comportamiento plástico del suelo y

constituye una parte fundamental en su clasificación según los sistemas SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos) y AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials).

Equipos y Materiales. Recipiente de porcelana, cuchara de casagrande, acanalador, cápsulas, balanza, horno y espátula.

Procedimiento del ensayo. Se selecciona una muestra representativa del suelo, con un peso aproximado entre 150 y 200 gramos, previamente tamizada por el tamiz N° 40. A la muestra se le añade una cantidad determinada de agua, mezclándola hasta obtener una masa homogénea. Posteriormente, una porción del material preparado se coloca en la copa del dispositivo de Casagrande, formando una superficie nivelada. Con el uso del acanalador estándar, se traza una ranura en el centro del suelo, dividiéndolo en dos mitades simétricas.

A continuación, se inicia el ensayo haciendo caer la copa desde una altura específica, a una frecuencia comprendida entre 1.9 y 2.1 golpes por segundo. El ensayo continúa hasta que las dos mitades del suelo se unan en la base de la ranura. En ese punto, se registra el número de golpes requeridos y se extrae una muestra del suelo para determinar su contenido de humedad. Este procedimiento se repite varias veces, modificando el contenido de agua, hasta obtener una serie de datos que permitan construir la curva de flujo y así determinar el límite líquido del suelo.

Procesamiento de datos: Los resultados obtenidos del ensayo se procesan graficando la relación entre el contenido de humedad y el número de golpes registrados para cada espécimen ensayado. A partir de estos puntos, se traza una línea de tendencia (generalmente de tipo logarítmica) que representa el comportamiento del suelo. El contenido de humedad correspondiente a la intersección de dicha curva con los 25 golpes es considerado como el **límite líquido** del suelo.

Límite plástico e índice de plasticidad.

El límite plástico corresponde al contenido de humedad en el que el suelo puede moldearse en cilindros de aproximadamente 3.20 mm de diámetro sin que se agrieten. Este ensayo permite establecer correlaciones con diversas propiedades del suelo y se incluye dentro de los sistemas de clasificación SUCS y AASHTO.

Equipos y materiales, Se necesitan los siguientes materiales: espátula, balanza de precisión, horno, tamiz N° 40, agua, placa de vidrio grueso esmerilado, recipientes y cápsulas para secado.

Procedimiento, Se selecciona una muestra de 20 g de suelo que haya pasado completamente por el tamiz N° 40, la muestra se humedece y se amasa hasta obtener una consistencia plástica uniforme. A continuación, se forman cilindros delgados de aproximadamente 3.2 mm (1/8 in) de diámetro rodando el material con los dedos sobre el vidrio esmerilado. Cuando las barritas comienzan a agrietarse, se recolectan los fragmentos para determinar su contenido de humedad.

Procesamiento de datos, El límite plástico se calcula como el promedio de los contenidos de humedad obtenidos de las muestras ensayadas, y se expresa como porcentaje, utilizando la siguiente fórmula:

Ecuación 46. Límite Plástico

$$\text{Límite Plástico} = \frac{\text{Peso de Agua}}{\text{Peso de Suelo Seco al Horno}} \times 100 \quad (46)$$

Ecuación 47. Índice de Plasticidad.

$$\text{Índice Plasticidad (IP)} = \text{Límite Líquido} - \text{Límite Plástico} \quad (47)$$



Figura 29. Ensayo de límites de consistencia.

Nota. Fuente: Elaboración propia

3.8.3. Ensayo para determinar la compactación del suelo.

Compactación de suelos en laboratorio utilizando energía modificada (Proctor Modificado) – Norma MTC E-115.

Según el Manual de Ensayo de Materiales del MTC (2016), el ensayo de compactación Proctor Modificado tiene como finalidad determinar el contenido de humedad óptimo de compactación y la densidad seca máxima de un suelo. Este procedimiento se realiza aplicando una energía de compactación modificada equivalente a $2\,700\text{ kN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ ($56\,000\text{ pie}\cdot\text{lb}/\text{pie}^3$), lo cual permite simular condiciones más exigentes de compactación, representativas de obras de infraestructura pesada o suelos sometidos a cargas elevadas.

Equipos utilizados: Para la ejecución del ensayo de compactación Proctor Modificado, se emplearon los siguientes equipos y materiales: molde Proctor modificado de 4 pulgadas de diámetro, martillo Proctor modificado con un peso de 4.5 kg, espátula metálica, cucharón, balanza de precisión, recipiente con agua, tamiz de 3/4 de pulgada, cápsulas de metal para determinar el contenido de humedad, y un horno de secado.

Procedimiento. Se elaboraron cuatro especímenes con contenidos de humedad distribuidos alrededor del valor óptimo estimado, garantizando al menos dos en condición seca y dos en condición húmeda. Se aplicó el Método A del ensayo Proctor Modificado, correspondiente a suelos con un retenido acumulado menor al 25 % en el tamiz N°4. Cada muestra fue compactada en un molde cilíndrico de 4 pulgadas de diámetro, en 5 capas de 25 golpes cada una, empleando un martillo de 10 lb (4.54 kg). Este procedimiento permitió determinar con precisión la relación entre el contenido de humedad y la densidad seca del suelo.

Procesamiento de datos. Se calculó la **densidad seca** de cada una de las muestras compactadas, a partir de su peso húmedo y contenido de humedad. Con estos valores se elaboró la curva de **densidad seca en función del contenido de humedad**, identificando el punto máximo de la curva como la **densidad seca máxima** y su correspondiente **contenido de humedad óptimo de compactación**.

Ecuación 48. Densidad seca.

$$\text{Densidad Seca} = \frac{\text{Densidad Húmeda}}{1 + \text{Humedad}}$$



Figura 30. Ensayo de proctor modificado para arena limosa.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo para determinar la densidad mínima en arenas, NLT-204. Norma europea de referencia.

Ensayo de densidad mínima.

Este ensayo tiene como finalidad determinar la **densidad mínima** en estado seco de una arena no cementada. Se considera esta condición como la de menor compacidad posible sin inducir segregación, representando el caso límite inferior de densidad para materiales granulares.

Equipos utilizados: Se emplea un molde cilíndrico metálico con dimensiones precisas (126 ± 1 mm de diámetro y 80 ± 1 mm de altura), un embudo de boca ancha, una estufa regulable hasta $115\text{ }^{\circ}\text{C}$, balanza de precisión (1 g), tamiz de 5,0 mm, enrasador metálico, micrómetro o calibrador.

Procedimiento: La muestra (5 kg) se seca en estufa a temperatura constante ($105\text{--}115\text{ }^{\circ}\text{C}$) y luego se tamiza (5 mm). El material se divide en dos partes iguales. Se taran el molde y el embudo, y se llena el molde por gravedad mediante el embudo, procurando evitar segregación. Una vez lleno, se enrasan los bordes sin compactar ni golpear.

Procesamiento de datos: Se determina la masa del molde lleno y se calcula la densidad mínima seca con la fórmula:

Ecuación 49. *Cálculo de densidad mínima*

$$\rho_{min} = \frac{M_2 - M_1}{V} \quad (49)$$

Donde M_2 es la masa del molde con arena, M_1 la masa del molde vacío y V el volumen del molde. La densidad mínima final se obtiene como el promedio de dos determinaciones.

Ensayo para determinar la densidad máxima en arenas, NLT-205. Norma europea de referencia.

Este ensayo busca establecer la **densidad máxima** seca que puede alcanzar una arena no cementada bajo condiciones estandarizadas de compactación por energía mecánica. Representa el límite superior de densidad posible en condiciones de campo o laboratorio.

Equipos utilizados: Se requiere un molde cilíndrico con base y collar (102 ± 0.4 mm de diámetro, 122.4 ± 0.1 mm de altura), una maza de compactación (4.54 ± 0.01 kg) con caída controlada (457 ± 2 mm), balanza de precisión, estufa de secado, tamiz de 5.0 mm, enrasador y micrómetro.

Procedimiento: Se seca una muestra de 6 kg en estufa a 105–115 °C. Se divide en dos porciones. En el molde se colocan cinco capas iguales, y cada una se compacta con 50 golpes de la maza. La última capa se apisona hasta 10 mm dentro del collar. Luego se retira el collar, se enrasan los bordes y se determina la masa total.

Procesamiento de datos: La densidad máxima se calcula con la misma relación mencionada en la **Ecuación 49**, siendo ahora M_2 es la masa del molde con arena compactada, M_1 la masa del molde vacío y V el volumen del molde. La densidad final es el promedio de dos mediciones válidas.

3.8.4. Ensayos para la determinación de las características mecánicas del suelo.

Ensayos triaxiales UU y triaxial en seco.

Se realizaron ensayos triaxiales en dos condiciones diferentes: suelo en estado seco y suelo compactado a humedad óptima, ambos bajo las mismas condiciones, no consolidado y ante carga rápida para mantener la coherencia metodológica. Se presentan las características técnicas del equipo triaxial disponible en el laboratorio de la universidad.

Equipos utilizados.

Se utilizó el equipo triaxial estático del laboratorio de mecánica de suelo de la UNSAAC, el cual presenta los siguientes elementos.

Panel de control principal Tri – flex 2: El equipo triaxial estático ELE Tri-Flex2 cuenta con un panel de control que permite regular y monitorear las condiciones de presión necesarias para el desarrollo del ensayo. Entre sus principales componentes se encuentran interruptores para seleccionar la lectura de presión, perillas para el control de presión y manipulación de las buretas, así como manómetros para medir la presión positiva y negativa dentro del sistema.

Las **buretas** graduadas permiten observar el volumen de agua ingresado o extraído de la muestra, controladas mediante válvulas con distintas funciones como presurización, vacío, llenado y drenaje. Además, el sistema incluye conexiones de acople rápido para facilitar el suministro de agua, aire o vacío, y una perilla principal para la regulación de la presión máxima de trabajo. Todo el sistema está diseñado para ofrecer un control preciso y seguro de las condiciones triaxiales durante la ejecución del ensayo.

Para la realización de los ensayos triaxiales UU ((no consolidado-no drenado) y en seco, no es necesario medir la presión generada por fuerzas intersticiales dentro de la muestra, únicamente se requiere confinar el espécimen regulando la presión de la celda, controlada con la

primera bureta del sistema. En este contexto, basta con activar el primer switch, cabe recalcar que para llegar a mayores presiones de confinamiento se debe ajustar el Master Regulator, que controla la presión principal del sistema.



Figura 31. Equipo triaxial Estático del laboratorio de Mecánica de Suelos, UNSAAC

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tanque de desaireación de agua Tri – Flex 2: El tanque de desaireación del equipo triaxial ELE cumple un rol fundamental en el control del agua utilizada en los ensayos, al eliminar el aire contenido en el líquido antes de su uso. Está compuesto por una válvula de alivio, que permite liberar presión del interior del tanque de forma automática o manual; una manguera de salida que dirige el líquido hacia las buretas del tablero principal; y una manguera de entrada multifunción, cuya operación depende de la posición de la perilla de control correspondiente. Esta última permite 4 acciones: el llenado del tanque desde una fuente externa, la aplicación de presión interna, liberar presión hasta un estado de presión atmosférica y la generación de vacío.



Figura 32. Tanque de desaireación

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tal como se muestra en la imagen, el tanque fue conectado a una bomba de vacío externa para extraer el aire del agua contenida en su interior, asegurando así que el líquido utilizado en el sistema triaxial esté completamente desairado, condición esencial para un correcto procedimiento del ensayo.

Marco Digital de carga: El marco de carga TEST 50 es el encargado de aplicar carga axial al espécimen durante el ensayo triaxial. Está conformado por una cruceta ajustable mediante tuercas y contratueras, una platina inferior para la colocación de la celda triaxial, una regla graduada en milímetros que permite visualizar desplazamientos verticales, y un adaptador con asiento de bola para el anillo de carga.

El sistema cuenta con un panel de control digital táctil que permite regular el desplazamiento del motor en distintas velocidades y direcciones. Sus funciones principales incluyen el movimiento hacia arriba o abajo, rápido o lento, la parada de emergencia, la pausa y la ejecución del ensayo. La velocidad se puede ajustar en tiempo real mediante el teclado, con un

rango que va desde 0.00001 mm/min hasta 9.99999 mm/min. La pantalla muestra tanto la velocidad actual como el estado del sistema, y permite ingresar o corregir datos antes de iniciar la prueba.

Celda triaxial: La celda triaxial del equipo ELE constituye un componente esencial del sistema de ensayo triaxial. Está fabricada con un material transparente que permite observar el espécimen desde cualquier ángulo, facilitando la supervisión del comportamiento de la muestra durante la prueba. La estructura de la celda incluye tres barras roscadas que permiten fijarla firmemente a la base del equipo. Tiene la capacidad de soportar presiones de hasta 250 PSI (equivalente a 1700 kPa). En la parte superior se encuentran dos orificios: uno destinado a la colocación del transductor de presión sumergible y otro roscado que permite purgar el sistema, garantizando el correcto funcionamiento del ensayo.



Figura 33. Cámara triaxial del equipo y switch de control

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Accesorios de prueba triaxial

- Cabezal inferior de 70 mm de diámetro. (1)

- Cabezal superior de 70 mm de diámetro. (2)
- Membrana de látex, con un módulo de elasticidad de 1400 kPa (203 lb/in²). (3)
- Tubo partido para muestras alteradas, necesario para los ensayos en seco. (4)
- Tubo de succión de membrana, útil para muestras remodeladas. (5)
- Expansor de o ring, diámetro 81 mm. (6)
- Ring de 60 mm de diámetro. (7)
- Papel filtro, de uso no necesario para ensayos triaxiales UU (8)
- Piedras porosas de 70 mm de diámetro, no es necesario para triaxiales UU y en seco, pero fue útil para acomodar mejor las ligas y acoplar mejor al molde triaxial. (9)



Figura 34. Accesorios ejecutar el ensayo triaxial.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para el correcto uso del equipo se siguieron las recomendaciones de uso de la norma ASTM D2850 y del trabajo de investigación, “Manual para el uso del equipo triaxial ELE” de la Universidad Politécnica Salesiana” por Escobar & Vásquez (2023). Asimismo, se contó con la asesoría técnica del ingeniero Jorge (Ingeniero Mecánico, 2024), experto en ensayos especiales de laboratorio de geotecnia.

Procedimiento de ensayo.

Llenado del tanque de desaireación: El equipo debe estar conectado a una fuente externa de agua; para iniciar el llenado, se gira la perilla de control del tanque a la posición “Fill”. El tanque se llena hasta alcanzar un nivel aproximado de 2.5 cm (1 pulgada) por debajo del borde superior. Una vez alcanzado este nivel, se debe cambiar la perilla a la posición “Vent”.

Desaireación del tanque: Se debe conectar la bomba de vacío al acople rápido tipo vacuum y colocar la perilla de control del tanque de desaireación en la posición “Vacuum”. Luego, se enciende la bomba de vacío y se procede a desairar el agua en ciclos de 15 minutos con 5 minutos de reposo entre cada uno. Este procedimiento se repite hasta que dejen de salir burbujas del agua. Finalmente, se retorna la perilla del tanque a la posición “Vent”.

Llenado de buretas: Primero se verifica que el tanque de desaireación contenga más del 50% de agua previamente desairada. Luego, se gira la perilla del tanque a la posición “Pressure”, mientras que la perilla de entrada de la bureta se coloca en “Vent” y la de salida en “Fill”. Se deja llenar la bureta hasta alcanzar el nivel deseado, siendo recomendable llegar hasta la línea cero de la bureta graduada. Finalmente, se cambia la perilla de salida de bureta a “CELL OPERATE” y la del tanque nuevamente a la posición “Vent”.

Desaireación de buretas: Primero se debe verificar que las buretas estén llenas; en caso contrario, se debe repetir el procedimiento de llenado. Luego, se conecta la bomba de vacío al acople rápido tipo “Vacuum” y se coloca la perilla de entrada de la bureta en la posición “Vacuum”. Se procede a desairar el agua durante al menos 15 minutos, seguido de un reposo de 5 minutos. Este procedimiento debe repetirse hasta que el agua dentro de las buretas deje de burbujear.

Ensayo triaxial a humedad óptima, Triaxial UU-ASTM D2850.

El ensayo triaxial UU (no consolidado no drenado) permite evaluar la resistencia al corte de los suelos bajo condiciones de carga rápida, sin consolidación previa ni drenaje durante la aplicación de esfuerzos, es decir, permite determinar el comportamiento de un suelo bajo una condición específica de densidad.

Estudio a humedad óptima, Para el análisis del prototipo a escala real, se buscó una condición de suelo más representativa que la condición seca utilizada en el modelo a escala. Por ello, se realizaron ensayos triaxiales sobre muestras compactadas a la humedad óptima, la cual define un estado parcialmente saturado típico de un escenario post-constructivo.

Este enfoque es clave por dos razones: primero, proporciona parámetros de resistencia más realistas y conservadores que los de un suelo seco; y segundo, permite caracterizar el comportamiento a corto plazo del material bajo carga rápida en términos de esfuerzos totales. De esta manera, se captura el comportamiento mecánico específico que es el foco de esta investigación, sin necesidad de recurrir a los extremos de un suelo seco o completamente saturado.

Preparación de muestra.

Para la preparación de muestras alteradas se debe tener un control preciso sobre el grado de compactación y la cantidad de capas que conforman el espécimen, la normativa explica que son recomendables más de 6 capas y el nivel de compactación es graduado para alcanzar la densidad deseada, usando un compactador de diámetro menor o igual a la mitad del diámetro del espécimen.

Se utilizaron los resultados del ensayo de Proctor modificado para alcanzar el máximo grado de compactación para la cantidad óptima de agua. $w\% = 16.4\%$ para $\gamma = 1.96\text{g/cm}^3$

Siguiendo las recomendaciones de la norma, se hicieron pruebas previas para definir la forma de compactación, **definiendo el proceso en 6 capas de 25 golpes por capa utilizando un compactador de 35mm**, de esta forma se garantizó alcanzar el grado de compactación deseado.

Como se describió en los ensayos de clasificación, el tipo de suelo a ensayar es una arena limosa con 11.54% de finos, esto resultó en la conformación de un espécimen frágil sin cohesión, ocasionando su fractura en el proceso de desmoldeo. Para solucionar este imprevisto se optó por revestir las paredes interiores del molde con papel mantequilla, facilitando la extracción de muestras sin comprometer la geometría y estado de conformación.

Procesamiento de datos.

Una vez obtenidos los datos de deformación y carga de los diales, es crucial transformar primero las lecturas a unidades de carga (kg) y deformación (mm), aplicando las constantes de calibración de los anillos correspondientes, para posteriormente obtener datos de deformación unitaria vs esfuerzo. Se detallan las ecuaciones para el procesamiento.

Ecuación 50. Fuerza Calibrada

$$F = L_a \times k \quad (50)$$

Donde L_a , representa la lectura del dial de carga y k , la constante de calibración del anillo, la misma relación aplica para el dial de deformación.

Ecuación 51. Deformación unitaria.

$$\varepsilon = \frac{h_o - h_f}{h_o} = \frac{\Delta H}{h_o} \quad (51)$$

Donde h_o , es la altura inicial del espécimen y h_f , la altura producto del acortamiento.

Ecuación 52. Área corregida.

$$A_c = \frac{A_o}{1 - \varepsilon} \quad (52)$$

Donde A_o , es el área inicial.

Ensayos triaxiales por confinamiento.



Figura 35. Ensayo triaxial UU para muestra a humedad óptima, para $\sigma_3=50\text{kPa}$

Nota. Fuente: Elaboración propia.



Figura 36. Ensayo triaxial UU para muestra a humedad óptima, para $\sigma_3=100\text{kPa}$

Nota. Fuente: Elaboración propia.



Figura 37. Ensayo triaxial UU para muestra a humedad óptima, para $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Ensayo triaxial en Seco, condición de densidad seca compactada.

Triaxial en Seco.

Si bien su aplicación no se encuentra normada de manera oficial, existen referencias que destacan su uso e importancia. El procedimiento del ensayo es análogo al del ensayo triaxial no consolidado no drenado (UU), requiriendo únicamente una muestra remodelada, aplicación de confinamiento en cámara sin fase de consolidación ni drenaje, y posteriormente la ejecución del corte.

Estudio en seco.

Necesario para analizar el comportamiento del suelo compactado en seco, a fin de controlar las propiedades del material en el modelo físico a escala reducida y compararlas con las del modelo numérico. Por otra parte, Bishop y Henkel (1962) afirman: “Dado que la presión de poros es cero, los esfuerzos efectivos son iguales a los esfuerzos aplicados, y la envolvente de

resistencia en términos de esfuerzos efectivos se obtiene directamente de los círculos de esfuerzo en la rotura” (p.18)

Bishop & Henkel (1962). Muestras secas sin cohesión. La aplicación práctica directa de los ensayos en materiales secos se limita generalmente al diseño de silos, donde granos, azúcar, fertilizantes, etc., se manejan en un estado "secado al aire". La arena seca es, sin embargo, ampliamente utilizada para ensayos de modelos en el laboratorio, y entonces se requieren mediciones detalladas de sus propiedades de resistencia y deformación.

Esta condición facilitó el control de la densidad del modelo físico, permitiendo replicar con mayor fidelidad el estado del material utilizado en los ensayos triaxiales. Además, que al trabajar en seco se eliminan posibles efectos de las presiones intersticiales, las cuales pueden introducir variables difíciles de controlar y afectar la representatividad del comportamiento mecánico del suelo.

Preparación de muestra. (verificar cantidad de capas y dimensiones)

La preparación de muestras de arena para ensayos triaxiales en condición seca requiere un control cuidadoso del método de compactación, con el fin de lograr una densidad seca uniforme y representativa del estado del suelo que se desee alcanzar. En esta investigación, la arena fue compactada en seco dentro de un molde cilíndrico de 70 mm de diámetro y 140 mm de altura, utilizando un procedimiento por capas, similar al descrito por Bishop & Henkel (1962) quienes plantean que este método es adecuado para materiales granulares no cohesivos sin necesidad de saturación ni consolidación previa.

La muestra fue armada mediante el vertido controlado del material en capas de espesor uniforme, seguido de una compactación manual utilizando un compactador pequeño de 35mm de

diámetro, manteniendo una energía de compactación constante para cada capa. Definiendo el proceso en 5 capas con 10 golpes por cada una.

De acuerdo con lo señalado por estudios como el de Camacho et al. (2014). La compactación de arenas secas puede presentar dificultades para alcanzar densidades relativas bajas, especialmente en materiales de granulometría media o gruesa, debido a la acomodación de partículas durante el vertido por efectos de gravedad y fricción interna. Sin embargo, al controlar la energía de compactación y el procedimiento de armado, es posible alcanzar densidades relativas altas con baja dispersión, generando muestras más uniformes y representativas, tal como se evidenció en los resultados de relación de vacíos y compacidad.

Este procedimiento fue especialmente útil para replicar la condición de compactación del suelo dentro del modelo físico a escala, permitiendo obtener una muestra representativa del comportamiento mecánico en seco, sin interferencia de presiones intersticiales.

Ensayos triaxiales por confinamiento



Figura 38. Ensayos triaxial EN SECO compactado, para confinamientos de 50kPa

Nota. Fuente: Elaboración propia.



Figura 39. Ensayos triaxial EN SECO compactado, para confinamientos de 100kPa

Nota. Fuente: Elaboración propia.



Figura 40. Ensayo triaxial EN SECO compactado, para confinamientos de 200kPa

Nota. Fuente: Elaboración propia.

3.8.5. Modelo experimental.

3.8.5.1. Diseño del modelo, condición de separación y manejo de escalas

Se trató de adaptar la geometría del modelo prototipo a un caso representativo a condiciones reales. El estudio comprende un talud de 10 metros, estabilizado con un sistema de 3

muros escalonados de concreto armado. La experimentación consiste en separar la distancia entre muros a fin de evaluar su influencia en el comportamiento mecánico del talud.

Se definieron cuatro condiciones de separación: 1.5 m, 3.0 m, 4.5 m, y 6.0 m, siendo la última la condición en la que no se presenta interacción significativa entre los muros, comprobada mediante análisis de esfuerzos en PLAXIS 2D. Se incorporaron interfaces en los modelos numéricos para simular adecuadamente la fricción suelo-estructura y permitir la evaluación precisa de esfuerzos y desplazamientos.

Como se menciona en delimitación conceptual, se definió una geometría única para todos los muros, adaptando las medidas a la recomendación de pre dimensionamiento establecida por Braja M. Das

Dimensión prototipo del Muro de concreto armado.

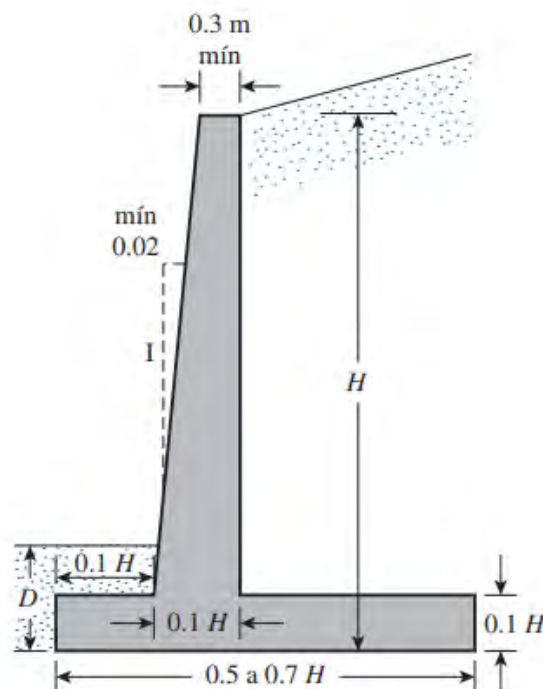


Figura 41. Predimensionamiento de muros de contención de concreto armado.

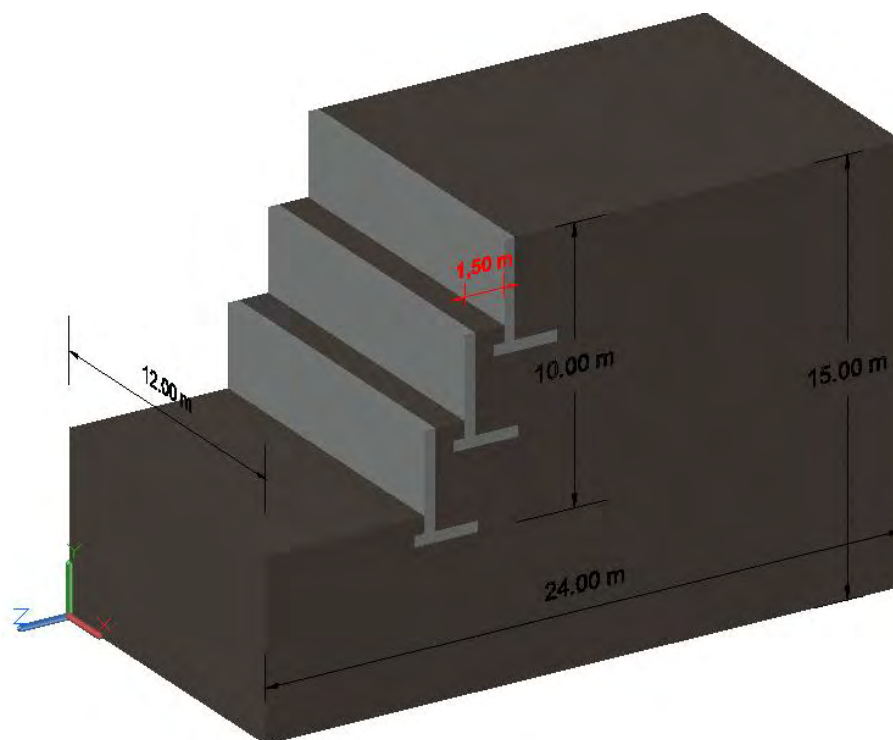
Nota. Fuente: Braja M. Das

Tabla 17*Dimensiones del muro que conforman el sistema escalonado*

Descripción		Dimensión del prototipo		
Altura total	H=	4.00	m	
Corona	t1=	0.40	m	
Garganta	t2=	0.40	m	
Ancho de zapata	B=	0.40	m	
Base de zapata	H _z =	2.40	m	
Puntera	B2=	0.40	m	
Desplante	D=	1.00	m	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Dimensiones prototipo del talud estabilizado con muros escalonados de concreto armado.

*Figura 42. Dimensiones de modelo prototipo, talud con muros escalonados de C.A*

Nota. Fuente: Elaboración propia.

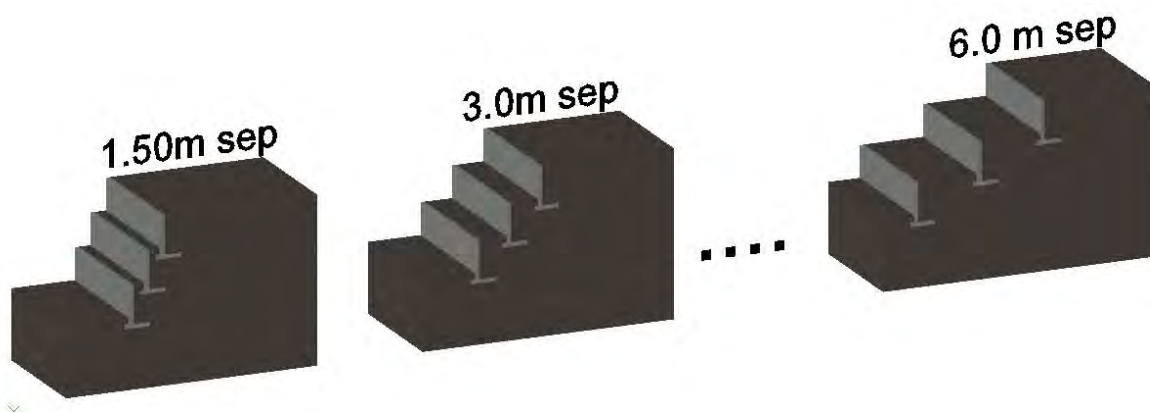


Figura 43. Separaciones en modelo prototipo, 1.5m, 3.0m, 4.5m y 6.0m entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Relación Geométrica: La geometría del modelo a escala fue definida en función de las dimensiones disponibles en el equipo universal, cuya utilización era indispensable para aplicar y controlar adecuadamente la carga vertical durante los ensayos. Por lo tanto, el tamaño del modelo fue condicionado principalmente por las dimensiones del bastidor del equipo, así como por la necesidad de asegurar la estabilidad del sistema y la precisión en el registro de deformaciones.

Bajo estas consideraciones, se adoptó una escala geométrica de **1:30**, es decir, cada unidad en el modelo representa treinta unidades en el prototipo real. Este valor fue determinado mediante la relación directa entre la altura del muro prototipo y la altura máxima que permitía el equipo de ensayo, conforme a la expresión descrita en la **Ecuación 41**.

$$\frac{L_p}{L_M} = a_L$$

L_p = Longitud en el Prototipo

L_M = Longitud en el Modelo

a_L = Factor de Conversión de Longitud

De esta forma el muro modelo quedó con las siguientes dimensiones geométricas

Tabla 18

Dimensiones del muro a escala que conforman el sistema escalonado

Descripción		Dimensión del a escala	
Altura total	H=	0.133m	13.3cm
Corona	t1=	0.013m	1.3cm
Garganta	t2=	0.013m	1.3cm
Ancho de zapata	B=	0.013m	1.3cm
Base de zapata	H _z =	0.080m	8.0cm
Puntera	B ₂ =	0.013m	1.3cm
Desplante	D=	0.033m	3.3cm

Nota. Fuente: Elaboración propia

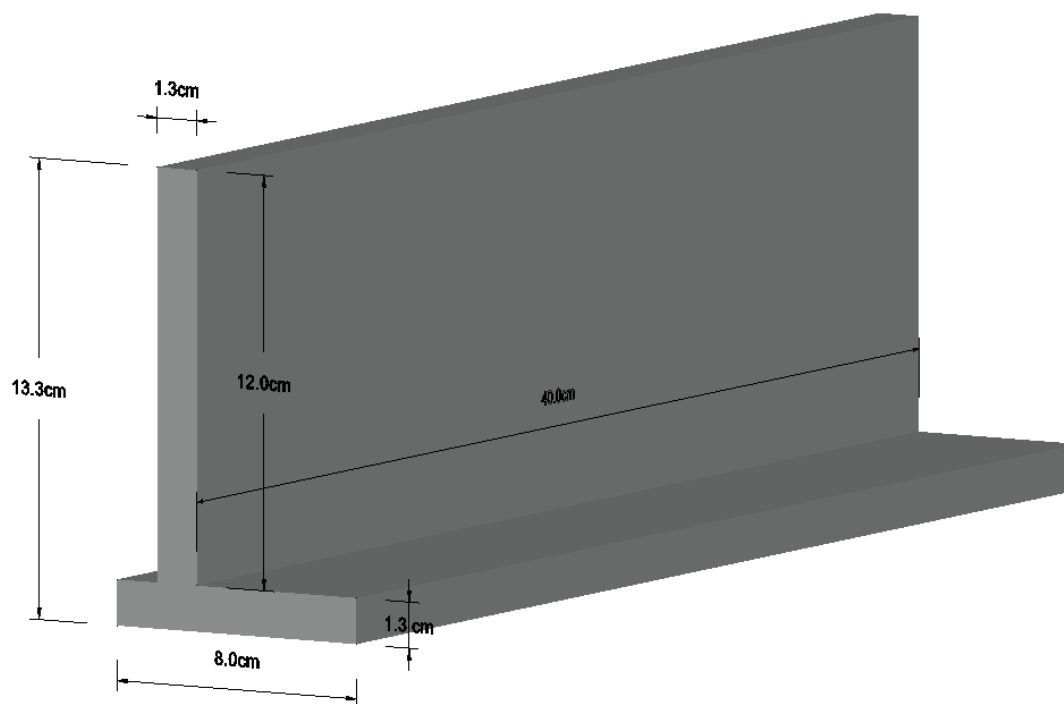


Figura 44. Dimensiones de muro a escala que conforman el sistema escalonado.

Nota. Fuente: Elaboración propia

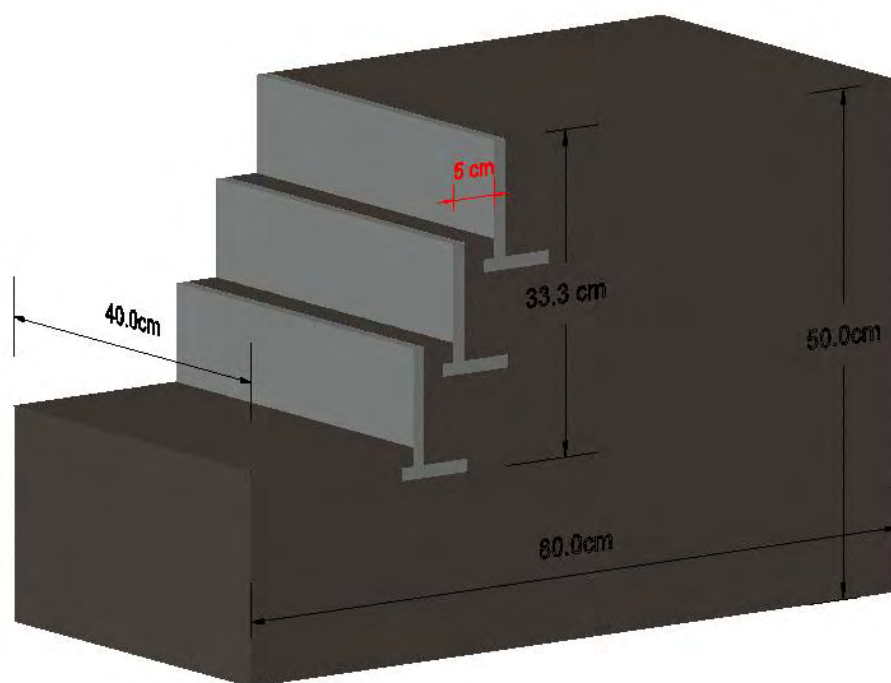


Figura 45. Dimensiones de modelo a escala, talud con muros escalonados de C.A

Nota. Fuente: Elaboración propia

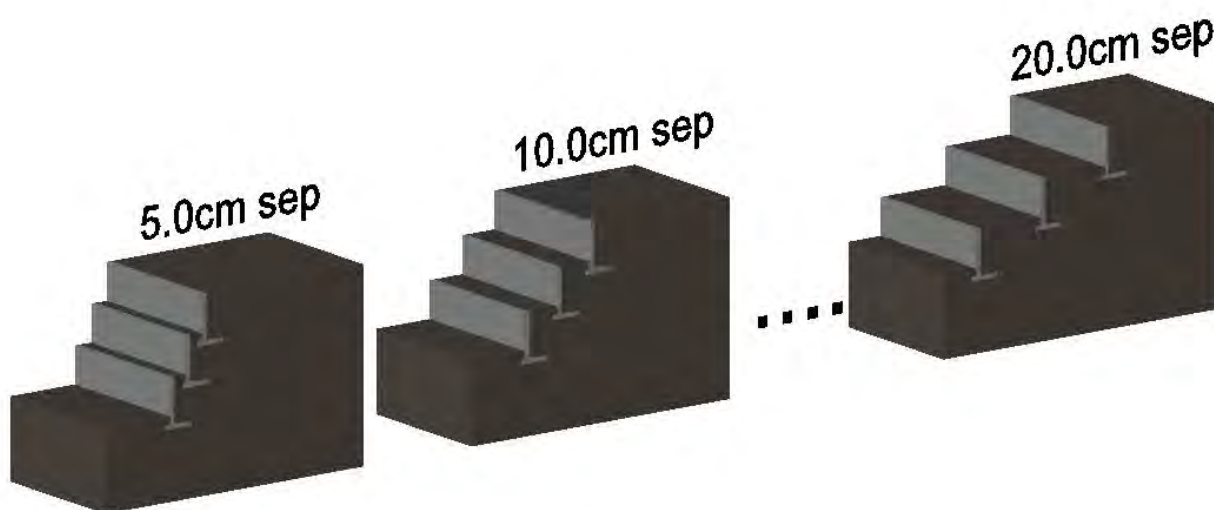


Figura 46. Separaciones en modelo a escala, 5.0cm, 10.0cm, 15.0cm y 20.0cm entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia

Relación cinemática: En este estudio, se establece una relación cinemática de $t=1$, lo que significa que los patrones de flujo homólogos o movimiento de sistemas, se producen en los mismos intervalos de tiempo. Siguiendo los principios de la similaridad cinemática, esto asegura que, al aplicar una carga estática progresiva sobre la corona del talud, las trayectorias de los puntos en el modelo y en el prototipo son proporcionales tanto en el tiempo como en el espacio. Se adopta la **Ecuación 42**

$$\frac{t_p}{t_m} = a_t = 1$$

t_p = Tiempos en el prototipo

t_m = Tiempos en el modelo

a_t = Factor de conversión de tiempo

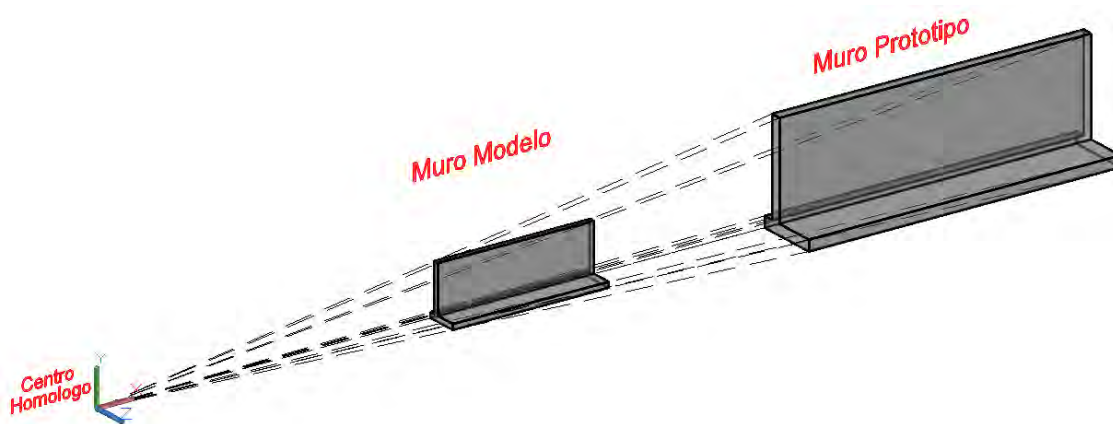


Figura 47. Proyección lineal de sistema, prototipo-modelo, Relación cinemática

Nota. Fuente: Elaboración propia

Relación dinámica: Componente fundamental de la teoría de semejanza, la relación dinámica garantiza que las fuerzas que actúan sobre el modelo físico y el modelo del prototipo real sean proporcionales y asegura que las respuestas a la carga progresiva sean similares. Además, la relación de densidades mantiene la coherencia en la respuesta de los materiales para

ajustar las densidades que hay entre el modelo y el sistema real, garantizando así que el comportamiento de los muros del talud en el modelo físico sea igual al comportamiento esperado en condiciones reales. Utilizando la **Ecuación 43** Para el suelo utilizado se tiene:

$$\frac{\rho_p}{\rho_m} = a_\rho = 1$$

$$\frac{16.5 \text{ kN/m}^3}{16.5 \text{ kN/m}^3} = a_\rho = 1$$

ρ_p = Densidad en el prototipo

ρ_m = Densidad en el modelo

a_ρ = Factor de conversión de densidades

Para los muros de contención de concreto armado.

$$\frac{\rho_p}{\rho_m} = \rho_t = 1$$

$$\frac{24 \text{ kN/m}^3}{24 \text{ kN/m}^3} = \rho_t = 1$$

Para cumplir con los principios de la teoría de semejanza, un requisito fundamental del modelo físico escalar las densidades, para la presente tesis se decidió mantener la escala de densidades 1:1, asegurando así la similitud dinámica entre el prototipo y el modelo. El plan inicial de construir los muros a escala con concreto fue descartado al enfrentar dos problemas insuperables: el peso de las unidades no alcanzaba el valor requerido y su reducido tamaño las hacía extremadamente frágiles.

Para resolver esto, se optó por una solución alternativa: fabricar los muros utilizando planchas metálicas de 1 mm de espesor, soldadas para conformar la geometría deseada. Se añadieron refuerzos internos para garantizar una rigidez adecuada, simulando el comportamiento de un cuerpo sólido. Esta configuración hueca permitió añadir arena en el interior, ajustando con

precisión el peso de cada unidad hasta alcanzar la densidad escalada. Se rellenó completamente la zapata y aproximadamente tres cuartas partes (3/4) de la altura de la pantalla, una distribución que permitió alcanzar el peso objetivo sin alterar significativamente la posición del centro de gravedad del elemento.

El área del modelo prototipo según dimensiones ya mencionadas es, 2.4 m², considerando que para el análisis 3D se consideró 12m de profundidad, se tiene el siguiente escalamiento.

Tabla 19
Escalamiento de densidad para muros

Muro Prototipo			Muro a Escala		
Área	24000.00	cm ²	Área	26.67	cm ²
Longitud	1200.00	cm	Longitud	40.00	cm
Volumen	28800000.00	cm ³	Volumen	1066.67	cm ³
Densidad	2.40	gr/cm ³	Densidad	2.40	gr/cm ³
Peso	69120000.00	gr	Peso a replicar	2560.00	gr

Nota. Fuente: Elaboración propia

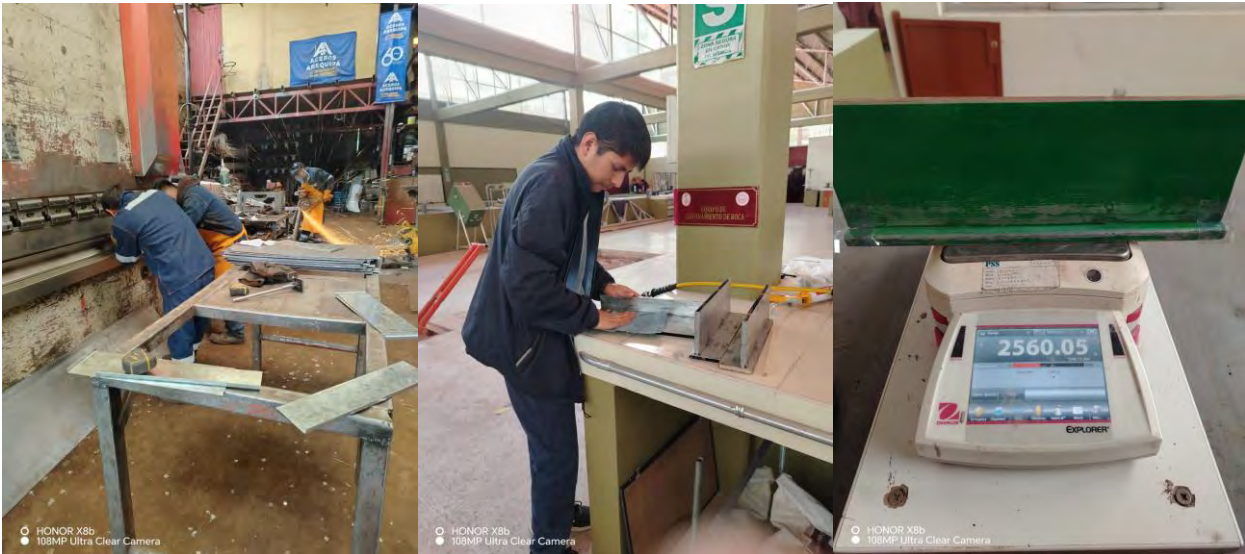


Figura 48. Elaboración de muros metálicos

Nota. Fuente: Elaboración propia

3.8.5.2. Fase de Implementación Inicial

Construcción de Marco experimental: En esta fase, se inicia con el armado de la estructura, asegurando que la caja diseñada para el modelo físico sea adecuada para acomodarse en el equipo universal. El objetivo de ajustar el marco experimental, es que permita realizar las pruebas de carga progresiva sin interferencias. Además, se ha considerado una distancia longitudinal prudente para el estudio de las diferentes separaciones entre los muros escalonados del talud.

Medidas interiores finales: 80 cm x 40 cm x 50 cm.

Descripción de materiales y equipos usados.

Perfiles angulares rectos de 4 mm de espesor y superficies 1" x 1", que fueron soldados para que la pieza sea estable y resistente.

Vidrio laminado de 10 mm de espesor, usado para la estructura con el fin de asegurar la visibilidad del modelo, resistencia a cargas y seguridad durante las pruebas.

Pintura: La estructura metálica fue pintada para evitar que pudiera corroerse y mejorar su durabilidad en las pruebas.

Base de metal con parrilla de seguridad: La base del modelo fue reforzada con una parrilla de seguridad, situada por debajo para asegurar la estabilidad de la base durante la construcción del modelo y al aplicar las cargas.

Uso de cinta de doble contacto y silicona: Se usó para pegar el vidrio a la estructura y evitar el contacto directo entre el vidrio y el marco metálico, además de generar una distribución más uniforme de esfuerzos, y la silicona en todo el borde para evitar filtraciones de arena o finos.

Uso del equipo universal de compresión: Este equipo se utiliza para aplicar carga sobre la corona del talud, permitiendo controlar la deformación, lo cual es esencial para comparar los resultados obtenidos con el modelo numérico.



Figura 49. Construcción de marco experimental con perfiles de acero.

Nota. Fuente: Elaboración propia

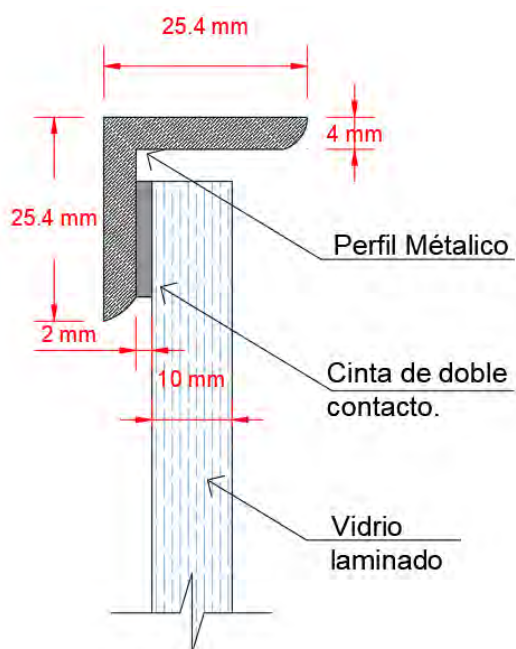


Figura 50. Forma de armado de marco experimental.

Nota. Fuente: Elaboración propia

3.8.5.3. Prueba piloto.

Se realizó una prueba preliminar con el objetivo de evaluar la viabilidad de las condiciones del modelo y el comportamiento del talud sometido a carga progresiva, con el fin de prever posibles errores y tener en cuenta variables que pudieran afectar los ensayos finales en la máquina universal.

En esta etapa se utilizaron materiales preliminares.

Arena de cantera, se usó este material debido a su disponibilidad.

Muros de Concreto, se intentó utilizar muros de concreto con el fin de alcanzar la densidad del material prototipo. Sin embargo, no se logró alcanzar el peso requerido para la simulación, lo que llevó a la adaptación de los materiales.

Muros de Madera, tomando en cuenta el objetivo de esta etapa preliminar, se vio por conveniente utilizar muros de madera.

Compactador Pequeño, fabricado para simular la compactación del material en el talud.

Platea de Carga, utilizada para colocar las pesas y distribuir la carga uniformemente.

En esta fase preliminar, el armado del modelo se hizo con muros de madera y la arena de cantera húmeda, manteniendo un nivel de compactación medio. Se probó la condición más crítica, con una separación de 1.5 m entre los muros. Durante el procedimiento, se niveló constantemente todo el sistema para garantizar condiciones uniformes y evitar posibles errores en los resultados.

Conclusiones del modelo a escala, plan piloto.

- Ser estrictos con la nivelación, al momento de instalar cada muro y sobre todo en la colocación de la platea de carga, porque su posición guía la dirección de falla.

- Definir la escala de densidad en muros y terreno es fundamental, de esto depende capacidad de resistencia del sistema.
- Es importante analizar el comportamiento del sistema durante la aplicación de carga, los vectores de desplazamiento son una alternativa eficaz y practica para esto.
- El ensayo piloto se realizó con material húmedo, lo que evitó la filtración de suelo por los costados de los muros. En base a esta observación, se prevé el uso de alerones laterales para garantizar la contención del material durante el ensayo principal en seco.
- No se distinguieron efectos de borde significativos, pero podrían influir en ensayos con cargas mayores.

Dentro de las restricciones, se obtuvo el comportamiento deseado para la separación mínima ensayada. **El detalle de esta prueba se muestra en los anexos.**

3.8.5.4. Diseño y Acondicionamiento del Entorno Experimental

Para validar las variables de la investigación era estrictamente necesario aplicar carga controlada bajo deformación, esto se tenía previsto desde el inicio motivo por el cual se adaptó el marco del modelo a las medidas máximas del equipo universal de compresión.

Para adaptar el marco fue necesario construir apoyos para los laterales del equipo universal, además de colocar una mesa de trabajo a nivel de apoyos y equipo universal.

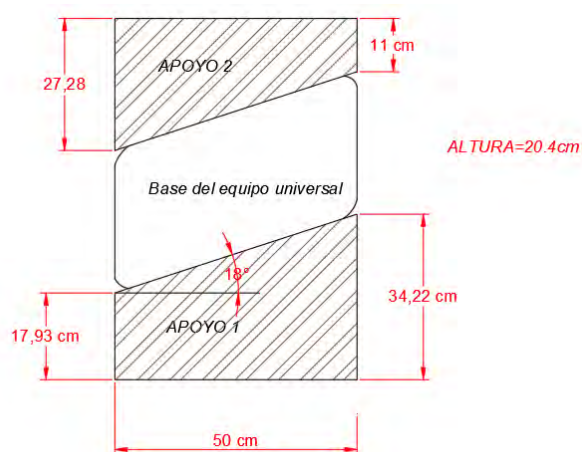


Figura 51. Diseño de apoyos como para la base del equipo universal

Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 52. Mesa de trabajo a nivel del equipo universal con los apoyos puestos.

Nota. Fuente: Elaboración propia

Debido a la gran cantidad de material seco necesario para armar el modelo, el proceso de secado se llevó a cabo tanto en horno como al aire libre durante dos días.



Figura 53. Secado de material para armado de modelo a escala.

Nota. Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta que el modelo se iba a armar en la mesa de trabajo al costado del equipo universal, se almacenó todo el material previamente secado en dos tachos de plástico



Figura 54. Espacio experimental bien implementado para armar el modelo.

Nota. Fuente: Elaboración propia

Con el objetivo de garantizar condiciones experimentales controladas y obtener resultados precisos, se realizaron varios ajustes en el diseño del modelo.

Cuadrícula en el marco para los vectores de desplazamiento, Esto es parte del diseño del sistema de medición dentro del entorno experimental. La cuadrícula sirve para ubicar los puntos donde se medirán los desplazamientos, asegurando que las observaciones sean consistentes y comparables durante las pruebas.

Colocación de puntos de yeso para controlar desplazamientos. La elección de los puntos de yeso se basa en un proceso de prueba y error, lo que indica un esfuerzo por acondicionar el sistema para obtener los datos más fiables posibles.

Alerones, colocados en los costados de los muros para evitar filtrado del material: Este es un ajuste físico en el modelo, asegurando que no haya fuga de material, lo que podría alterar la distribución de cargas y las mediciones, esto era de uso indispensable debido a lo fino del material y la separación obligatoria entre el vidrio y los muros, necesaria para no generar fricción y alterar el comportamiento.

3.8.5.5. Construcción del modelo.

El proceso comenzó con el armado del modelo a escala, enfocándonos en calibrar la compactación para igualar la densidad del ensayo triaxial (1.65 gr/cm³), estado altamente replicable en la prueba triaxial. Debido a las limitaciones del entorno experimental, era complicado realizar pruebas para comprobar el nivel de densidad del material durante el armado, por lo que se implementó un método de control por procedimiento, que consistió en calibrar el número de golpes por espesor de capas, tal como se hizo en el ensayo triaxial.

Se comenzó con el pesaje de marco metálico, después se agregó material compactándolo a una altura de 5 cm. Durante este proceso, se probaron diferentes formas de compactación,

variando número de golpes. Después de algunas pruebas se definió la forma de compactación siguiente.

Utilizando el compactador para remoldeo de muestras en ensayos triaxiales de 70mm, variando el número de golpes por posición, a lo largo de toda la base con dimensiones de 39.50cm x 80cm, se definió en 4 en número de golpes por posición para lograr la densidad requerida.

Dimensiones: 39.50 x 80 cm

Tabla 20

Pruebas de compactación para modelo a escala.

Nº prueba	1		2		3	
Número de capas	2		2		2	
Espesor de capa (cm)	5		5		5	
Nº golpes, Compactador triaxial	2		3		4	
Peso de la caja (kg)	46.4		46.4		46.4	
Nº capa	1	2	1	2	1	2
Volumen (cm ³)	15800	31600	15800	31600	15800	31600
Peso total (kg)	71.60	96.65	72.20	97.80	72.50	98.50
Peso del suelo (kg)	25.2	50.25	25.8	51.4	26.1	52.1
Densidad (g/cm ³)	1.595	1.590	1.633	1.627	1.652	1.649
Densidad de modelo(g/cm ³)	1.59		1.63		1.65	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Con la forma de compactación definida y establecidos los parámetros para los ensayos, se procedió con el armado del modelo, repitiendo el proceso de forma metódica hasta alcanzar la altura total. Este procedimiento de armado se replicó en su totalidad para cada una de las cuatro configuraciones de separación entre muros analizadas: 1.5 m, 3.0 m, 4.5 m y 6.0 m.



Figura 55. Marco experimental cuadriculado para registro de desplazamientos.

Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 56. Armado y compactación de modelo a escala.

Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 57. Modelo físico a escala reducida, separación de 1.50 m entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 58. Modelo físico a escala reducida, separación de 3.00 m entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 59. Modelo físico a escala reducida, separación de 4.50 m entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia



Figura 60. Modelo físico a escala reducida, separación de 6.0 m entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia

4. RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN.

El desarrollo de la presente investigación está conformado por etapas, empezando por el trabajo en campo, ensayos de laboratorio, elaboración de modelos numéricos y creación de modelo a escala.

a) Plan de análisis.

Los datos estarán ordenados en forma computacional y descriptiva, además de abarcar el estudio de diferentes marcos bibliográficos necesarios para el presente trabajo. Analizaremos computacionalmente nuestro modelo, mediante el uso del Plaxis 2D, así como su comprobación en un modelo a escala, el cual será sometido a cargas axiales en la corona del talud para la contrastación de resultados.

b) Uso software computacional, Plaxis.

Será utilizado para el cálculo computacional del modelo real y a escala, el cual será calibrado para el modelo constitutivo que más se adecue a nuestra casuística. La calibración se hará de acuerdo a los resultados de la aplicación del ensayo triaxial UU en nuestro material de estudio.

c) Resultados de la investigación

Se fundamenta en relación a los datos obtenidos en el modelo numérico y el ensayo a escala en laboratorio. Se pronostican comportamientos similares, será visto una vez realizada la comparativa.

4.1.1. Resultados del trabajo en campo (Fase I).

Se procedió con la caracterización in situ del talud, este presenta 4 estratos completamente distinguibles, se describen a continuación

Primer estrato: En la parte superior se ubica un estrato compuesto por **arcilla con materia orgánica**, de color marrón oscuro, textura blanda y estructura poco consolidada. Este material corresponde a un suelo superficial de origen vegetal, con aparente alta capacidad de retención de humedad y baja resistencia al corte, lo que lo convierte en un estrato de escaso soporte estructural.

Segundo estrato: Por debajo, se encuentra un estrato de grava **de color marrón grisáceo**, con partículas visibles de tamaño medio a grueso, que presenta una textura suelta pero relativamente estable en estado seco. Este estrato es típicamente permeable y puede actuar como una capa de drenaje natural, aunque su comportamiento mecánico dependerá de su grado de compactación y del confinamiento lateral.

Tercer estrato: Continuando en profundidad, se identificó un estrato de **arena limosa**, de color marrón claro, con una textura suelta y granular. Se nota predominancia de arena y una disposición masiva y homogénea, presenta una estructura relativamente estable al corte vertical, sin desmoronamientos significativos, lo que indica una cohesión mínima proporcionada por el contenido limoso.

Finalmente, en la base del talud se encuentra un estrato constituido por **arena limo arcillosa**, de color marrón rojizo intenso, con características plásticas y homogéneas, se hace evidente la gran cantidad de finos y partículas de arcilla con consistencia media.

4.2. Resultados del trabajo en laboratorio y gabinete. (Fase II)

Con el trabajo en campo realizado se procedió a los ensayos de laboratorio, empezando por los ensayos de clasificación, caracterizando el talud.

4.2.1. Resultados de la Granulometría.

El ensayo de granulometría para la caracterización del talud se realizó con 4 muestras correspondientes a los 4 estratos que lo conforman. Se presentan a continuación:

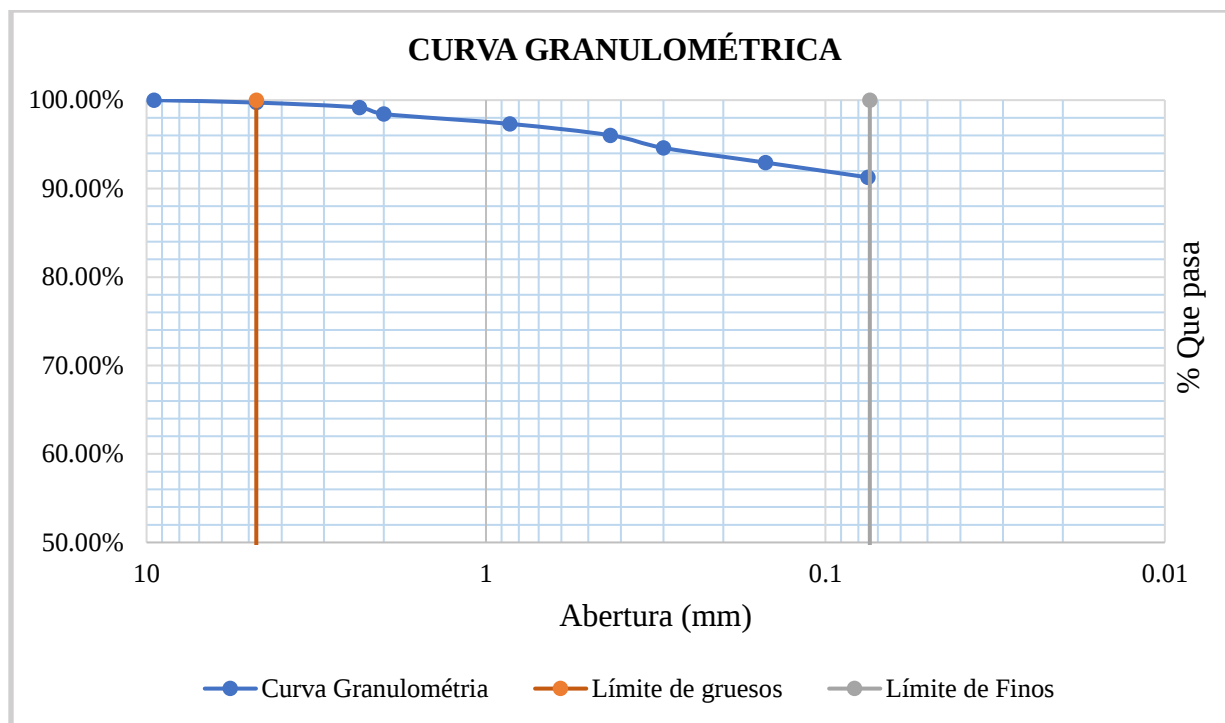
Muestra S1 (primer estrato)

- Peso del material antes del lavado: 2885.0 g
- Peso del material después del lavado: 266.21g
- Pérdida de material después del lavado: 2618.79 g

Tabla 21
Granulometría de material S1

Tamiz	Diámetro en (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido corregido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa acumulado
3/8'	9.5	0	0	0.00%	0.00%	100.00%
#4	4.75	7.99	8.01	0.28%	0.28%	99.72%
#8	2.36	15.97	16.00	0.55%	0.83%	99.17%
#10	2	21.3	21.34	0.74%	1.57%	98.43%
#20	0.85	31.95	32.02	1.11%	2.68%	97.32%
#40	0.43	37.27	37.35	1.29%	3.98%	96.02%
#50	0.3	40.95	41.03	1.42%	5.40%	94.60%
#100	0.15	47.92	48.02	1.66%	7.06%	92.94%
#200	0.075	47.9	48.00	1.66%	8.73%	91.27%
Charola		9.04	2633.23	91.27%	100.00%	
Lavado		2618.79				
Material ensayado		260.29				
Peso total ensayado		2879.08		Error	0.21%	

Nota: Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la muestra S1 Fuente: Elaboración propia

Gráfica 1*Curva granulométrica, muestra S1*

Nota: Se utilizó la serie de tamices indicados en la norma

En suelos finos como las arcillas, no es posible calcular los coeficientes de uniformidad debido a la alta concentración de material fino, lo que imposibilita la interpolación. Además, estos datos son irrelevantes para la clasificación de suelos finos según el sistema SUCS.

Muestra S2 (Segundo estrato)

- Peso del material antes del lavado: 4705 g
 - Parte gruesa: 2830 g
 - Parte fina: 1875 g
- Peso del material después del lavado: 4146.5 g
 - Parte gruesa: 2810 g
 - Parte fina: 1336.5 g
- Pérdida de material después del lavado: 558.5 g

Considerando las características del material se hizo un tamizado compuesto.

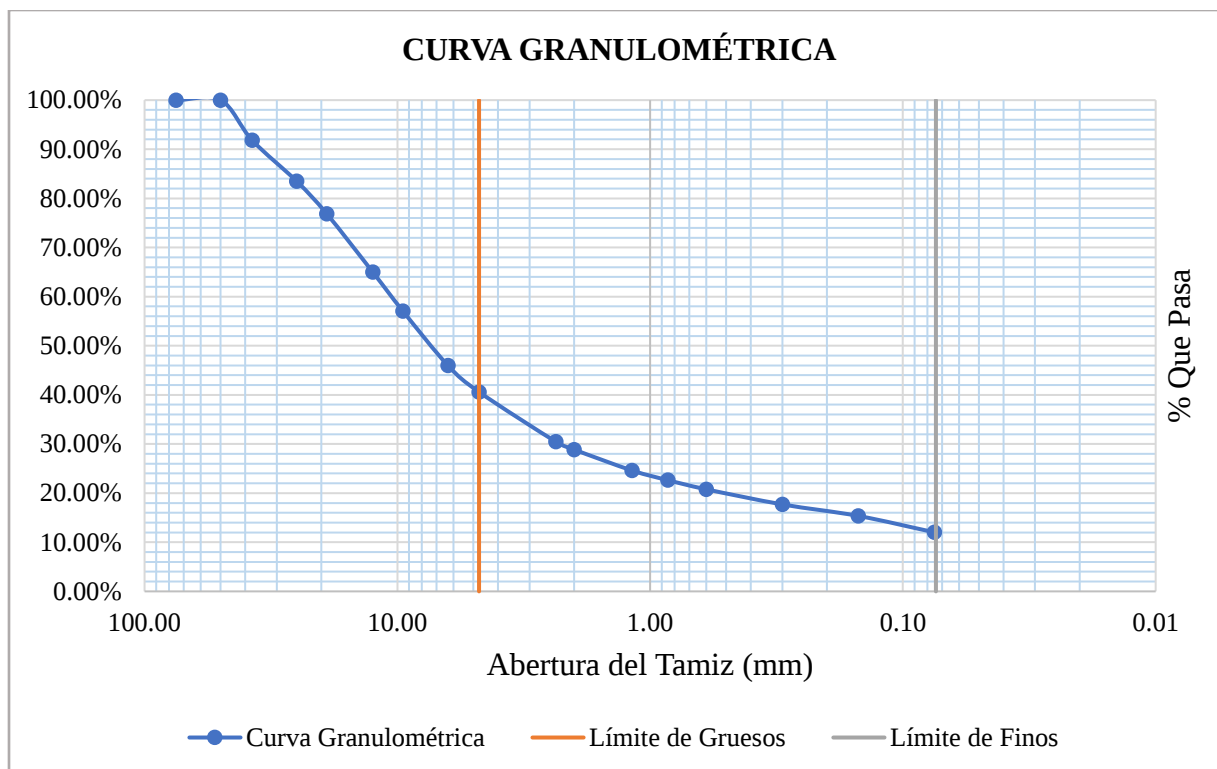
Tabla 22

Granulometría de material S2

Tamiz	Diámetro en (mm)	Peso retenido parte gruesa(g)	Peso retenido parte fina(g)	Peso retenido corregido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa acumulado
3"	75.00	0.00		0.00	0.00%	0.00%	100.00%
2"	50.00	0.00		0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1 1/2"	37.50	384.74		385.16	8.19%	8.19%	91.81%
1"	25.00	391.93		392.36	8.34%	16.53%	83.47%
3/4"	19.00	312.13		312.47	6.64%	23.17%	76.83%
1/2"	12.50	557.22		557.83	11.86%	35.02%	64.98%
3/8"	9.50	373.34		373.75	7.94%	42.97%	57.03%
1/4"	6.30	520.86		521.43	11.08%	54.05%	45.95%
#4	4.75	239.63	12.30	252.21	5.36%	59.41%	40.59%
#8	2.36	30.01	445.67	476.20	10.12%	69.53%	30.47%
#10	2.00		75.05	75.13	1.60%	71.13%	28.87%
#16	1.18		199.92	200.14	4.25%	75.38%	24.62%
#20	0.85		93.33	93.43	1.99%	77.37%	22.63%
#30	0.60		87.02	87.12	1.85%	79.22%	20.78%
#50	0.30		144.53	144.69	3.08%	82.29%	17.71%
#100	0.15		110.35	110.47	2.35%	84.64%	15.36%
#200	0.075		156.80	156.97	3.34%	87.98%	12.02%
Charola			6.50	565.62	12.02%	100.00%	
Lavado			558.50				
Material ensayado		2809.86	1331.47				
Peso total ensayado		4699.83		ERROR	0.11%		

Nota: Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la muestra S2 Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 2
Curva Granulométrica S2



Nota: Se utilizó la serie de tamices indicados en la norma

De la curva granulométría se obtuvo lo siguiente:

D60%=10.67 mm

D30%=2.26 mm

D10%= ----

Como la cantidad de finos supera el 10%, no es posible interpolar el D10. Además, cualquier valor asumido para este parámetro nos daría coeficientes de uniformidad (Cu) y de curvatura (Cc) muy elevados, indicando por sí mismos la presencia de un material mal gradado.

Muestra S3 (Tercer estrato)

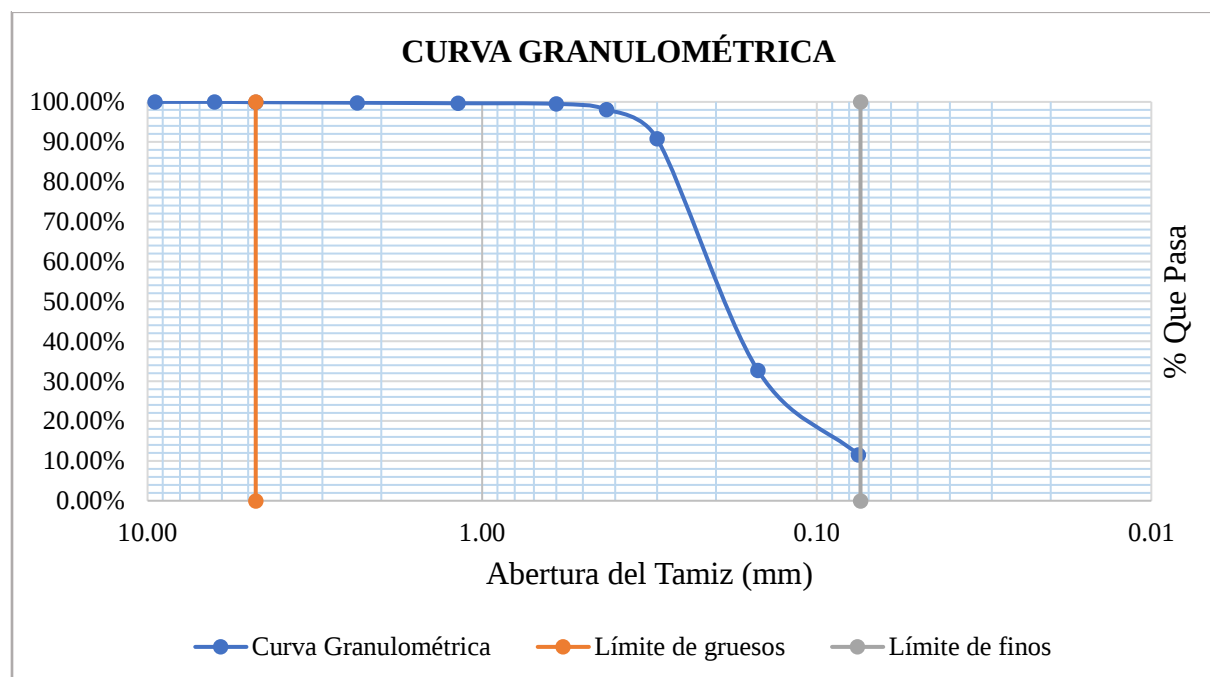
- Peso del material antes del lavado: 1320.11 g
- Peso del material después del lavado: 1188.99 g
- Pérdida de material después del lavado: 131.12 g

Tabla 23
Análisis granulométrico del material S3

Tamiz	Diámetro en (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido corregido (g)	% retenido	% retenido acumulado	% pasa acumulado
3/8'	9.50	0.00	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1/4'	6.30	0.00	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
#4	4.75	0.84	0.84	0.06%	0.06%	99.94%
#8	2.36	1.78	1.78	0.14%	0.20%	99.80%
#16	1.18	1.84	1.84	0.14%	0.34%	99.66%
#30	0.60	2.12	2.13	0.16%	0.50%	99.50%
#40	0.43	18.56	18.61	1.41%	1.91%	98.09%
#50	0.30	96.57	96.81	7.33%	9.24%	90.76%
#100	0.15	764.12	766.02	58.03%	67.27%	32.73%
#200	0.08	279.08	279.78	21.19%	88.46%	11.54%
Charola		20.80	152.30	11.54%	100.00%	
Lavado		131.12		100.00%		
Material ensayado		1185.71				
Peso total ensayado		1316.83	ERROR	0.25%		

Nota: Se observa la distribución granulométrica correspondiente a la muestra S3 Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 3
Curva Granulométrica S3



Nota: Fuente: Elaboración Propia.

Muestra S4 (Cuarto estrato)

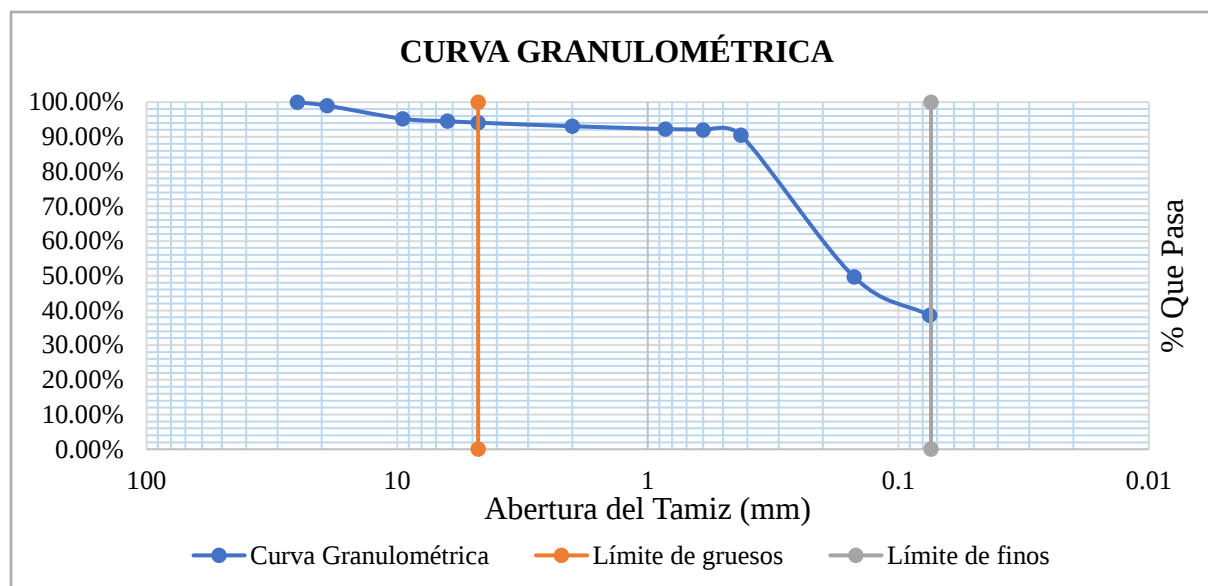
- Peso del material antes del lavado: 3310.00 g
- Peso del material después del lavado: 1948.30 g
- Pérdida de material después del lavado: 1361.70 g

Tabla 24*Análisis granulométrico del material S4*

Tamiz	Diámetro en (mm)	Peso retenido (g)	Peso retenido corregido (g)	% Retenido	% Retenido acumulado	% Pasa acumulado
1"	25	0	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
3/4'	19	33.89	33.93	1.03%	1.03%	98.97%
3/8'	9.5	124.6	124.76	3.77%	4.79%	95.21%
1/4'	6.3	22.81	22.84	0.69%	5.48%	94.52%
#4	4.75	14.31	14.33	0.43%	5.92%	94.08%
#10	2	33.87	33.91	1.02%	6.94%	93.06%
#20	0.85	26.97	27.00	0.82%	7.76%	92.24%
#30	0.6	8.4	8.41	0.25%	8.01%	91.99%
#40	0.425	50.43	50.49	1.53%	9.54%	90.46%
#100	0.15	1350.58	1352.27	40.85%	50.39%	49.61%
#200	0.075	364.58	365.04	11.03%	61.42%	38.58%
Charola		71.03	1277.02	38.58%	100.00%	
Lavado		1204.40		0.00%		
Material ensayado		2101.47				
Peso total ensayado		3305.87	ERROR	0.12%		

Nota: Se utilizó la serie de tamices indicados en la norma.

Tabla 25
Curva Granulométrica de la muestra S4



Nota: Fuente: Elaboración Propia.

4.2.2. Resultados de los límites de Atterberg

Límite líquido, se tomaron 3 muestras del suelo y se determinó el contenido de humedad correspondiente a cada una. Con los resultados obtenidos, se elaboró una curva de regresión logarítmica para definir el límite líquido del material, como se muestra en las tablas siguientes.

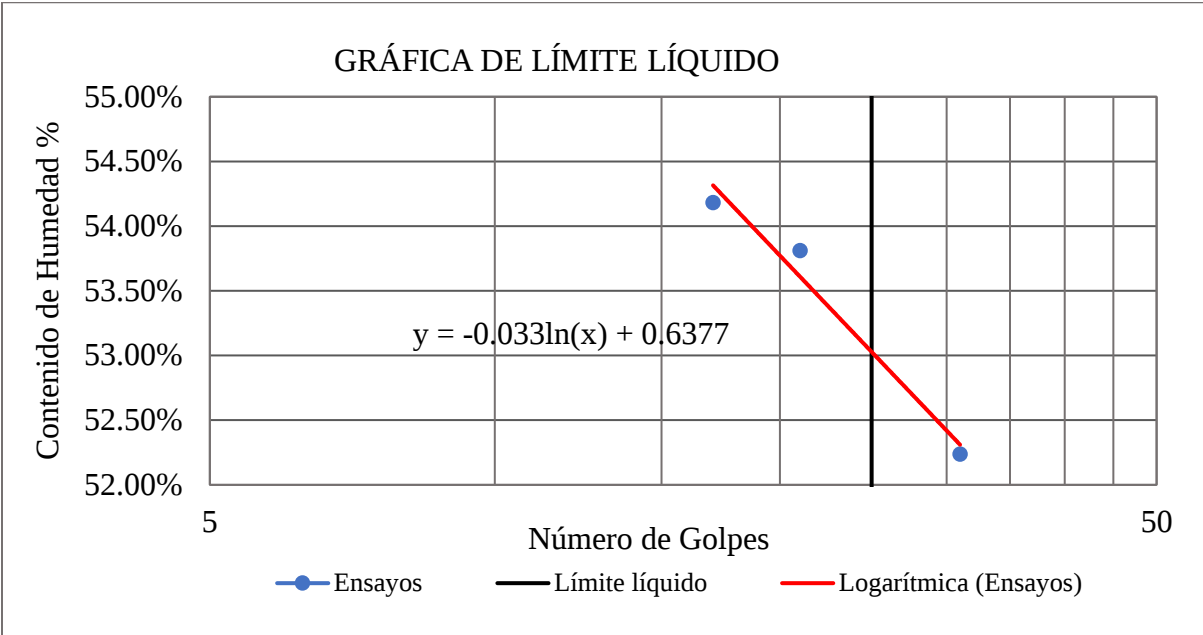
Muestra S1 (Primer estrato)

Tabla 26
Determinación de límite líquido

DESCRIPCIÓN	LÍMITE LÍQUIDO		
	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de cápsula	C-8	C-9	C-5
Peso de la cápsula	21.2	21.15	21.77
Peso cápsula. + suelo húmedo	36.31	38.9	34.01
Peso cápsula + suelo seco	31	32.69	29.81
RANGO DE GOLPES	15-25	20-30	25-35
Número de golpes	17	21	31
Peso suelo seco	9.8	11.54	8.04
Peso agua	5.31	6.21	4.2
% humedad	54.18%	53.81%	52.24%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 4
Límite líquido



Nota. Fuente: Elaboración propia

Se calcula la recta de regresión logarítmica.

$$LL = -0.033\ln(x) + 0.6377 \rightarrow x = 25$$

$$LL = 53\%$$

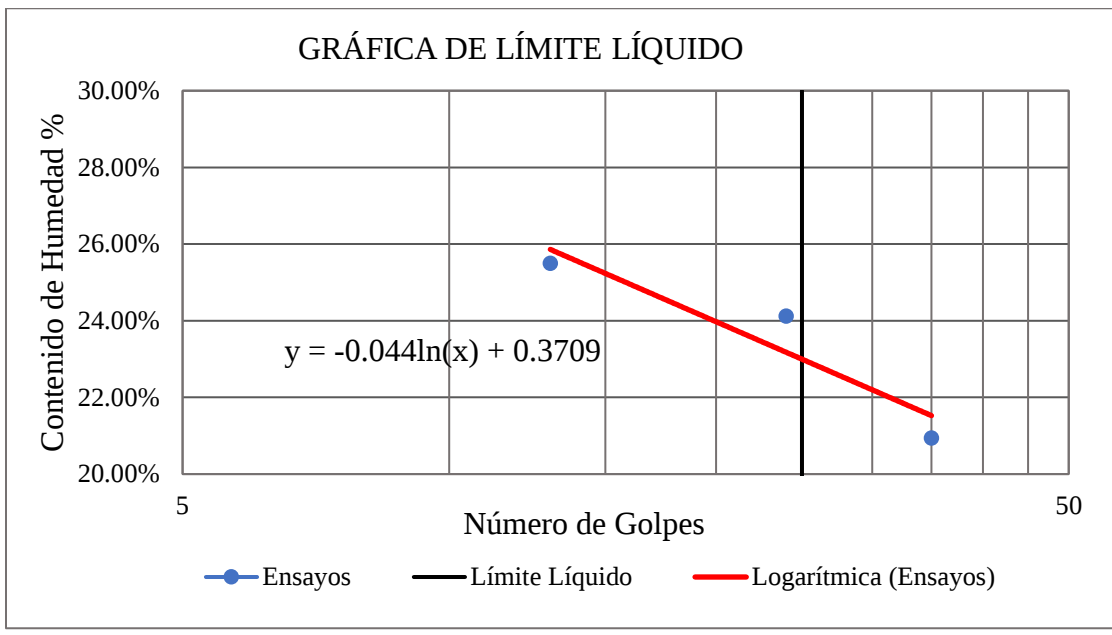
Muestra S2 (Segundo estrato)

Tabla 27
Determinación de límite líquido

LÍMITE LÍQUIDO			
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de cápsula	LD3	ML1	ML8
Peso de la cápsula	23.54	25.62	24.5
Peso cápsula. + suelo húmedo	44.21	45.02	45.06
Peso cápsula + suelo seco	40.01	41.25	41.5
RANGO DE GOLPES	15-25	20-30	25-35
Número de golpes	13	24	35
Peso suelo seco	16.47	15.63	17
Peso agua	4.2	3.77	3.56
% Humedad	25.50%	24.12%	20.94%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 5
Límite líquido



Nota. Fuente: Elaboración propia

Se calcula la recta de regresión logarítmica

$$LL = -0.044\ln(x) + 0.3709 \rightarrow x = 25$$

$$LL = 22.93\%$$

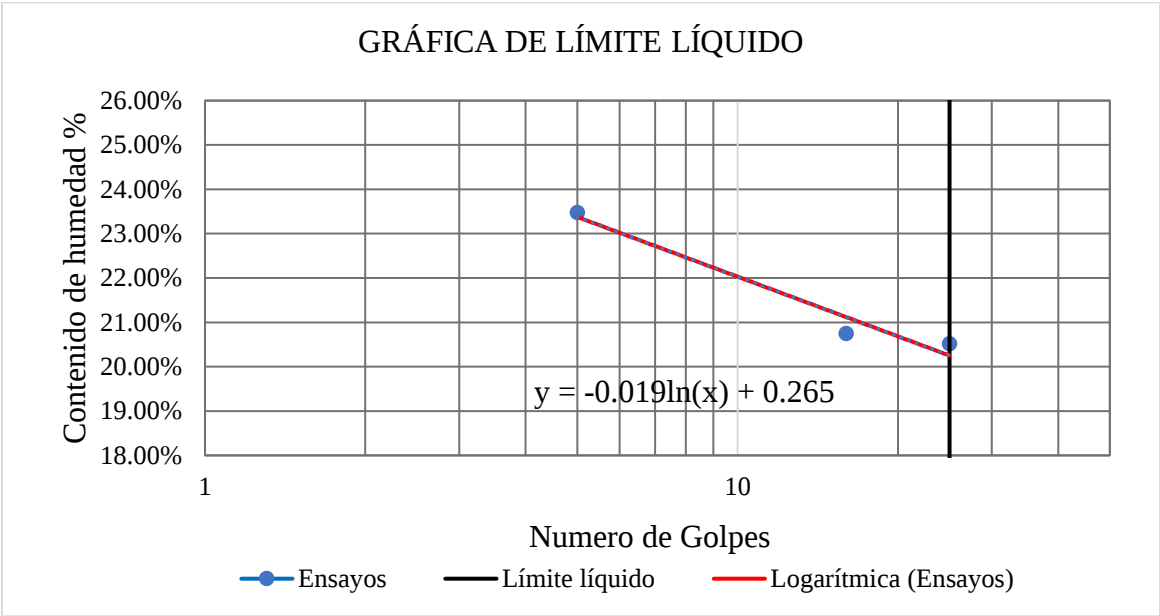
Muestra S3 (Tercer estrato)

Tabla 28
Determinación de límite líquido

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS			
	1	2	3	4
Descripción de cápsula.		LB2	H1L	T1
Peso de la cápsula		21.61	21.15	21.67
Peso cápsula. + suelo húmedo		33.24	35	28.77
Peso cápsula + suelo seco		31.26	32.62	27.42
RANGO DE GOLPES	25-35	20-30	15-25	
Número de golpes		25	16	5
Peso suelo seco		9.65	11.47	5.75
Peso agua		1.98	2.38	1.35
% humedad		20.52%	20.75%	23.48%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 6
Límite líquido



Nota. Fuente: Elaboración propia

Se calcula la recta de regresión logarítmica

$$LL = -0.019\ln(x) + 0.265 \rightarrow x = 25$$

$$LL = 20.38\%$$

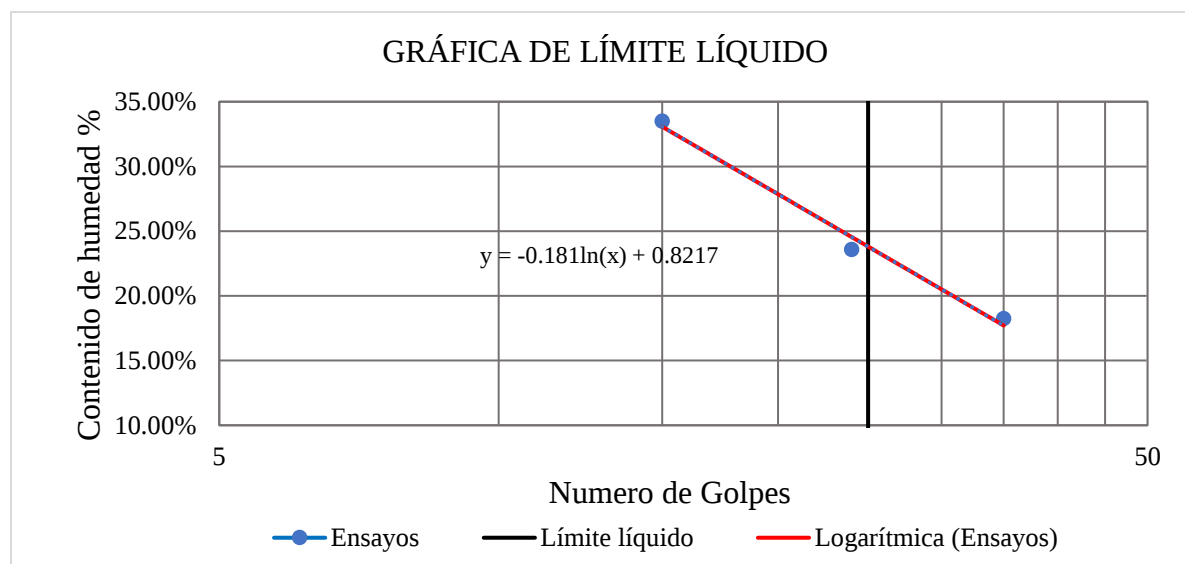
Muestra S4 (Cuarto estrato)

Tabla 29
Determinación de límite líquido

LÍMITE LÍQUIDO			
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de cápsula	M7	M8	M9
Peso de la cápsula	39.5	37.7	37.24
Peso cápsula. + suelo húmedo	57	52.9	53.26
Peso cápsula + suelo seco	54.3	50	49.24
RANGO DE GOLPES	25-35	20-30	15-25
Número de golpes	35	24	15
Peso suelo seco	14.8	12.3	12
Peso agua	2.7	2.9	4.02
% humedad	18.24%	23.58%	33.50%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7
Límite líquido



Nota. Fuente: Elaboración propia

Se calcula la recta de regresión logarítmica

$$LL = -0.181\ln(x) + 0.8217 \rightarrow x = 25$$

$$LL = 23.91\%$$

Límite plástico e índice de Plasticidad, ensayo de Límite plástico se realizó en base a la norma peruana, tomando 3 muestras y analizando su humedad para cada una.

Muestra S1 (Primer estrato)

Tabla 30
Determinación del límite Plástico

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de cápsula	C-1	C-7	C-6
Peso de la cápsula	21.87	21.59	22.63
Peso cápsula. + suelo húmedo	23.65	23.33	24.35
Peso cápsula + suelo seco	23.27	22.95	23.97
Peso suelo seco	1.4	1.36	1.34
Peso agua	0.38	0.38	0.38
% humedad	27.14%	27.94%	28.36%

Nota. Fuente: Elaboración propia

El límite plástico es el promedio de las 3 humedades obtenidas.

$$\text{Límite plástico (LP)} = 28\%$$

El índice de plasticidad resulta de la diferencia entre el límite líquido y límite plástico

$$\text{Índice de Plasticidad (IP)} = 25 \%$$

Muestra S2 (Segundo estrato)

No tiene índice de plasticidad.

$$\text{Límite líquido (LL)} = NP \rightarrow \text{Índice de Plasticidad (IP)} = NP$$

Muestra S3 (Tercer estrato)

No tiene índice de plasticidad.

$$\text{Límite líquido (LL)} = NP \rightarrow \text{Índice de Plasticidad (IP)} = NP$$

Muestra S4 (Cuarto estrato)

Tabla 31

Límite plástico muestra S4

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de cápsula	L1d	LB1	
Peso de la cápsula	40	38.2	
Peso cápsula. + suelo húmedo	47.8	48	
Peso cápsula + suelo seco	46.7	46.5	
Peso suelo seco	6.7	8.3	
Peso agua	1.1	1.5	
% humedad	16.42%	18.07%	

Nota. Fuente: Elaboración propia

El límite plástico es el promedio de las 3 humedades obtenidas.

$$\text{Límite plástico (LP)} = 17.25\%$$

El índice de plasticidad resulta de la diferencia entre el límite líquido y límite plástico

$$\text{Índice de plasticidad (IP)} = 6.67 \%$$

4.2.3. Resultados de la clasificación del suelo

Realizado el ensayo granulométrico y los límites de Atterberg para cada muestra de talud, se puede clasificar el tipo de suelo que corresponde.

Muestra S1 (Primer estrato)

Clasificación SUCS.

Tabla 32

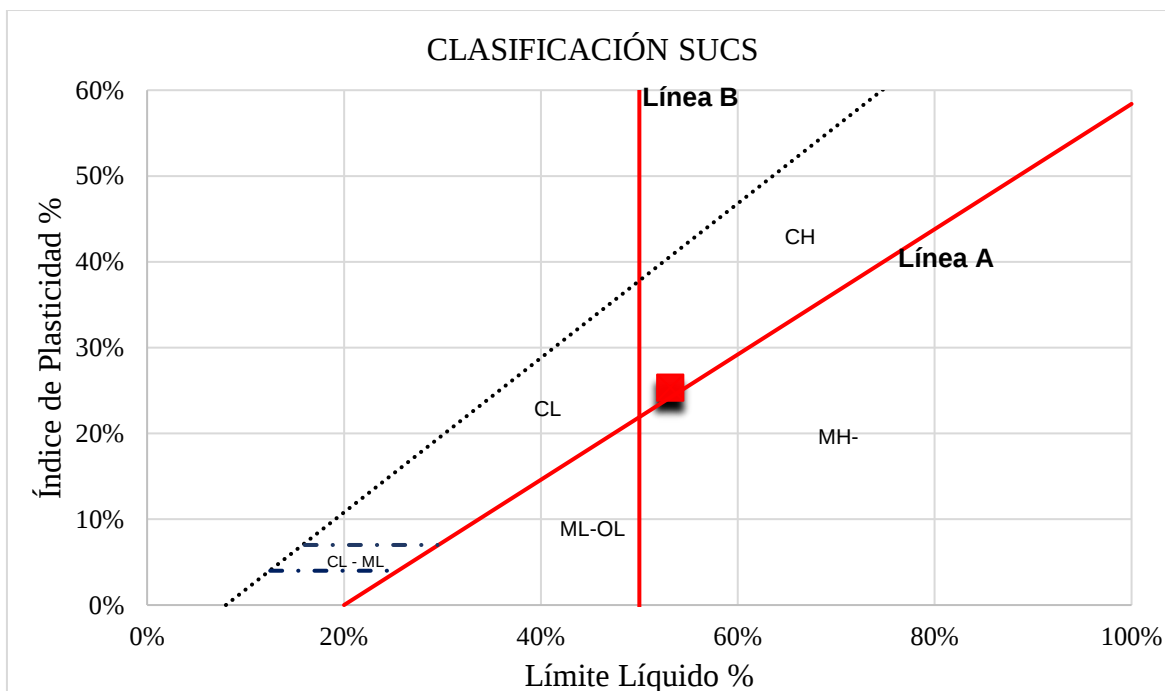
Recolección de datos para clasificación SUCS

DATOS PARA CLASIFICACIÓN					
Granulometría		Fracción gruesa		Límites de Consistencia	
% de finos=	91.27%	% de Grava=	3.18%	LL=	53%
% de gruesos=	8.73%	% de Arena=	96.82%	LP=	28%
Total=	100.00%	Total=	100.00%	IP=	25%
		Coeficientes			
% de Grava=	0.28%	Cu=	-		
% de Arena=	8.45%	Cc=	-		
Total=	8.73%				

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 8.

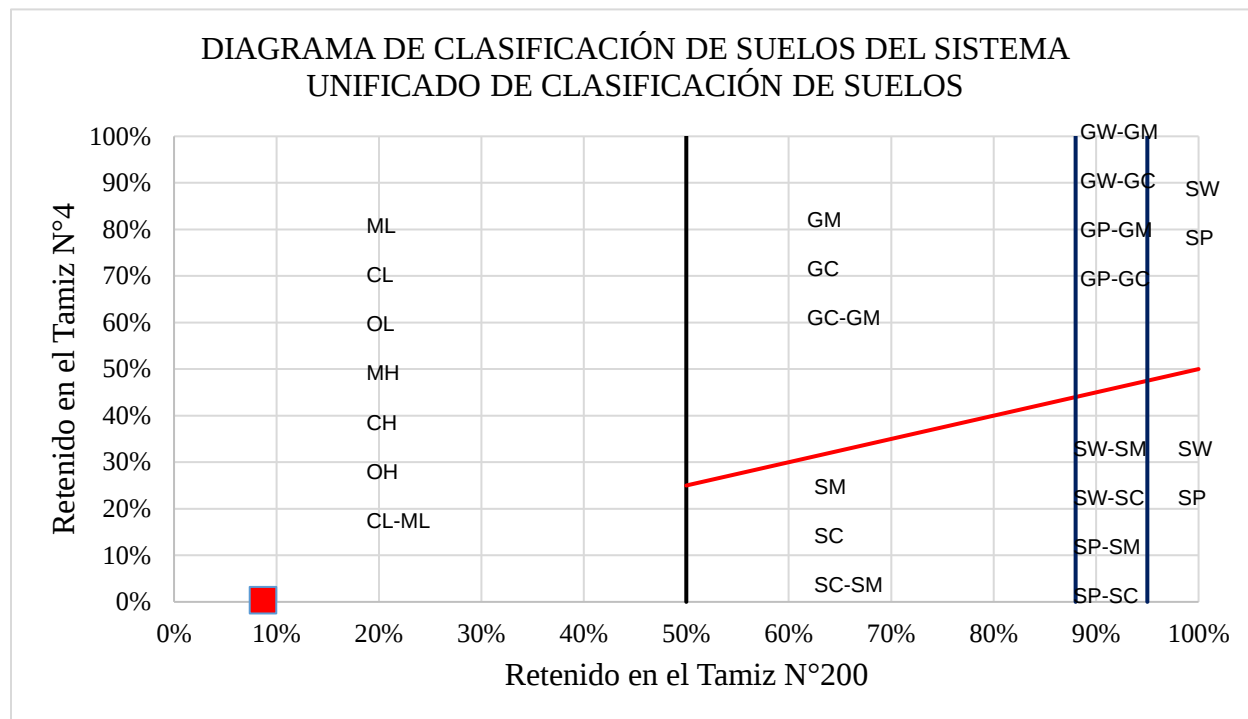
Carta de plasticidad SUCS, muestra S1



Nota. Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Gráfica 9

Diagrama de clasificación por el método SUCS, muestra S1



Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Según los datos de clasificación y siguiendo los lineamientos para clasificación de suelos por el método SUCS, la muestra S1 del talud se clasifica como:

CH-Arcilla de alta plasticidad con arena

AASHTO**Tabla 33**

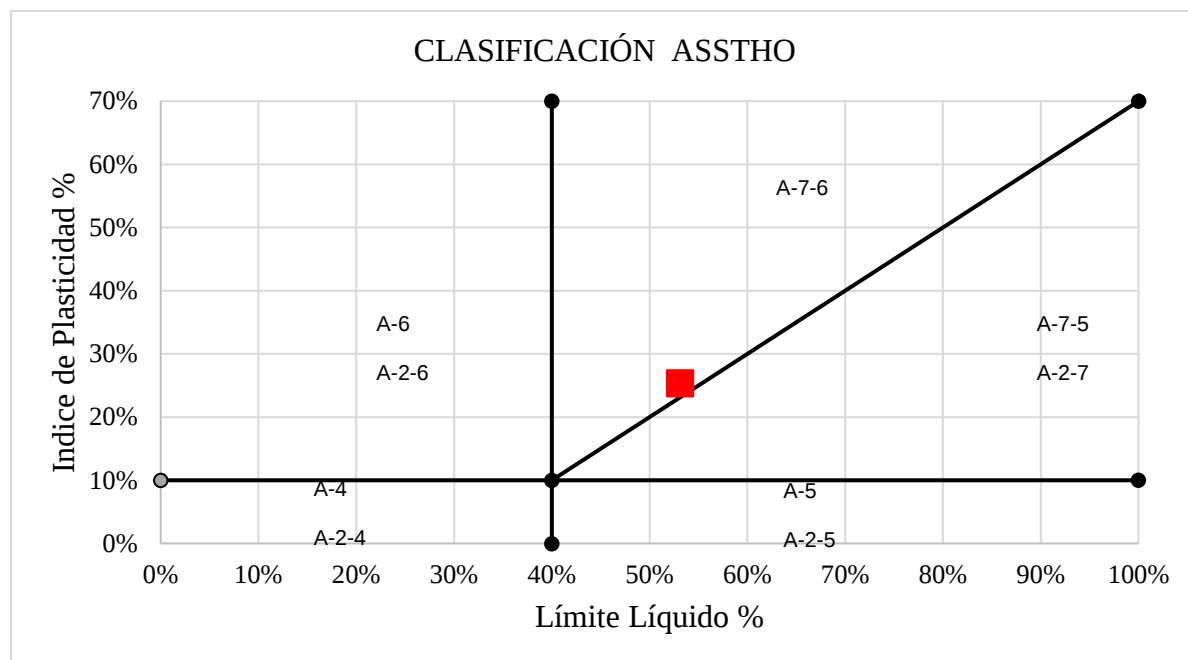
Datos para clasificación AASHTO

DATOS PARA CLASIFICACIÓN	
% Pasa el tamiz N° 40 =	96.02%
% Pasa el tamiz N° 200 =	91.27%
Límites de consistencia	
Límite líquido (LL)=	53%
Límite plástico (LP)=	28%
Índice de plasticidad (IP)=	25%
Índice de grupo	
IG=	16.8

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 10

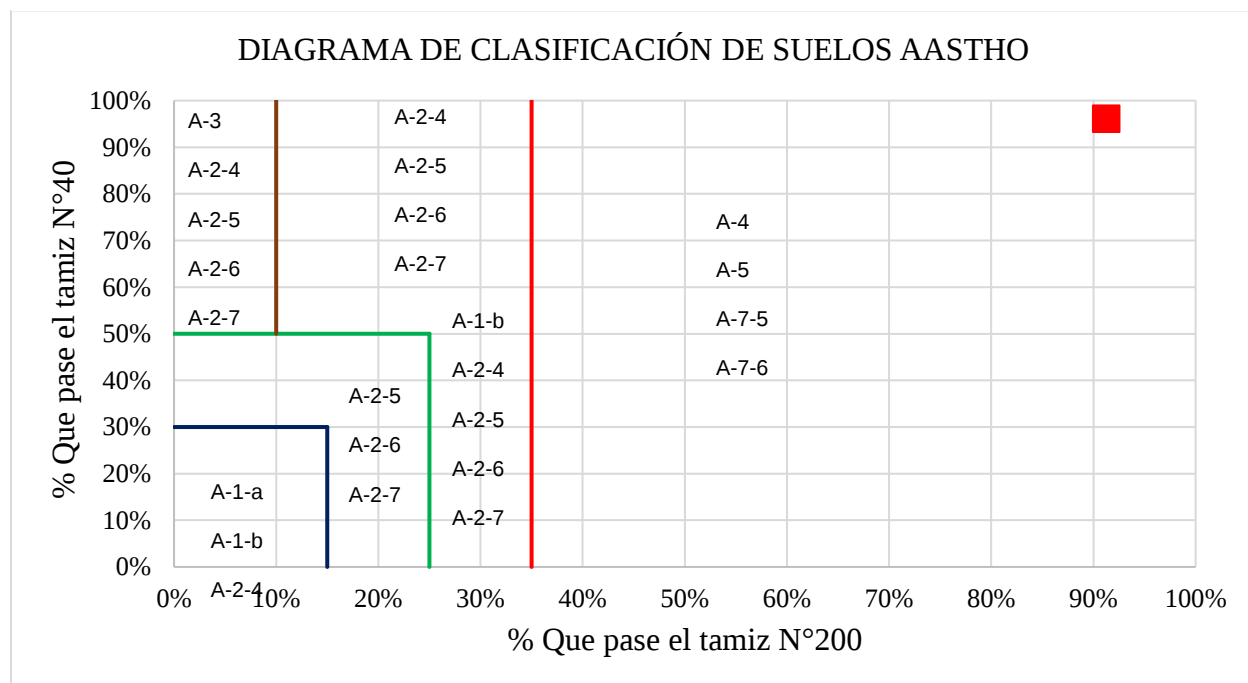
Carta de plasticidad AASHTO, muestra S1.



Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Gráfica 11

Diagrama de clasificación por el método AASHTO, muestra 1



Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Según los datos de clasificación y siguiendo los lineamientos para clasificación de suelos por el método AASHTO, la muestra S1 del talud se clasifica como.

A-7-6 (17) Suelo arcilloso de mala calidad

Muestra S2 (Segundo estrato)

Clasificación SUCS.

Tabla 34

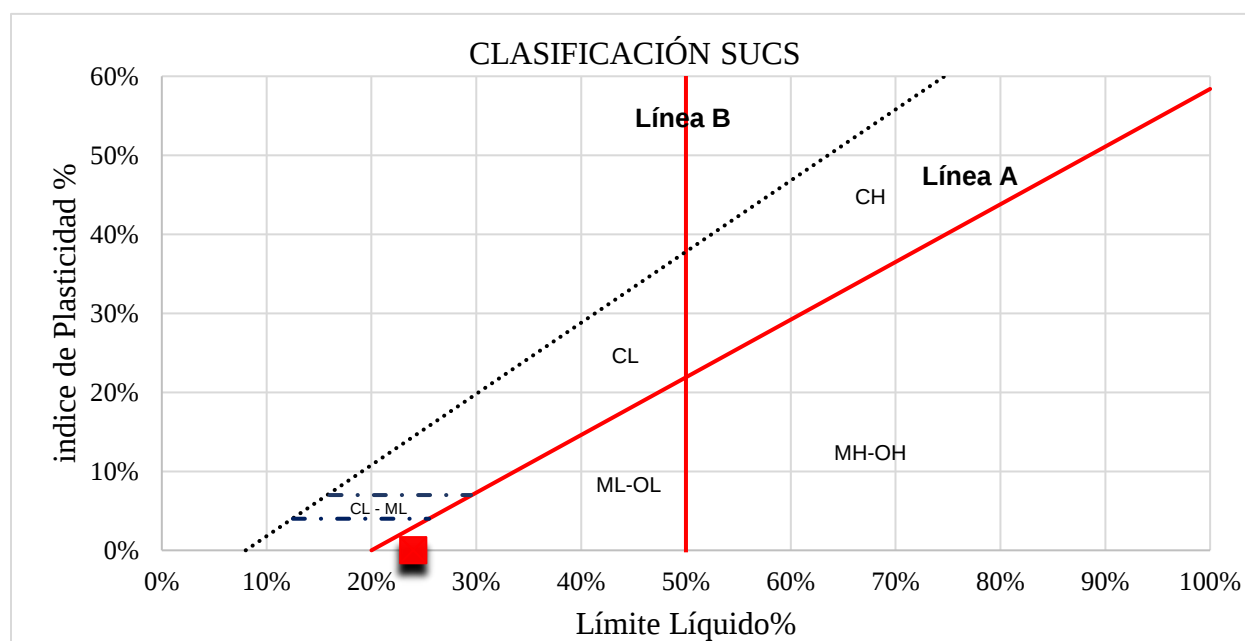
Recolección de datos para clasificación SUCS, muestra S2

DATOS PARA LA CLASIFICACIÓN.					
Granulometría		Fracción gruesa		Límites de consistencia	
% de finos=	12.02%	% de Grava=	67.53%	LL=	24%
% de gruesos=	87.98%	% de Arena=	32.47%	LP=	NP
Total=	100.00%	Total=	100.00%	IP=	NP
		Coeficientes			
% de Grava=	59.41%	Cu=	146.11		
% de Arena=	28.57%	Cc=	6.54		
Total=	87.98%				

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 12

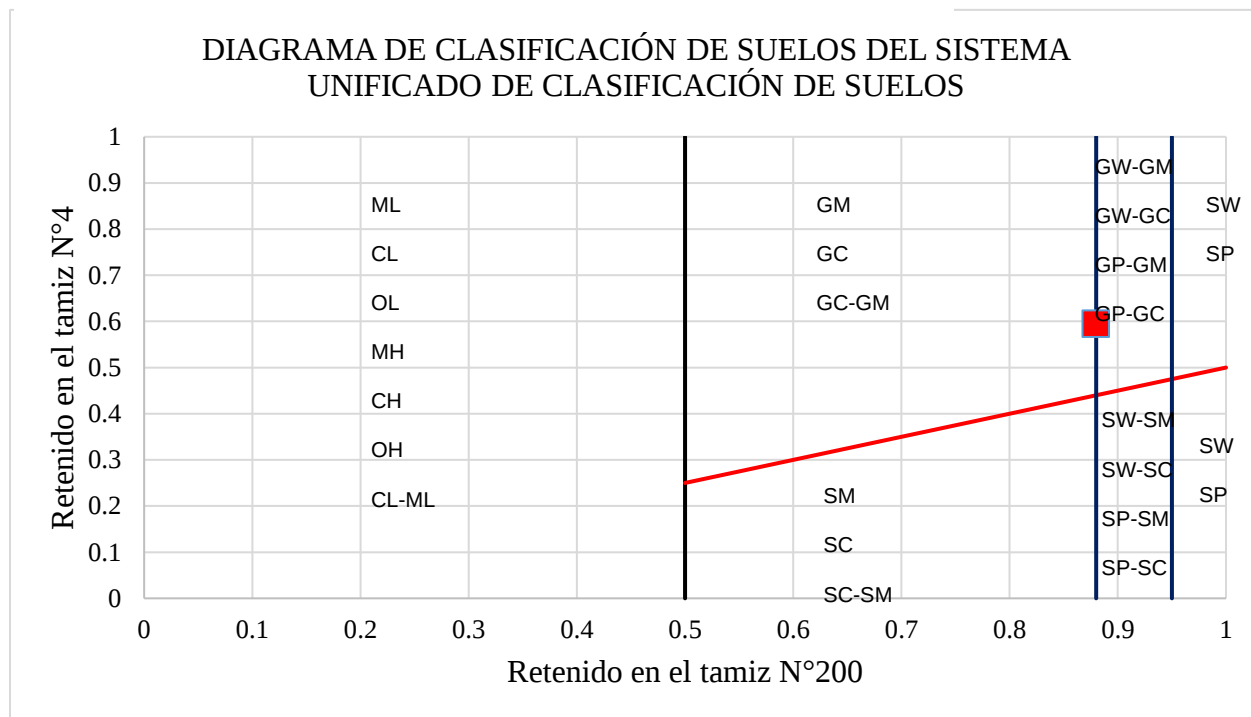
Carta de plasticidad SUCS, muestra S2



Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Gráfica 13

Diagrama de clasificación por el método SUCS, muestra S2



Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Según los datos de clasificación y siguiendo los lineamientos para clasificación de suelos por el método SUCS, la muestra S2 del talud se clasifica como.

GP-GM, Grava pobremente graduada con limo y arena

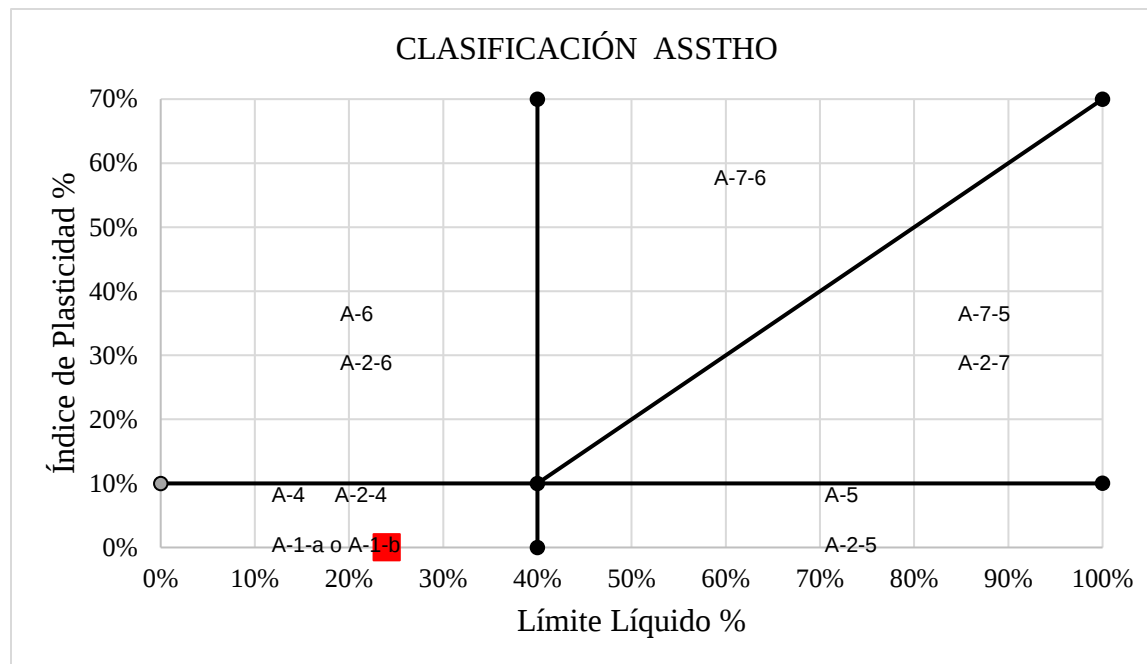
AASHTO.

Tabla 35

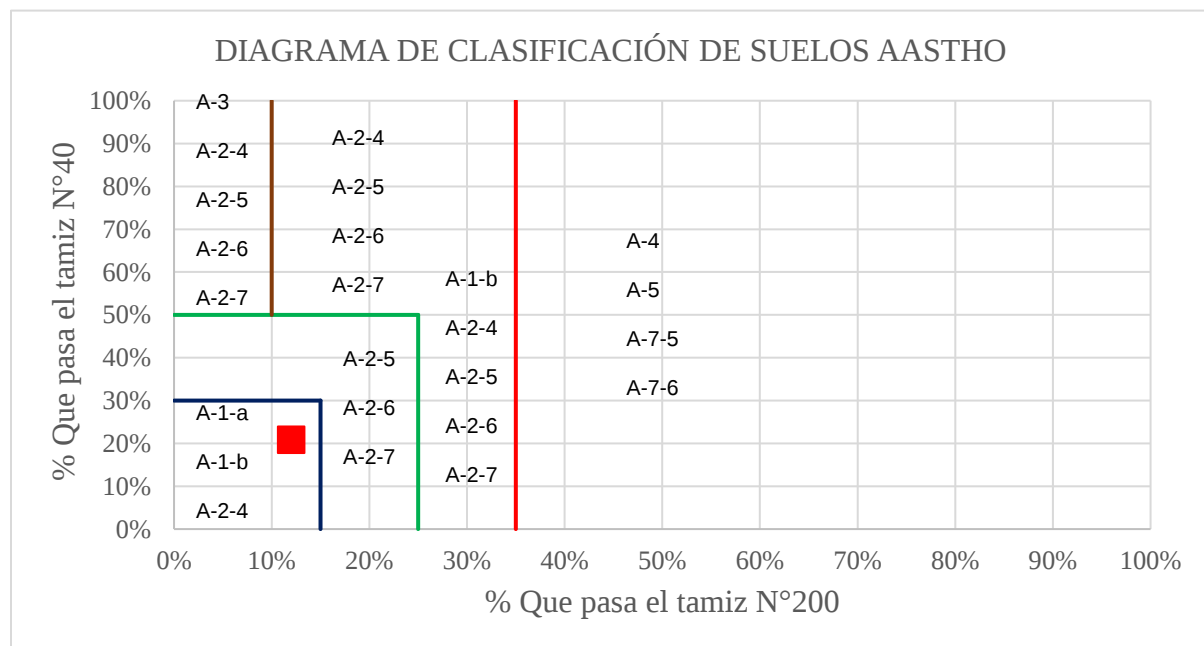
Datos para clasificación AASHTO para material S2

DATOS PARA CLASIFICACIÓN	
% pasa el tamiz N° 40 =	20.78%
% pasa el tamiz N° 200 =	12.02%
Límites de consistencia	
Límite líquido (LL)=	24%
Límite plástico (LP)=	NP
Índice de plasticidad (IP)=	NP
Índice de grupo	
IG=	0

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 14*Carta de plasticidad AASHTO, muestra S2*

Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Gráfica 15*Diagrama de clasificación por el método AASHTO, muestra S2*

Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Según los datos de clasificación y siguiendo los lineamientos para clasificación de suelos por el método AASHTO, además de considerar características tipológicas, se tiene:

A-1-a (0) Grava con fragmentos de piedra y arena

Muestra S3 (Tercer estrato)

Clasificación SUCS.

Tabla 36

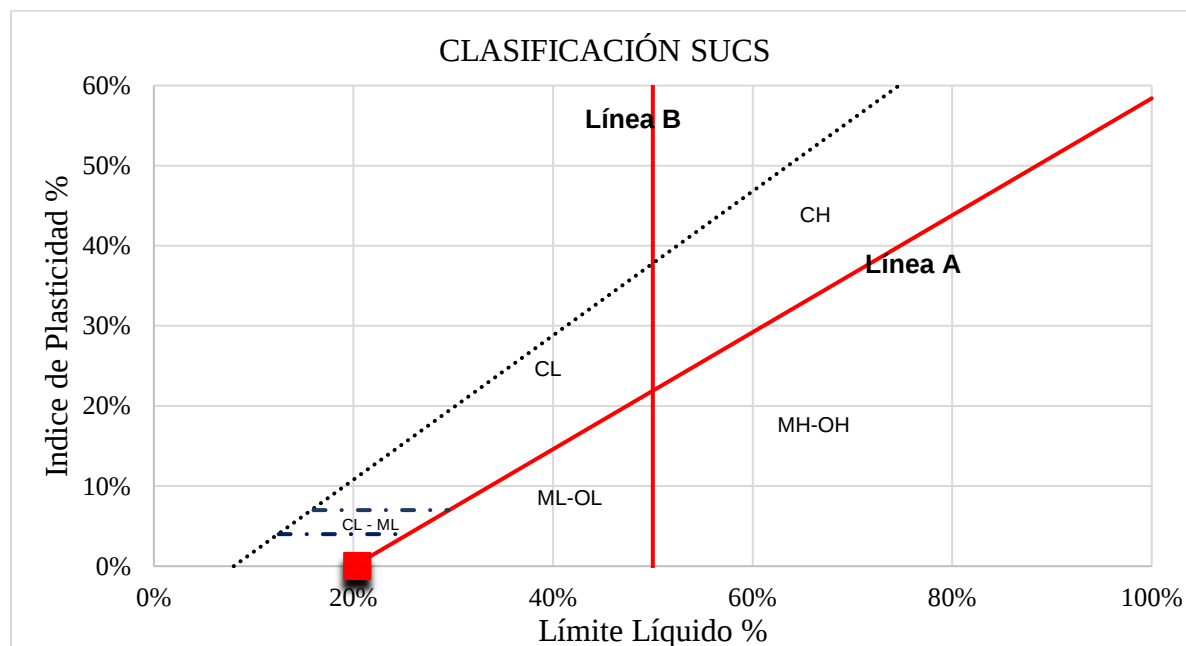
Recolección de datos para clasificación SUCS, muestra S3

DATOS PARA LA CLASIFICACIÓN.					
Granulometría		Fracción gruesa		Límites de consistencia	
% de finos=	11.54%	% de Grava=	0.07%	LL=	20%
% de gruesos=	88.46%	% de Arena=	99.93%	LP=	NP
Total=	100.00%	Total=	100.00%	IP=	NP
Coefficientes					
% de Grava=	0.06%	Cu=	3.42		
% de Arena=	88.40%	Cc=	1.23		
Total=	88.46%				

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 16

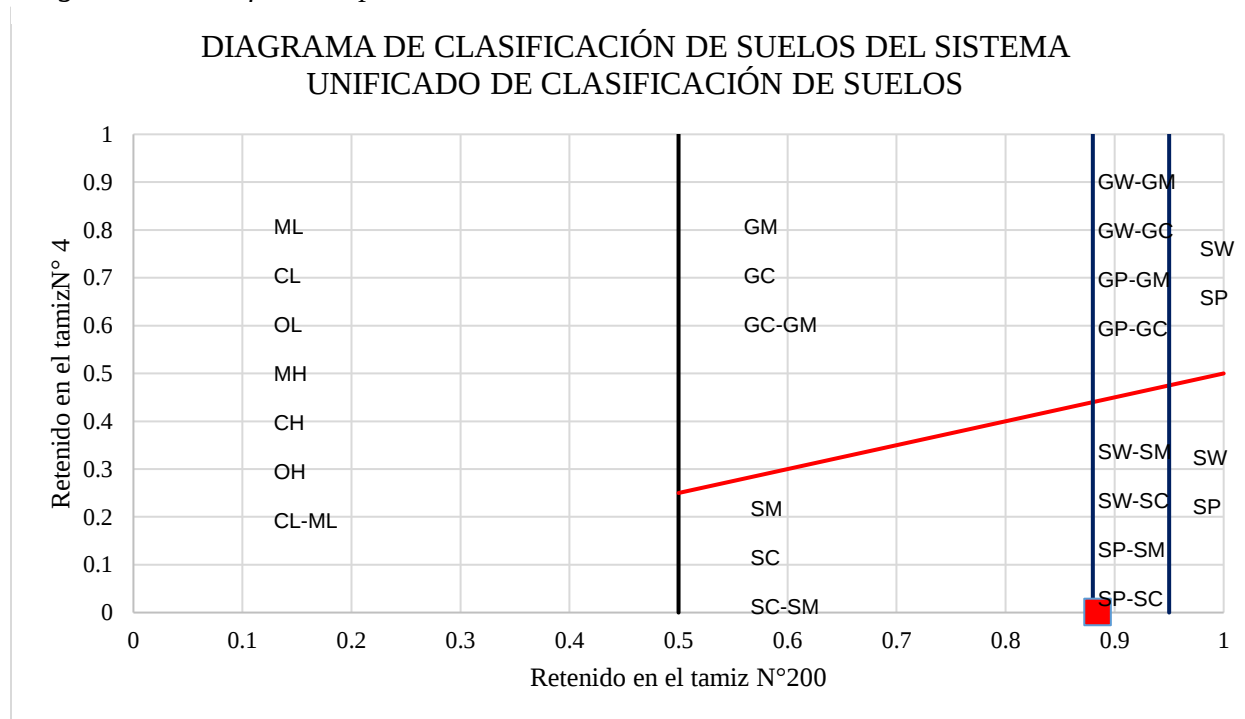
Carta de plasticidad SUCS, muestra S3



Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Gráfica 17

Diagrama de clasificación por el método SUCS, muestra S3



Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Según los datos de clasificación y siguiendo los lineamientos para clasificación de suelos por el método SUCS, la muestra S3 del talud se clasifica como

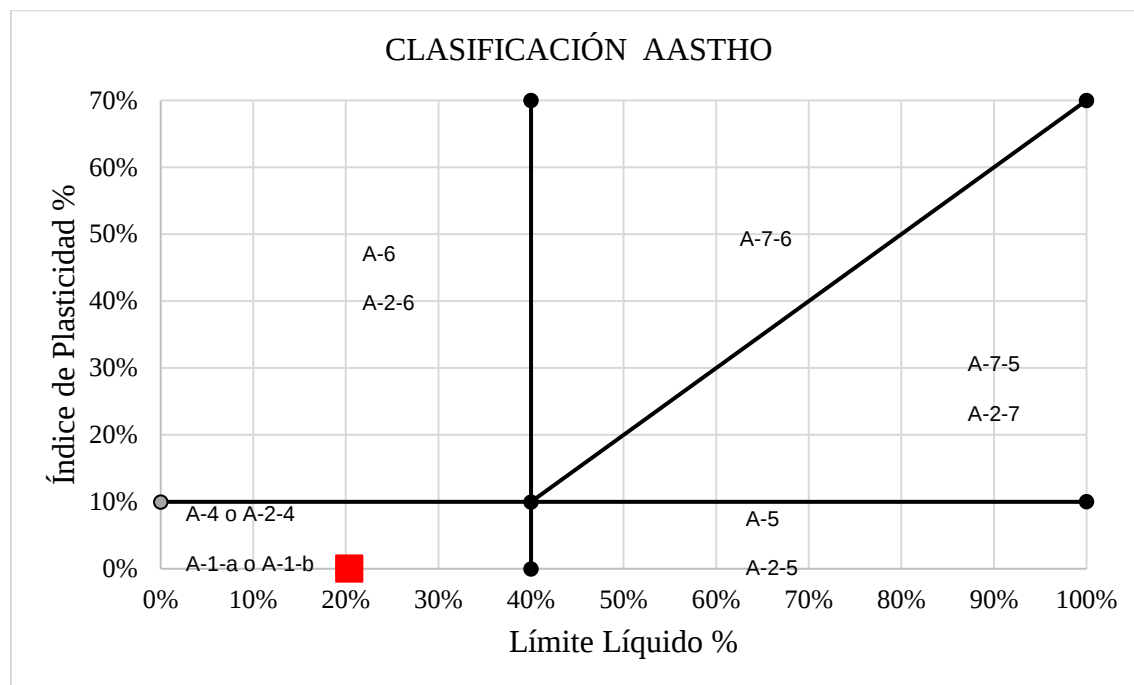
SP-SM Arena limosa de baja plasticidad pobremente gradada.

AASHTO.**Tabla 37**

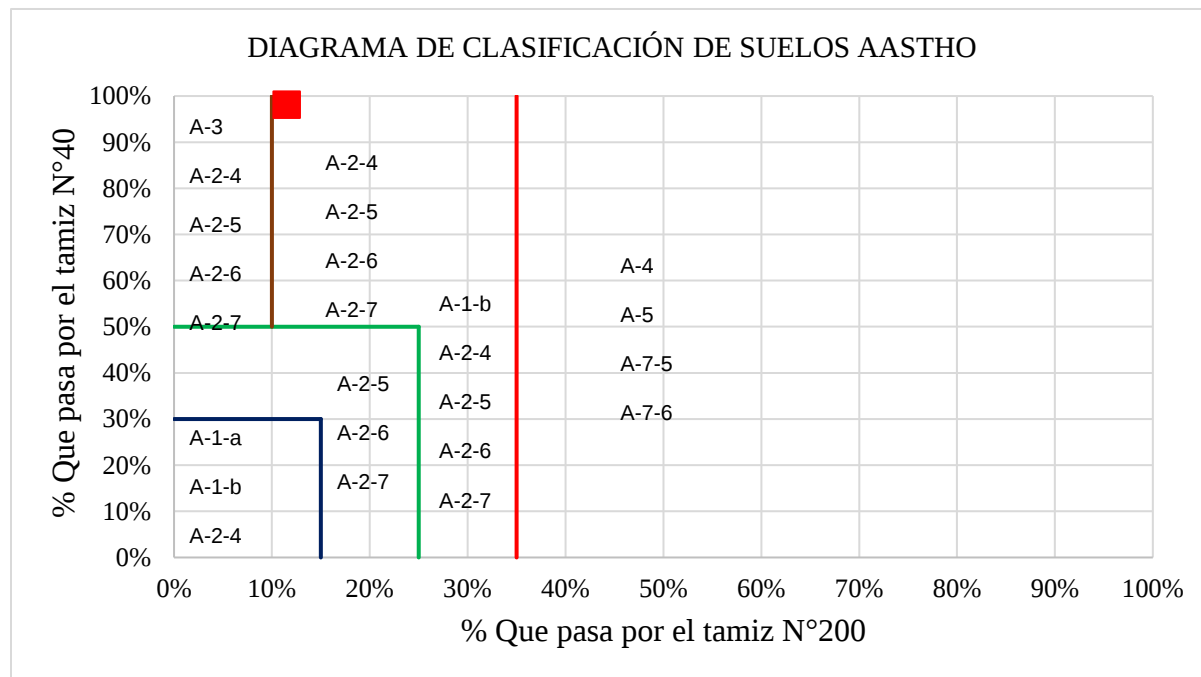
Datos para clasificación AASHTO

DATOS PARA CLASIFICACIÓN	
% Pasa el tamiz N° 40 =	98.09%
% Pasa el tamiz N° 200 =	11.54%
Límites de consistencia	
Límite líquido (LL)=	20%
Límite plástico (LP)=	NP
Índice de plasticidad (IP)=	NP
Índice de grupo	
IG=	0

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 18*Carta de plasticidad AASHTO, muestra S3*

Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Gráfica 19*Diagrama de clasificación por el método AASHTO, muestra S3*

Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Siguiendo los lineamientos para clasificación de suelos por el método AASHTO, además de considerar características tipológicas, la muestra S3 del talud se clasifica como.

A-2-4 (0) Arena con limo.

Muestra S4 (Cuarto estrato)

Clasificación SUCS.

Tabla 38

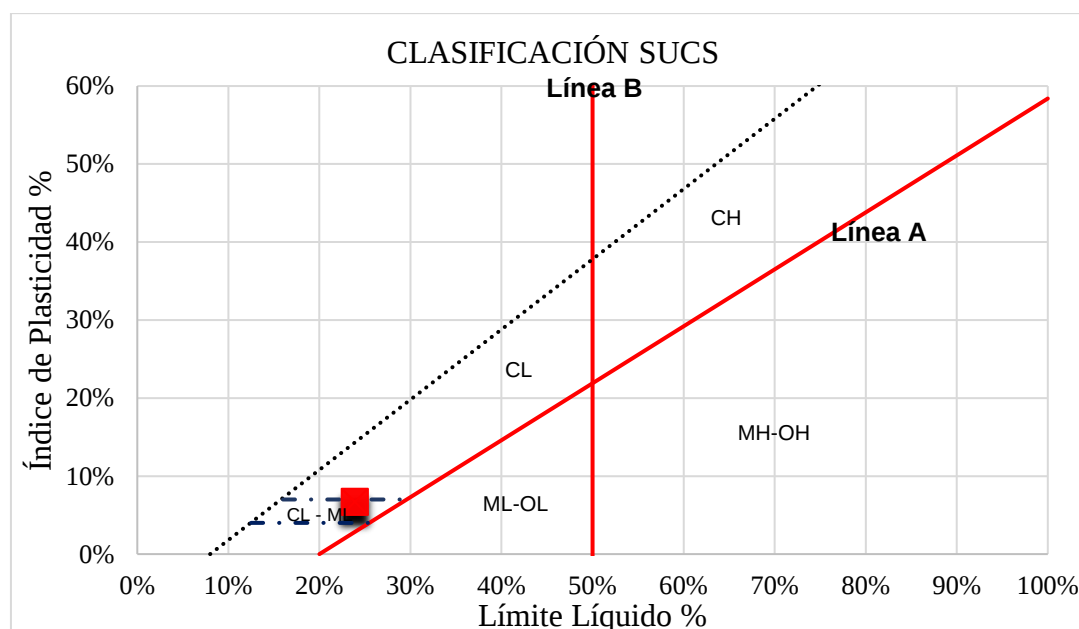
Recolección de datos para clasificación SUCS, muestra S4

DATOS PARA LA CLASIFICACIÓN.					
Granulometría		Fracción gruesa		Límites de consistencia	
% de finos=	38.58%	% de Grava=	9.63%	LL=	23.9%
% de gruesos=	61.42%	% de Arena=	90.37%	LP=	17.2%
Total=	100.00%	Total=	100.00%	IP=	6.70%
% de Grava=		Coeficientes			
5.92%					
% de Arena=	55.50%	Cu=	-		
Total=	61.42%	Cc=	-		

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 20

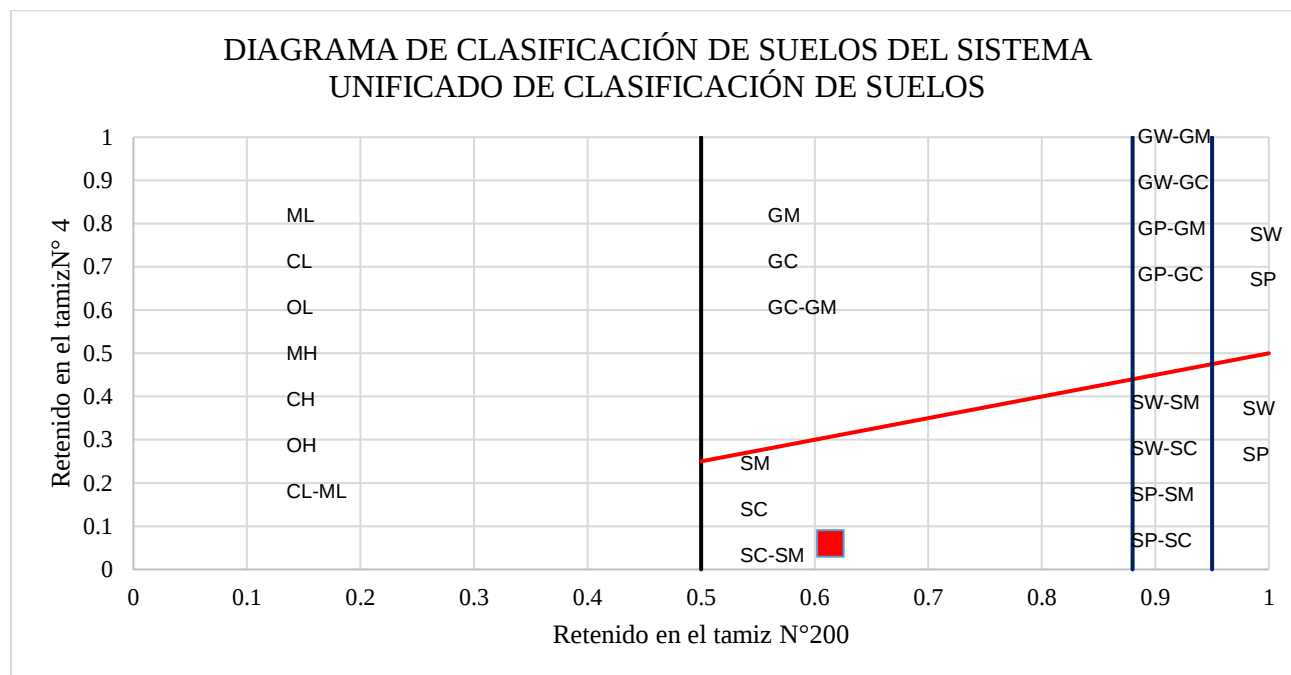
Carta de plasticidad SUCS, muestra S4



Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Gráfica 21

Diagrama de clasificación por el método SUCS, muestra S4



Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Según los datos de clasificación y siguiendo los lineamientos para clasificación de suelos por el método SUCS, la muestra S4 del talud se clasifica como

SC-SM Arena limosa arcillosa de baja plasticidad.

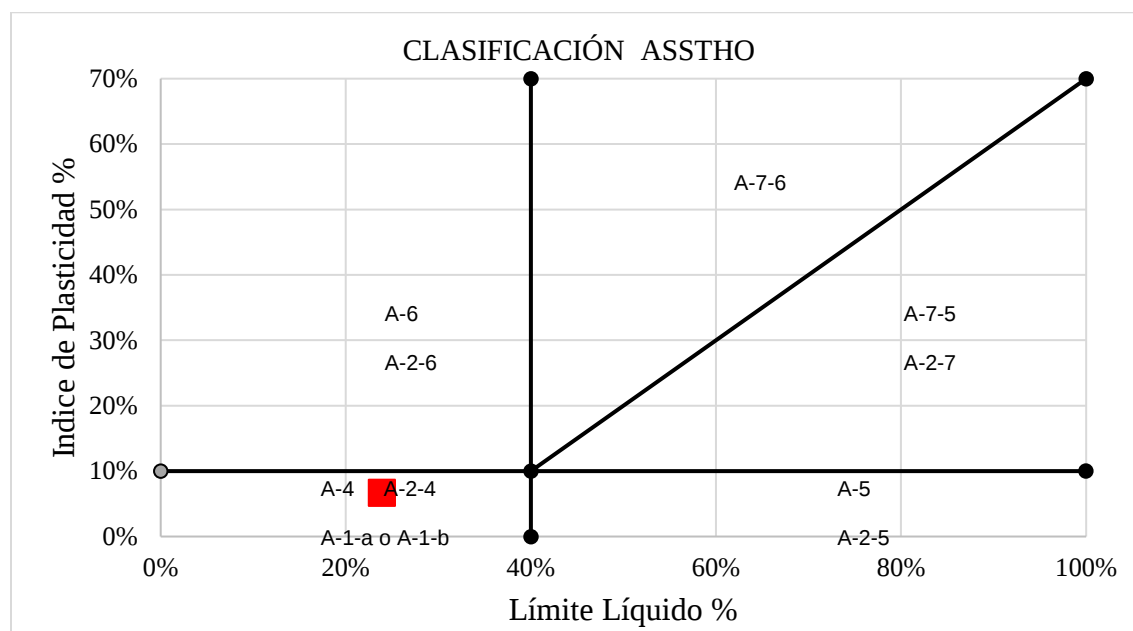
AASHTO.

Tabla 39

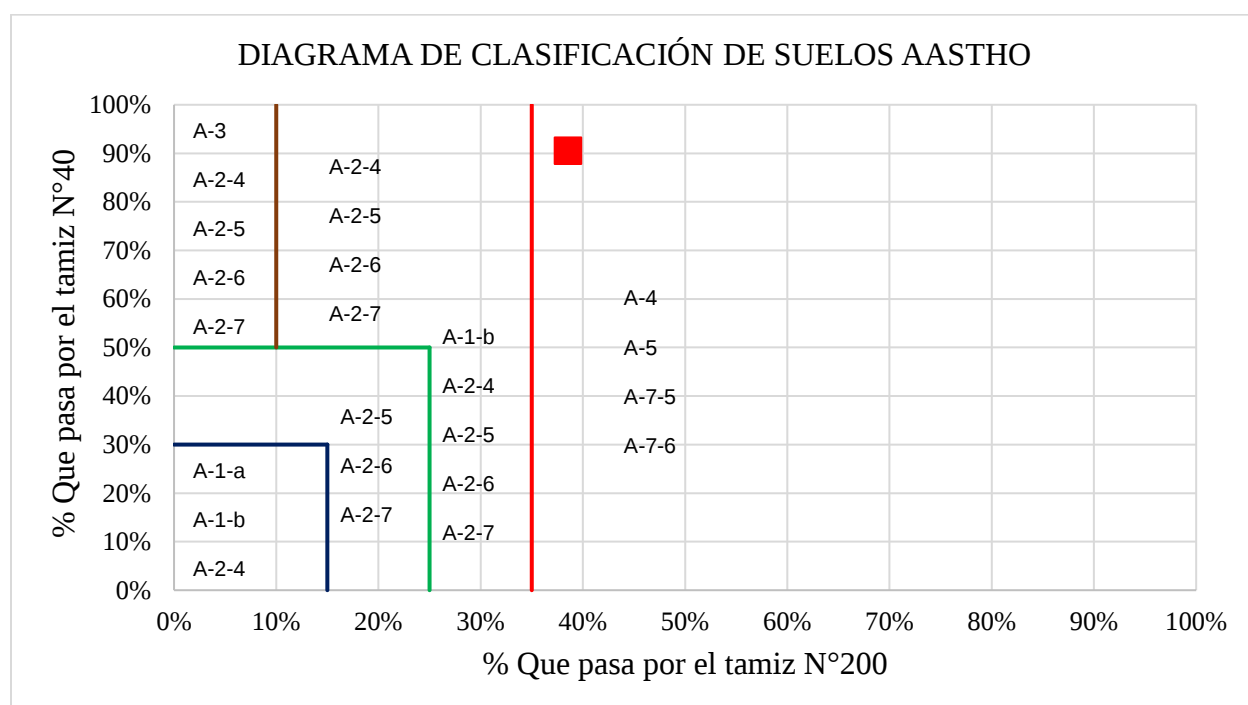
Datos para clasificación AASHTO

DATOS PARA CLASIFICACIÓN	
% Pasa el tamiz N° 40 =	90.46%
% Pasa el tamiz N° 200 =	38.58%
Límites de consistencia	
Límite líquido (LL)=	23.9%
Límite plástico (LP)=	17.2%
Índice de plasticidad (IP)=	%
Índice de grupo	
IG=	0.7

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 22*Carta de plasticidad AASHTO, muestra S4*

Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Gráfica 23*Diagrama de clasificación por el método AASHTO, muestra S4*

Fuente: Adaptado de (Bowles, 1986)

Siguiendo los lineamientos para clasificación de suelos por el método AASHTO, además de considerar características tipológicas, la muestra S4 del talud se clasifica como.

A-4 (0) Arena limo arcillosa.

Material a estudiar. Realizada la caracterización del talud, se escogió el material S3, correspondiente a una Arena limosa, existen múltiples motivos que justifican su uso, el primero es la representatividad del material, en vista de que en las laderas de la ciudad del Cusco están compuestas por taludes residuales, los cuales componen estratos de areno-limosos.

Por otra parte, desde el punto de vista experimental, las características del material son adecuadas para la elaboración de modelos físicos a escala. Estos modelos requieren materiales homogéneos y cuyas propiedades puedan ser controladas con precisión, condiciones que el material S3 cumple satisfactoriamente. Su uniformidad permite reproducir con mayor fidelidad los mecanismos de deformación y falla del talud.

4.2.4. Resultados del ensayo de Proctor Modificado.

Se realizó el ensayo de Proctor Modificado para la muestra S3, correspondiente a la arena limosa para obtener el contenido óptimo de humedad para compactación.

Tabla 40

Obtención de densidad seca máxima según Proctor Modificado

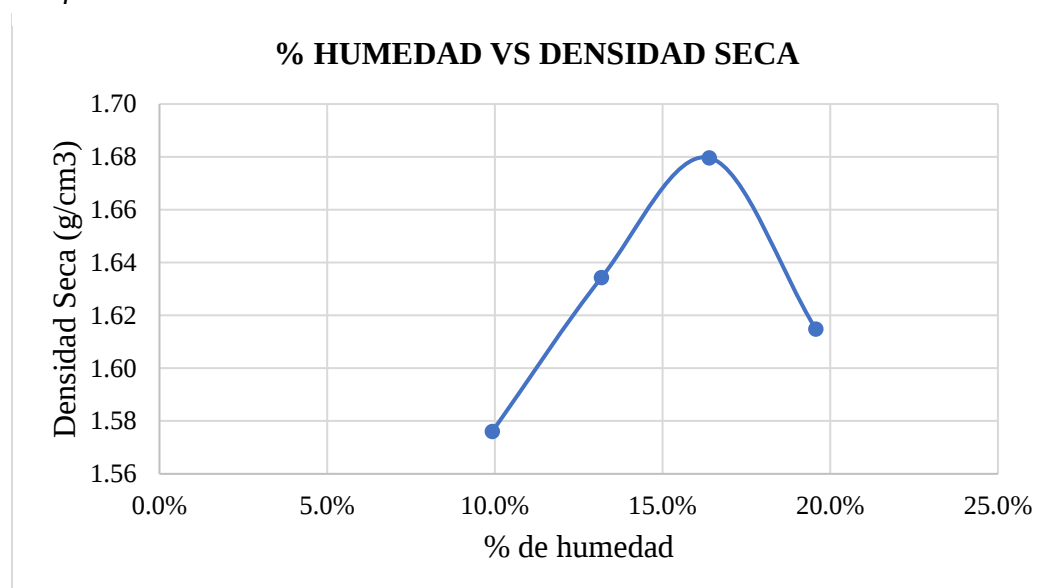
N° de Capas	5	5	5	5
N° de golpes por Capa	25	25	25	25
Masa del Molde +Suelo compactado (g)	5868.98	5980.68	6080.93	6057.88
Masa del Molde (g)	4218.56	4218.56	4218.56	4218.56
Masa suelo Compactado (g)	1650.42	1762.12	1862.37	1839.32
Volumen del Molde (cm3)	952.61	952.61	952.61	952.61
Densidad Húmeda (g/cm3)	1.73	1.85	1.96	1.93
Densidad Seca (g/cm3)	1.58	1.63	1.68	1.61

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 41*Obtención de % de humedad óptima para compactación*

Prueba N°	1		2		3		4	
Tara N°	A-3	M-9	G-5	M-2 P5iii	O1-A1	A-10	9-	A-2
Masa + Suelo Húmedo (g)	158.92	141.58	171.32	176.91	154.66	162.41	175.36	165.93
Masa + Suelo Seco (g)	149.79	133.66	158.1	163.19	141.01	146.82	156.09	148.16
Masa del Agua (g)	9.13	7.92	13.22	13.72	13.65	15.59	19.27	17.77
Masa de Tara (g)	56.32	55.13	57.86	59.05	57.73	51.78	57.79	57.18
Masa de Suelo Seco (cm3)	93.47	78.53	100.24	104.14	83.28	95.04	98.3	90.98
Contenido de humedad (%)	9.8%	10.1%	13.2%	13.2%	16.4%	16.4%	19.6%	19.5%
Promedio/Contenido de Humedad (%)	9.9%		13.2%		16.4%		19.6%	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 24*Gráfica de % de humedad VS Densidad seca*

Nota. Fuente: Elaboración propia

Contenido óptimo de humedad (%) = 16.4%

Densidad seca máxima (gr/cm³) = 1.68 g/cm³

4.2.5. Resultados del ensayo de densidad mínima y máxima para arenas.

No existe una norma americana específica para este ensayo, así que se tomó como referencia las normas europeas, NLT-204 y NLT-205, correspondiente a la determinación de densidad mínima y máxima en arenas.

Tabla 42

Cálculo de densidad mínima para material S3

Prueba N°	N°1	N°2	N°3
N° de Capas	5	5	5
N° de golpes por Capa	-	-	-
Masa del Molde +Suelo compactado (g)	5457.98	5453.88	5455.33
Masa del Molde (g)	4199.31	4199.31	4199.31
Masa suelo Compactado (g)	1258.67	1254.57	1256.02
Volumen del Molde (cm3)	924.23	924.23	924.23
Densidad Mínima (g/cm3)	1.36	1.36	1.36

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 43

Cálculo de densidad máxima para muestra S3

Prueba N°	N°1	N°2	N°3	N°4
N° de Capas	5	5	5	5
N° de golpes por Capa	50	50	50	50
Masa del Molde +Suelo compactado (g)	5766.46	5763.8	5765.26	5770.5
Masa del Molde (g)	4199.31	4199.31	4199.31	4199.31
Masa suelo Compactado (g)	1567.15	1564.49	1565.95	1571.19
Volumen del Molde (cm3)	924.23	924.23	924.23	924.23
Densidad Húmeda (g/cm3)	1.696	1.693	1.694	1.700
Promedio	1.70			

Nota. Fuente: Elaboración propia

Densidad mínima = 1.36 g/cm3

Densidad máxima = 1.70 g/cm3

Estos intervalos son importantes para definir el grado de compactación al cual se ensayará, para la presente investigación se decidió compactar la muestra a un estado denso, teniendo como densidad de referencia 1.65g/cm³, esta corresponde al 88% de densidad relativa.

$$Dr = \frac{\gamma_{dmax}}{\gamma_d} \left(\frac{\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}}{\gamma_{dmax} - \gamma_{dmin}} \right)$$

$$Dr = 88\%$$

4.2.6. Resultados de los ensayos triaxiales.

4.2.6.1. Resultados a humedad óptima.

La norma indica que la velocidad de prueba para producir deformación axial debe ser aproximadamente 0.3% por min para materiales frágiles, que alcanzan su máximo esfuerzo desviador entre el 3 y 6% de deformación. Considerando una falla al 6% y definiendo el tiempo de ensayo para 20 min, se tiene.

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \rightarrow 0.06 = \frac{\Delta l}{140mm} \rightarrow \Delta l = 8.4mm$$

$$\Delta l = V \times \text{Tiempo} \rightarrow 8.4mm = V \times 20min$$

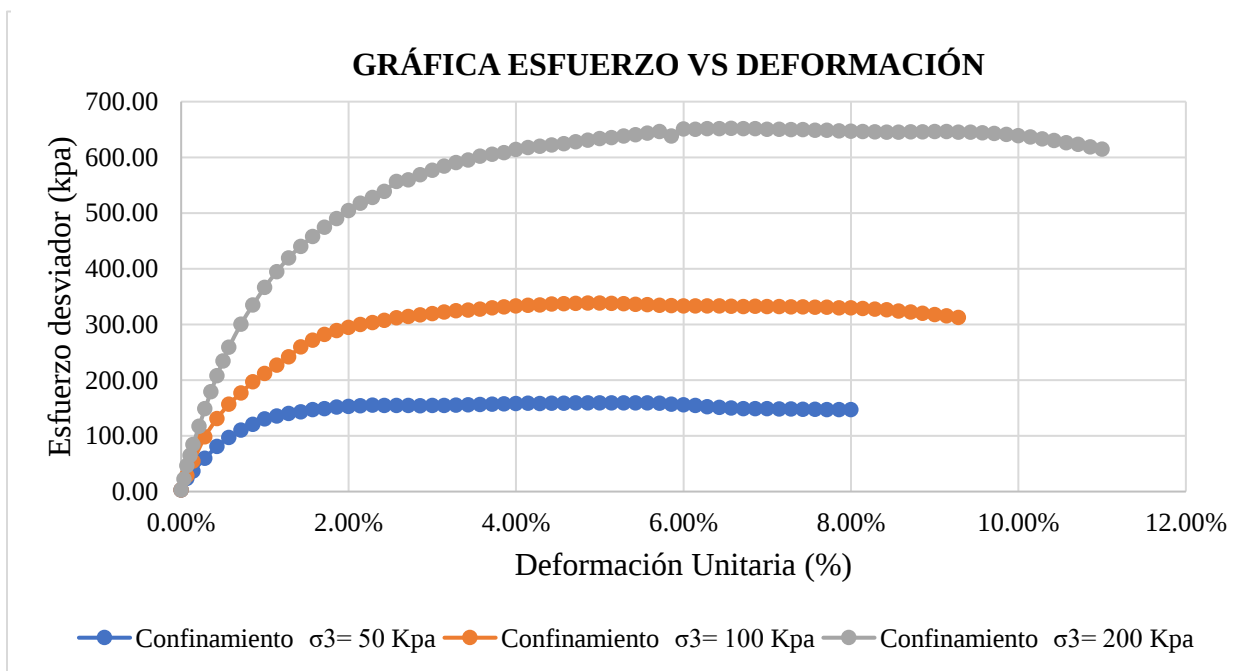
$$V = 0.42mm/min$$

Todas las tablas con el registro de datos para cada confinamiento se muestran en los anexos.

Gráfica esfuerzo deformación.

Gráfica 25

Gráfica esfuerzo deformación para 50kPa, 100kPa y 200kPa, ensayo húmedo.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Como era de esperar, a mayor confinamiento el espécimen adquiere mayor resistencia y ligeramente mayor deformación unitaria en relación al esfuerzo máximo. Con el objetivo de obtener una calibración representativa, se tomó como referencia la falla al 6% de deformación unitaria, este valor es completamente característico para los 3 confinamientos porque engloba el máximo esfuerzo desviador alcanzado en cada caso.

Parámetros mecánicos.

Tabla 44

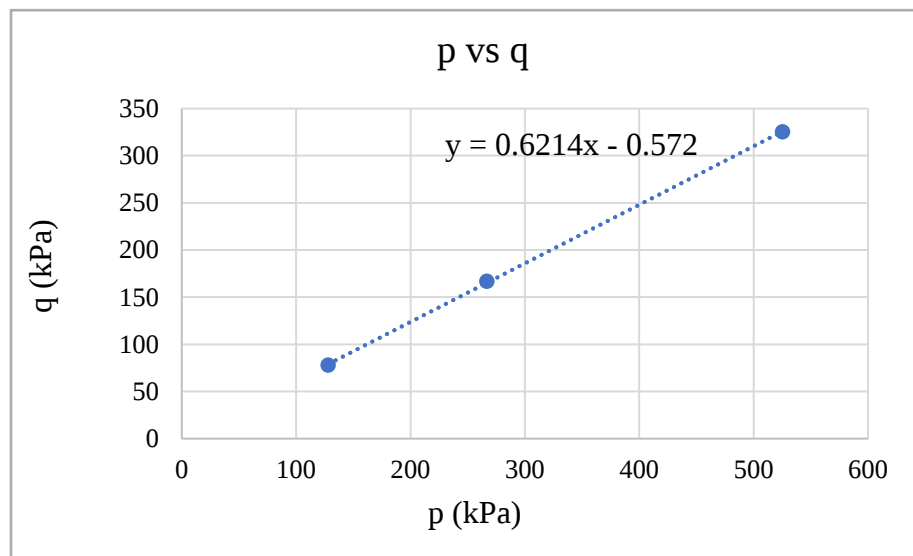
Esfuerzos p y q que producen la falla

p vs q			
Nº	p (kPa)	q (kPa)	Envolvente
1	127.92	77.92	6.00%
2	266.68	166.68	6.00%
3	525.35	325.35	6.00%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 26

Relación entre esfuerzos principales p vs q , según criterio de Mohr-Coulomb.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Utilizando las ecuaciones siguientes, se tiene:

$$q = a + p \times \tan(\alpha) \rightarrow \phi = \arcsen(\tan(\alpha)) \rightarrow \phi = \arcsen(0.6214) \rightarrow \phi = 0.67 \text{ rad}$$

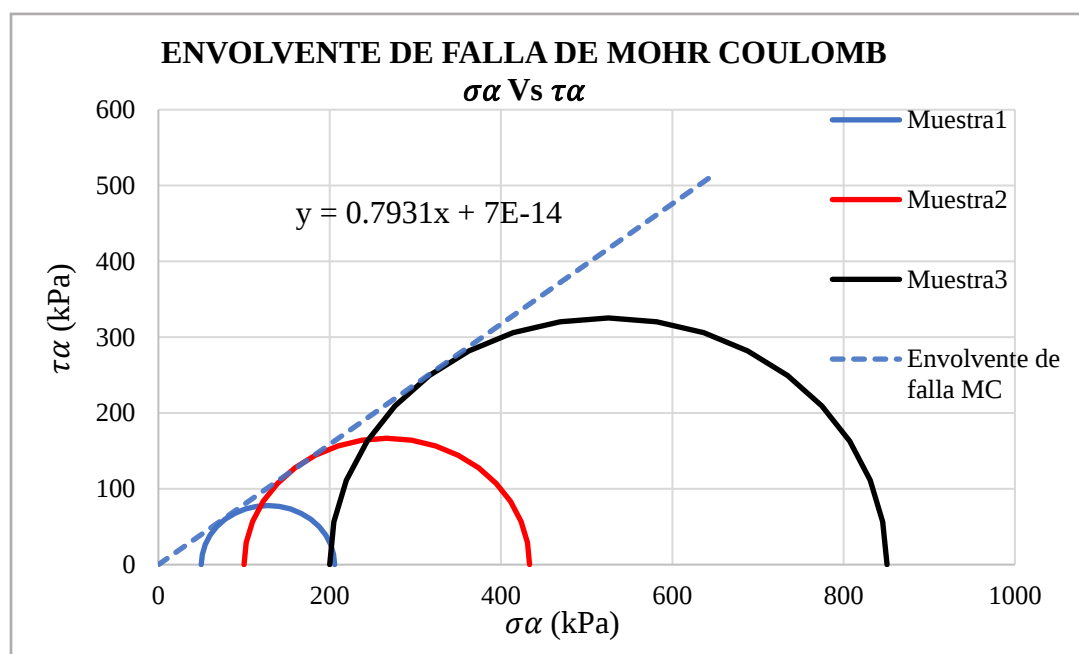
$$\phi = 38.42^\circ$$

$$c = \frac{a}{\cos(\phi)} \rightarrow c = \frac{-0.572}{\cos(0.67)} \rightarrow c = 0 \text{ kpa}$$

$$c = 0 \text{ kpa}$$

Gráfica 27

Envolvente de falla de Mohr-Coulomb



Nota. Fuente: Elaboración propia

Calibración de Mohr-Coulomb.

Tabla 45

Obtención del E50 prom.

σ_3 (kPa)	σ_{max} (kPa)	$\sigma_{max}/2$ (kPa)	Def para $\sigma_{max}/2$	E50 (kPa)	E50*conf (kPa)
50	156	78	0.42%	18552	927591
100	333	167	0.62%	26884	2688433
200	651	325	0.81%	40043	8008554
E prom ponderado (kPa)					33213
E (kPa)					3.3E+04

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 46

Esfuerzo de falla y deformación de fluencia para calibración.

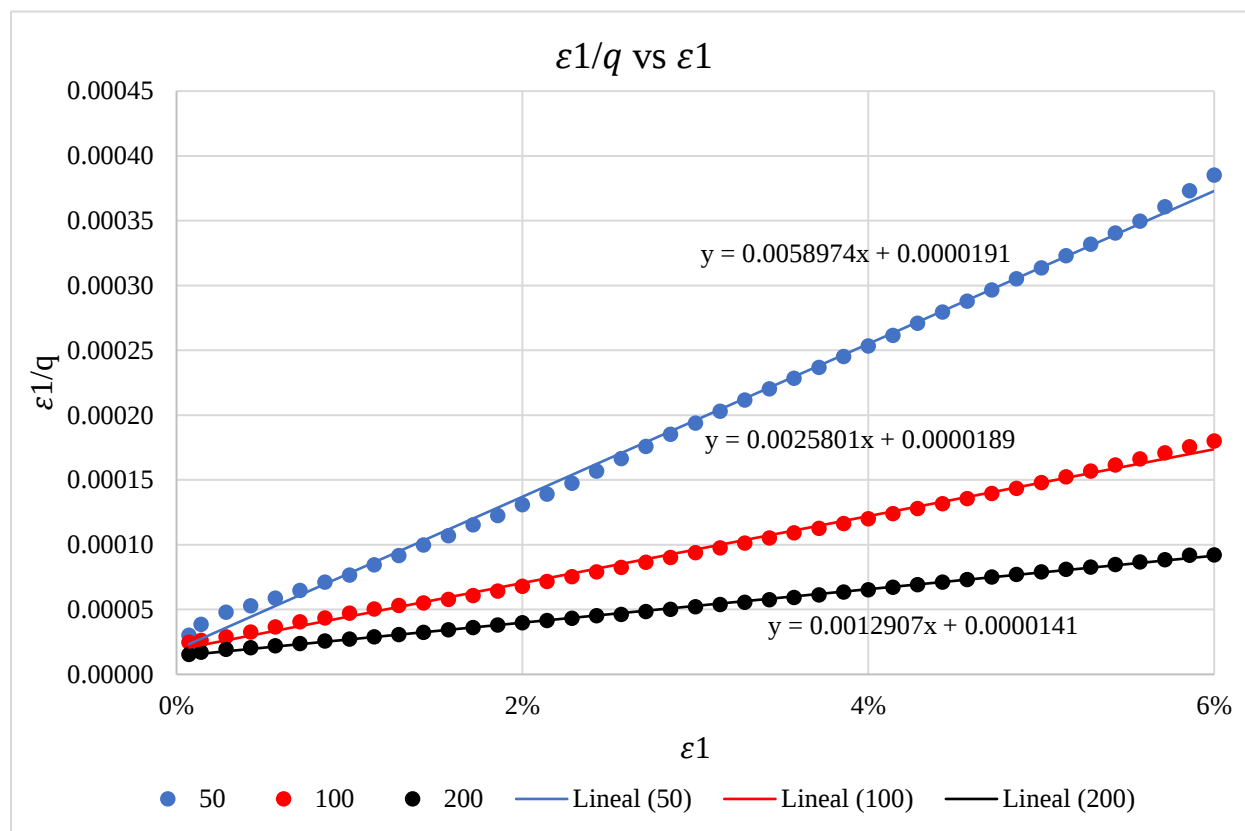
σ_3 (kPa)	Esfuerzo de falla (kPa)	Def de fluencia	
50	164	0.49%	FLUENCIA
100	328	0.99%	
200	657	1.98%	

Nota. Fuente: Elaboración propia

El objetivo es la calibración por el modelo de Hardening Soil. Este modelo es una variante mejorada del modelo hiperbólico, se presenta los resultados del proceso.

Gráfica 28

Obtención de parámetros a y b , para la curva hiperbólica



Nota. Fuente: Elaboración propia

Hallamos a y b.

Tabla 47

Determinación de valores a y b para los 3 confinamientos

σ_3 ((kPa)	b	a
50	0.0058974	0.0000191
100	0.0025801	0.0000189
200	0.0012907	0.0000141

Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtención del Rf y b Corregido.

Tabla 48

Obtención del Rf y b corregido para los 3 confinamientos

σ_3 (kPa)	qf (kPa)	qa (kPa)	Rf	Rf prom.	b corregido
50	164	170	0.97		0.005407
100	328	388	0.85	0.8875	0.002703
200	657	775	0.85		0.001352

Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtención de m

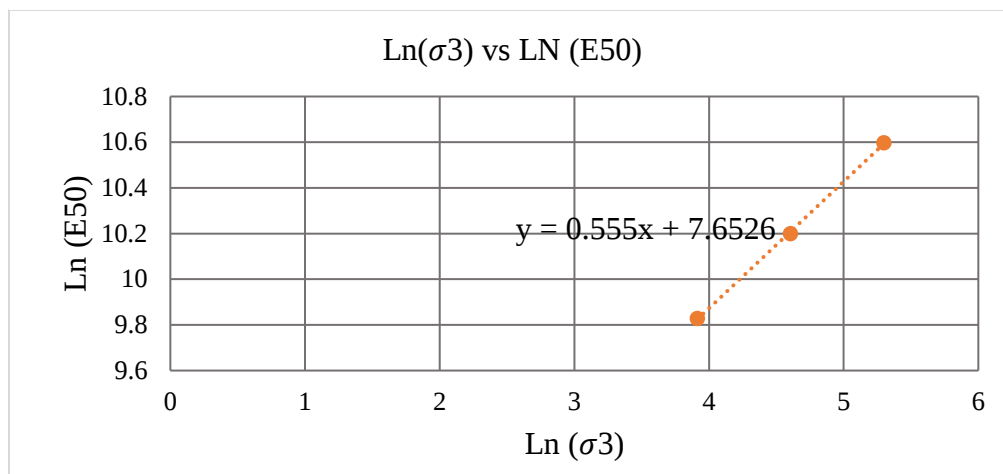
Tabla 49

Obtención del m

σ_3 (kPa)	E50 (kPa)	LN (σ_3)	LN (E50)
50.00	18551.83	3.91	9.83
100.00	26884.33	4.61	10.20
200.00	40042.77	5.30	10.60

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 29
Regresión lineal



Nota. Fuente: Elaboración propia

Regresión lineal LN.

$$a = 2106.15$$

$$m = 0.550$$

Tabla 50
Parámetros de salida para modelo de Hardening Soil

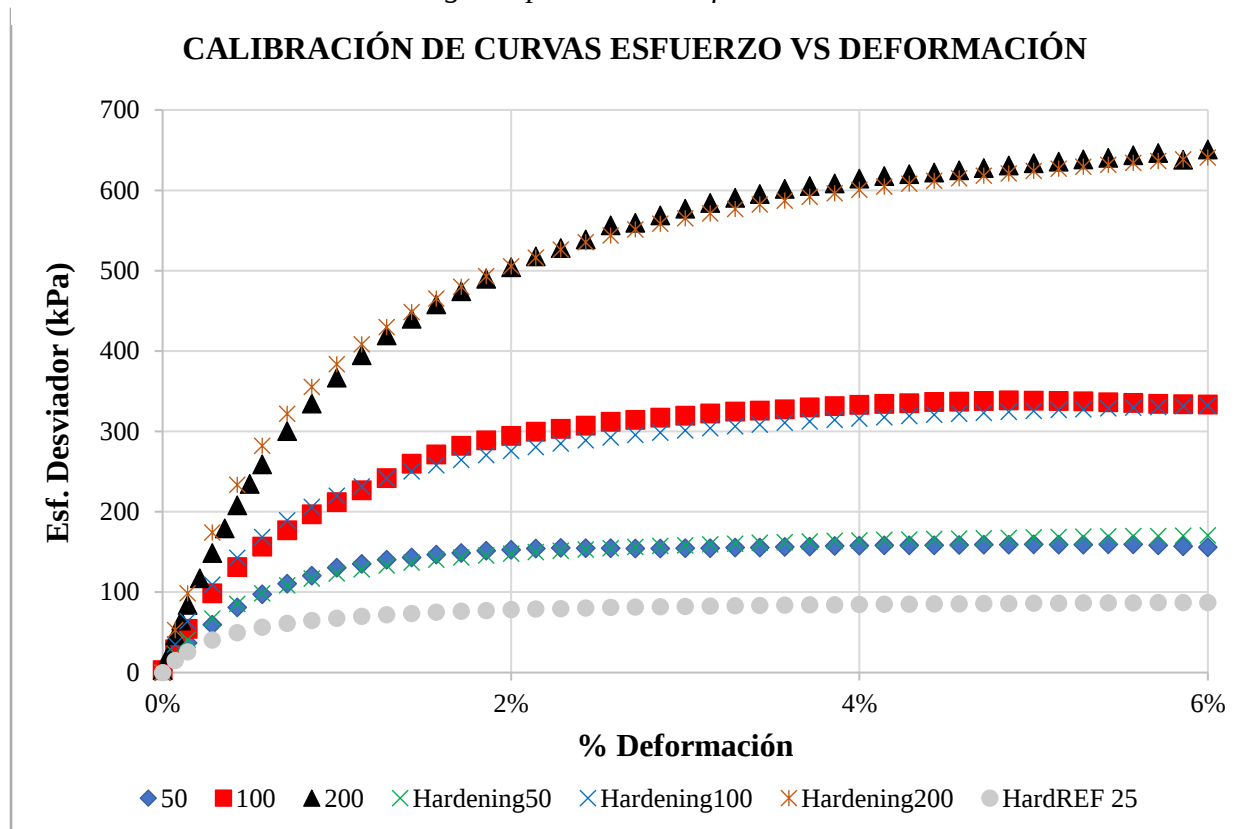
PARAMETROS DE SALIDA			
Esfuerzos σ_3 (kPa)	50	100	200
E50 (kPa)	18467	27131	39860
qf (kPa)	164	328	657
qa (kPa)	185	370	740

Nota. Fuente: Elaboración propia

A partir de esto podemos establecer los parámetros del modelo de Hardening Soil para diferentes confinamientos.

Gráfica 30

Calibración del modelo *Hardening Soil* para cada confinamiento.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Para los modelos en Plaxis se usará la presión de referencia de 100kPa, para lo cual se tienen los siguientes parámetros.

Tabla 51

Parámetros del modelo *Hardening Soil* para una presión de referencia (P_{ref})

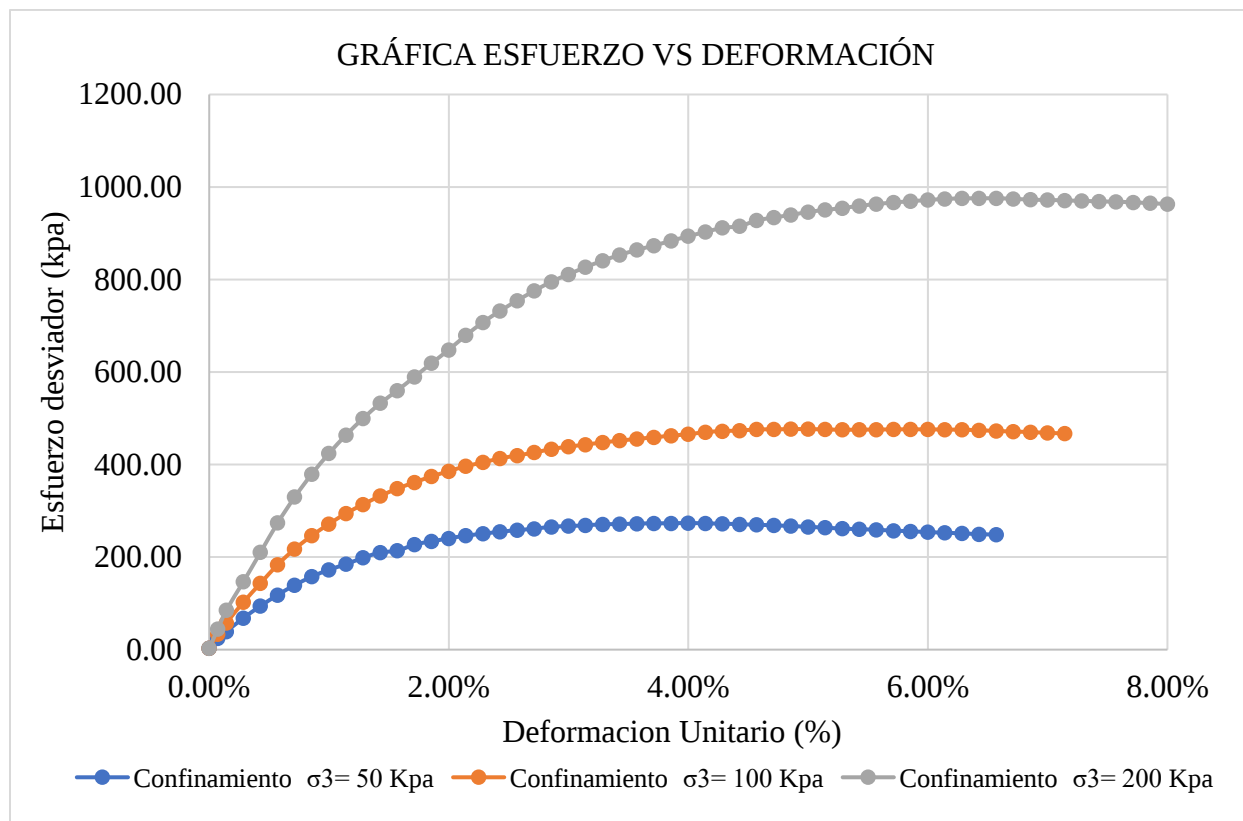
A partir de una presión de referencia	
P_{ref} (kPa)	100.00
$E_{50 ref}$ (kPa)	27131
$E_{eod ref}$ (kPa)	27131
$E_{ur ref}$ (kPa)	81394
q_f (kPa)	328
q_a (kPa)	370

Nota. Fuente: Elaboración propia

4.2.6.2. Resultados en seco.

Gráfica 31

Gráfica esfuerzo deformación para 50kPa, 100kPa y 200kPa, ensayo seco



Nota. Fuente: Elaboración propia

Se tomó referencia la calibración del material al 6%, esta es representativa para los diferentes confinamientos.

Parámetros mecánicos.

Tabla 52

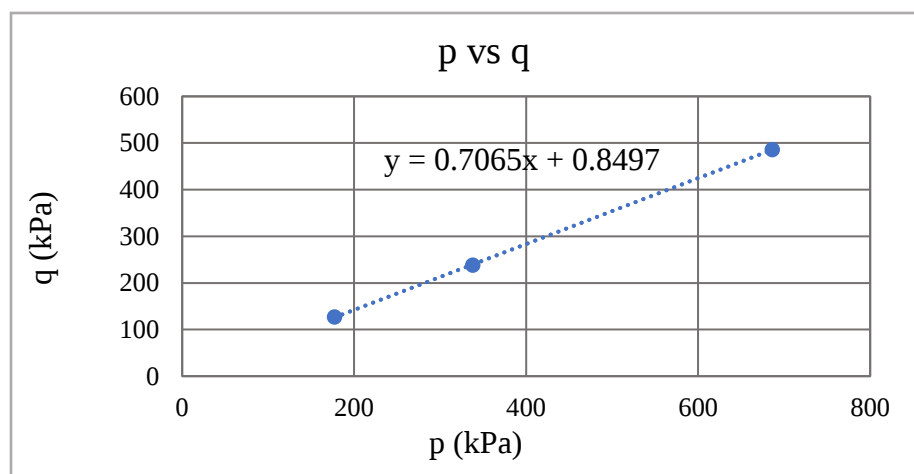
Esfuerzos p y q que producen la falla

p vs q			
N°	p(kPa)	q(kPa)	Envolvente
1	177.02	127.02	6.00%
2	338.03	238.03	6.00%
3	686.00	486.00	6.00%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 32

Relación entre esfuerzos principales p vs q , según criterio de Mohr-Coulomb



Nota. Fuente: Elaboración propia

Utilizando las ecuaciones siguientes, se tiene:

$$q = a + p * \tan(\alpha) \rightarrow \phi = \arcsen(\tan(\alpha))$$

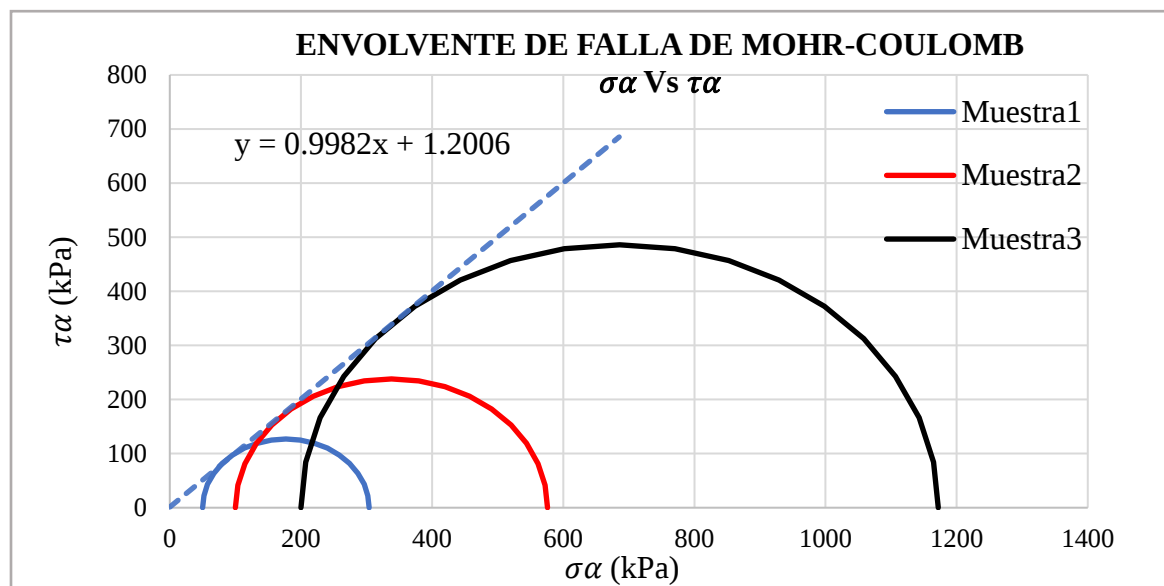
$$\phi = \arcsen(0.706) \rightarrow \phi = 0.78 \text{ rad}$$

$$\phi = 44.95^\circ$$

$$c = \frac{a}{\cos(\phi)} \rightarrow c = \frac{-0.8497}{\cos(0.706)} \rightarrow c = 1.2 \text{ kpa}$$

$$c = 1.2 \text{ kpa}$$

Valores sustentados y estudiados por Ravindran & Gratchev (2022) y Wils et al. (2015)

Gráfica 33*Envolvente de falla de Mohr-Coulomb*

Nota. Fuente: Elaboración propia

Calibración de Mohr-Coulomb.**Tabla 53***Obtención del E50 prom*

σ_3 (kPa)	σ_{max} (kPa)	$\sigma_{max}/2$ (kPa)	Def para $\sigma_{max}/2$	E50 (kPa)	E50*conf (kPa)
50	254	127	0.58%	21899	1094971
100	476	238	0.79%	30043	3004336
200	972	486	1.40%	34838	6967677
E prom pond					31620
E (kPa)					3.2E+04

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 54*Esfuerzo de falla y deformación de fluencia para calibración.*

σ_3	Esfuerzo de falla	Def de fluencia
50	246	0.78%
100	487	1.54%
200	968	3.06%

FLUENCIA

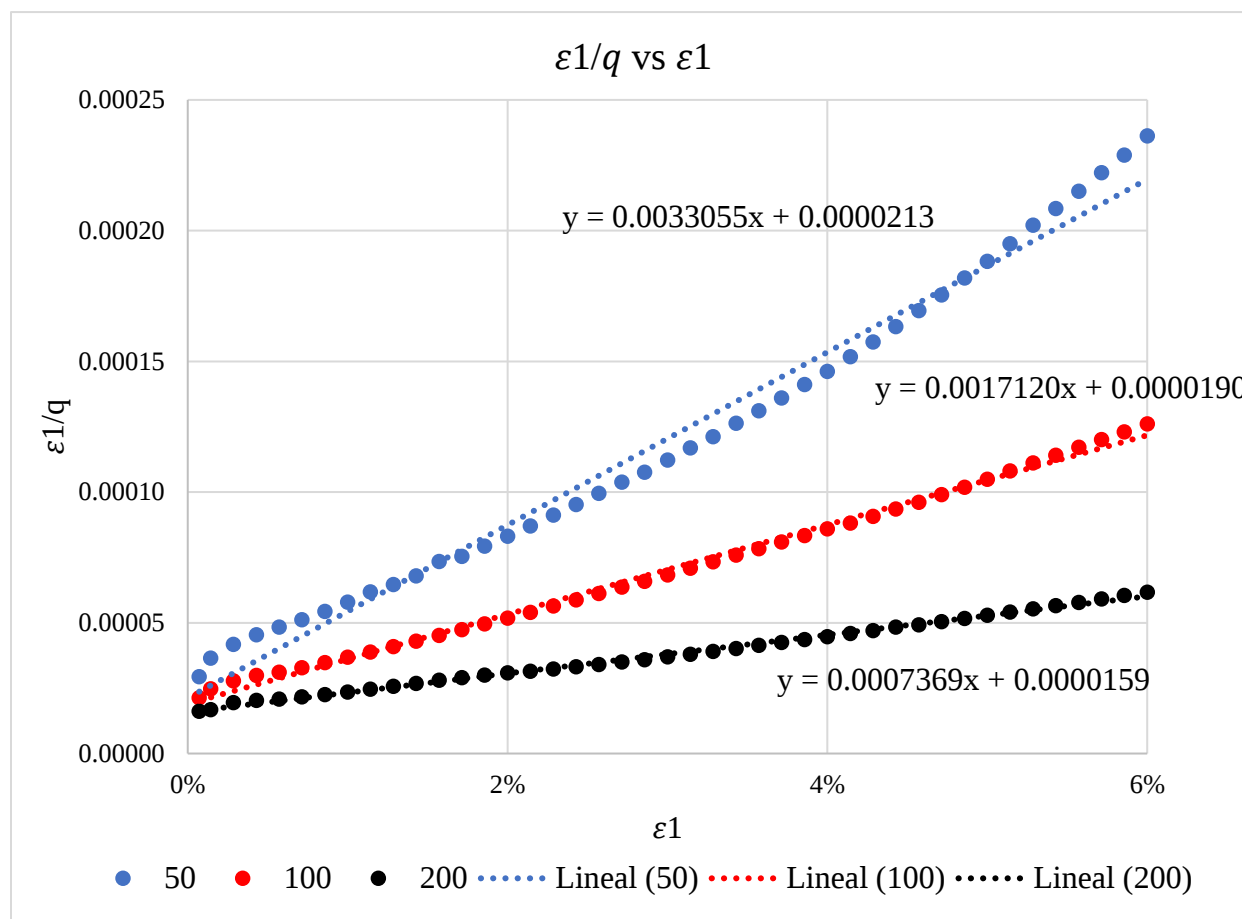
Nota. Fuente: Elaboración propia

El objetivo es la calibración por el modelo de Hardening Soil, este modelo es una variante mejorada del modelo hiperbólico, se presenta los resultados del proceso.

Hallamos a y b.

Gráfica 34

Obtención de parámetros a y b, para la curva hiperbólica



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 55

Determinación de valores a y b para los 3 confinamientos

σ_3	b	a
50	0.0033055	0.0000213
100	0.0017120	0.0000190
200	0.0007369	0.0000159

Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtención del R_f y b Corregido.

Tabla 56

Obtención del R_f y b corregido para los 3 confinamientos

σ_3 (kPa)	q_f (kPa)	q_a (kPa)	R_f	R_f prom.	b corregido
50	246	303	0.81		0.003195
100	487	584	0.83	0.7874	0.001616
200	968	1357	0.71		0.000813

Nota. Fuente: Elaboración propia

Obtención de m

Tabla 57

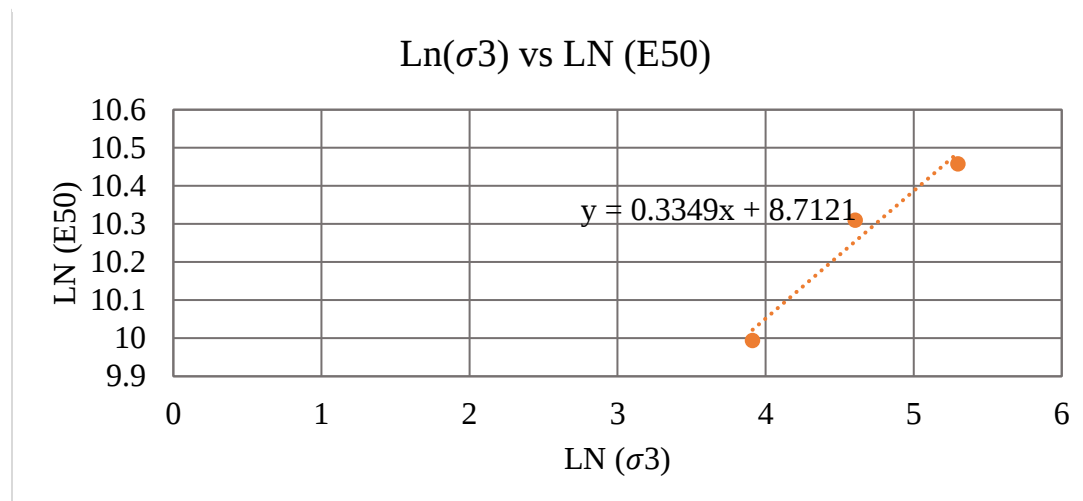
Obtención del m

σ_3 (kPa)	E50	LN (σ_3)	LN (E50)
50.00	21899.42	3.91	9.99
100.00	30043.36	4.61	10.31
200.00	34838.39	5.30	10.46

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 36

Obtención de parámetros a y b , para la curva hiperbólica



Nota. Fuente: Elaboración propia

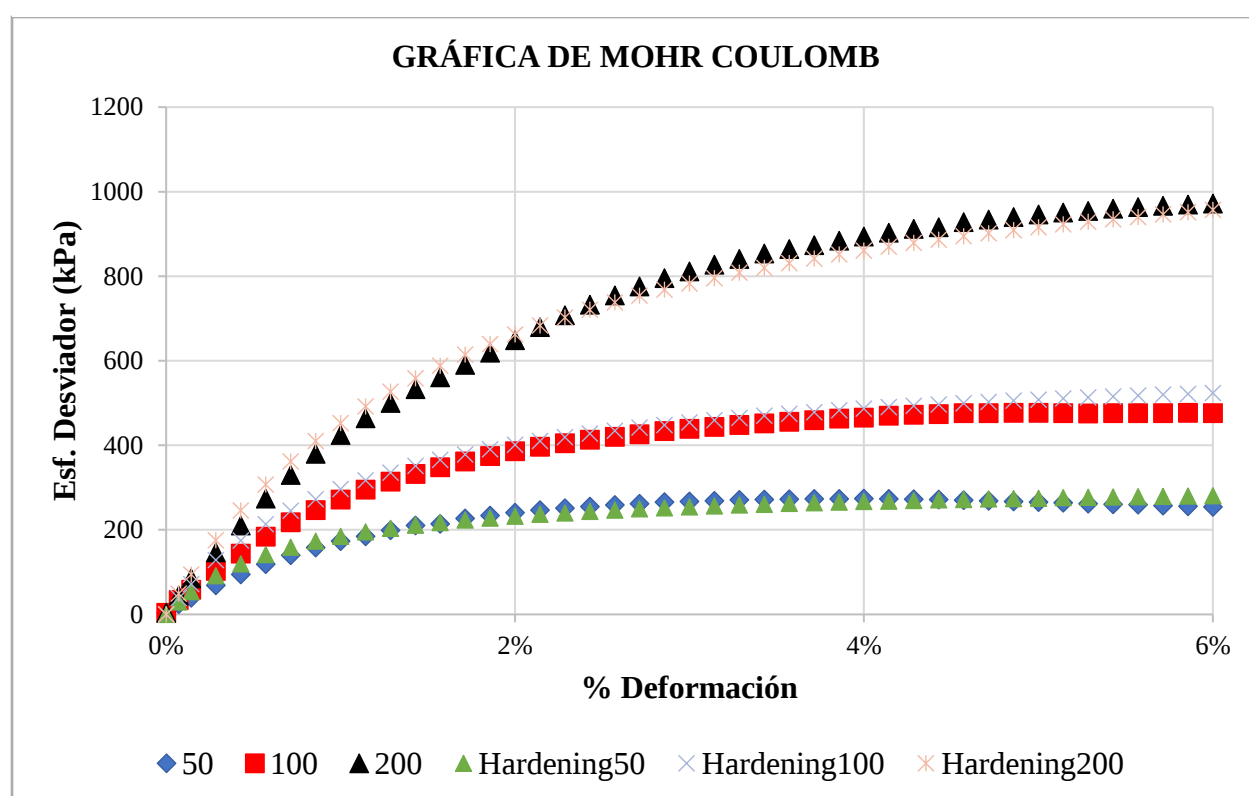
$$a = 6076.14$$

$$m = 0.33$$

Tabla 58*Parámetros de salida para modelo de Hardening Soil*

PARÁMETROS DE SALIDA			
Esfuerzos s3	50	100	200
E50	22522	28406	35828
qf	246	487	968
qa	313	619	1230

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 37*Calibración del modelo Hardening Soil para cada confinamiento, condición SECA.*

Nota. Fuente: Elaboración propia

A partir de esto podemos establecer los parámetros del modelo de Hardening Soil para diferentes confinamientos. Para los modelos en PLAXIS se usará la presión de referencia de 100kPa, para lo cual se tienen los siguientes parámetros.

Tabla 59

Parámetros del modelo Hardening Soil para una presión de referencia (p_{ref})

pref	100.00
E50 ref	28406.20
Eeod ref	28406.20
Eur ref	85218.59
qf	487
qa	619

Nota. Fuente: Elaboración propia

Realizada la calibración, se verificó cómo el Plaxis reconoce los valores de entrada, el software tiene su propia simulación de ensayos triaxiales (PLAXIS Soil Test), mediante esto se verifica si el software está reconociendo adecuadamente los las curvas esfuerzo deformación a cada confinamiento ensayado, para ello no se modificó los valores por defecto:

A humedad óptima.

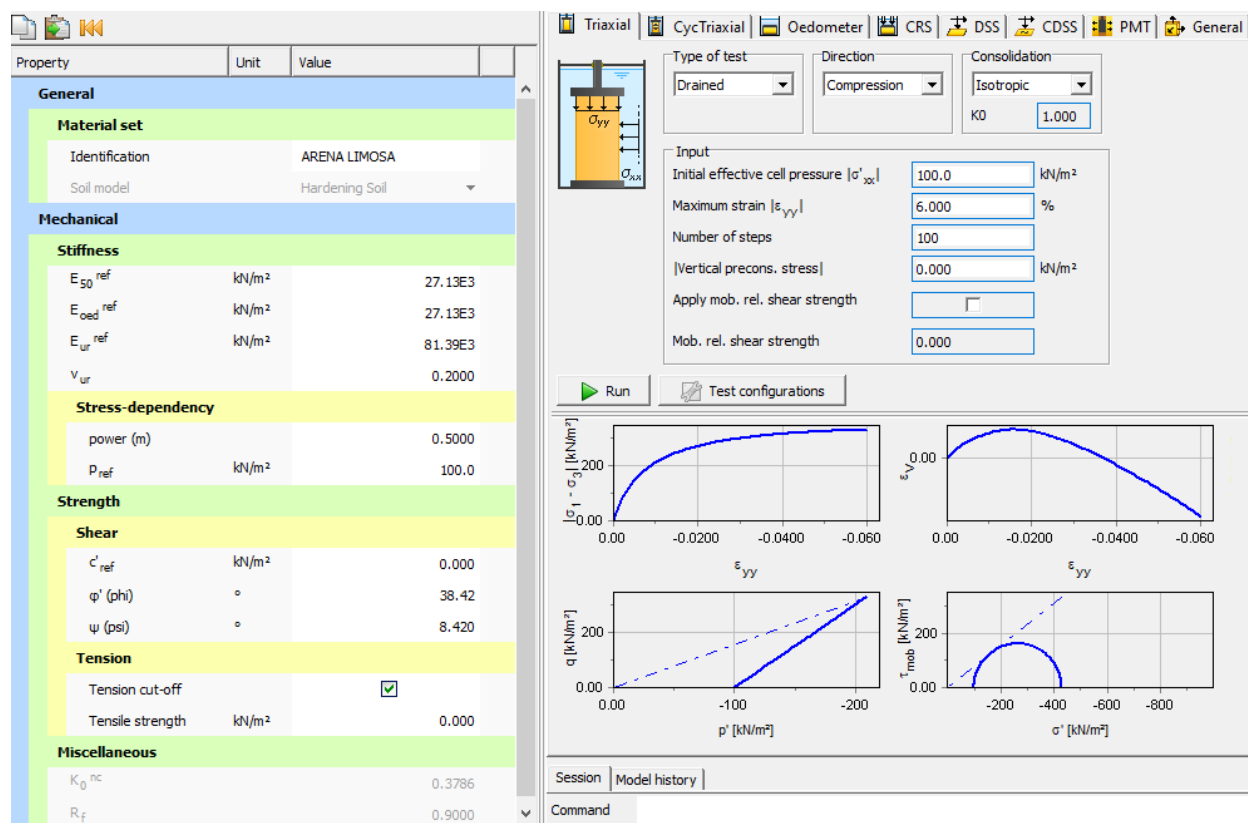
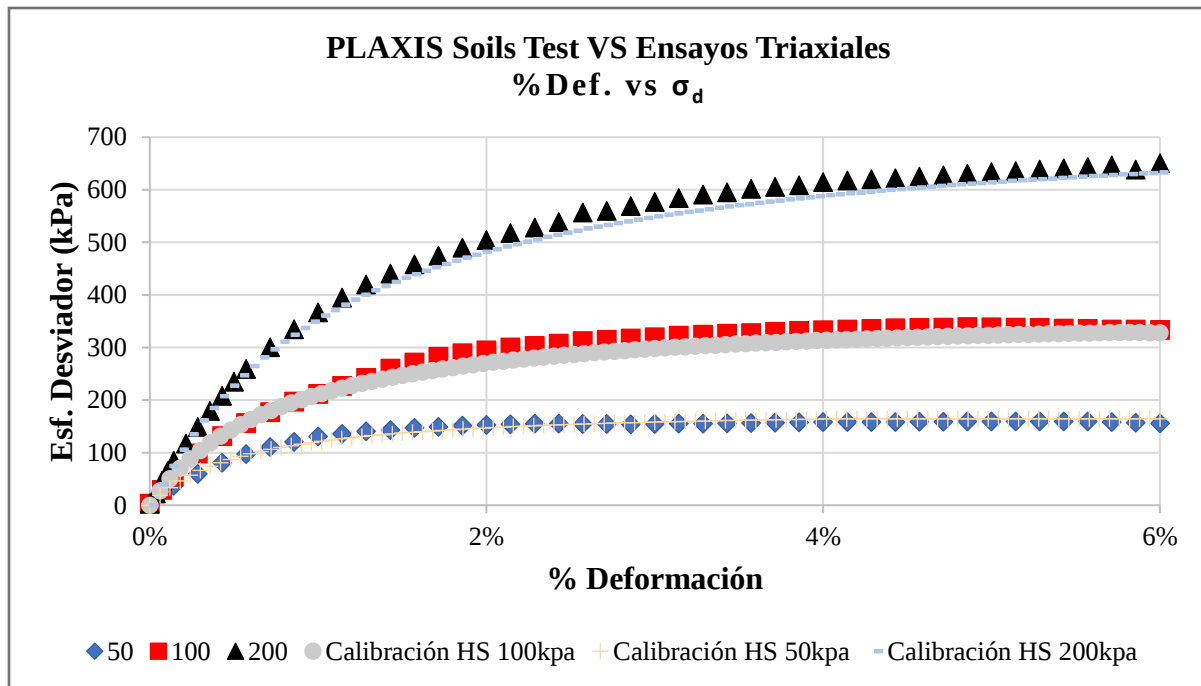


Figura 61. Soil test, con propiedades obtenidas en la calibración a humedad óptima

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 38

Curvas esfuerzo deformación del PLAXIS Soil test VS Curvas de ensayos triaxiales



Nota. Fuente: Elaboración propia.

El resultado de la calibración es exitoso. Se notan curvas casi superpuestas para los diferentes confinamientos, 50kPa, 100kPa y 200kPa, esto garantiza que el software reconoce perfectamente el comportamiento mecánico del suelo en análisis.

Se recalca que la calibración representa la condición parcialmente saturada (humedad óptima) del suelo. Para simular la respuesta de tensiones totales obtenida en el laboratorio, se realizó una calibración en PLAXIS, donde se ajustaron los parámetros efectivos del modelo Hardening Soil. En donde las curvas esfuerzo-deformación resultante en la simulación (SoilTest) replicó con precisión los resultados experimentales. De esta forma, el modelo numérico captura fielmente el comportamiento mecánico específico de la arena limosa en dicho estado.

Ensayo en seco.

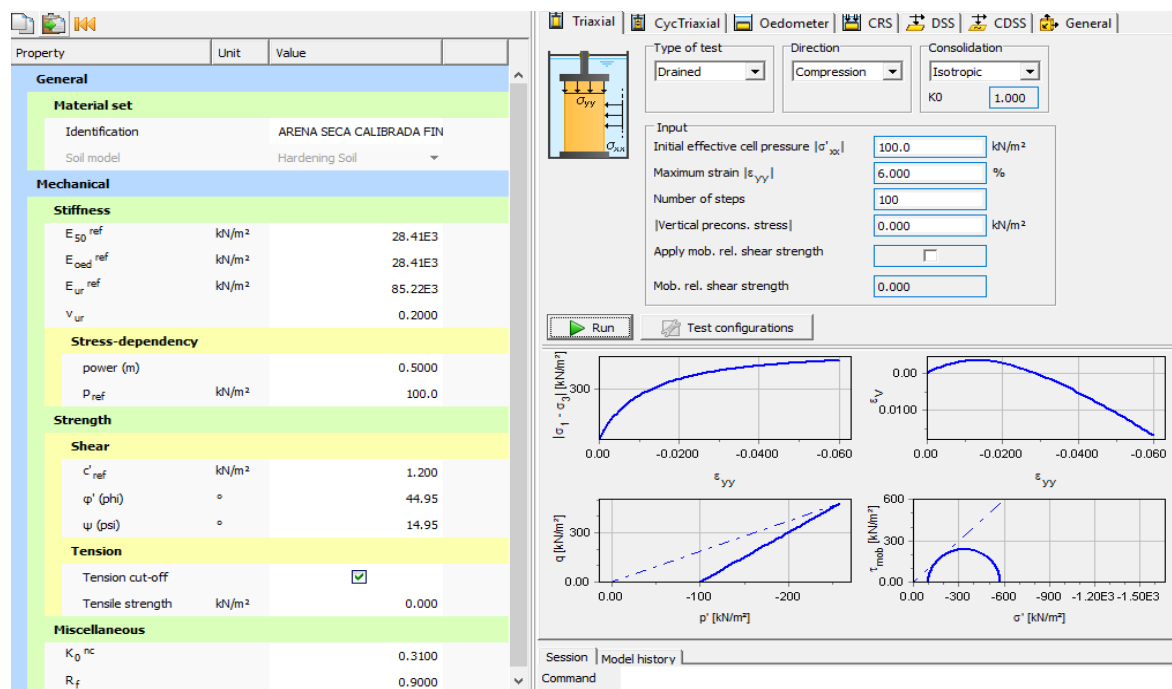
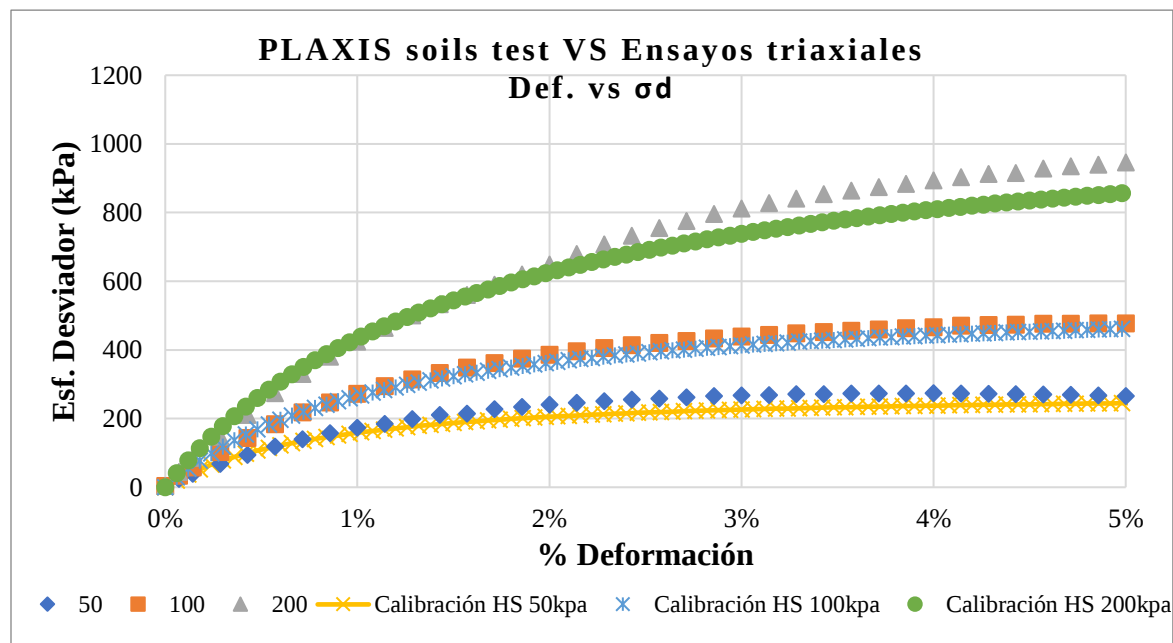


Figura 62. Soil test, con propiedades obtenidas en la calibración en estado SECO.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 39

Curvas esfuerzo deformación del PLAXIS Soil test VS Curvas de ensayos triaxiales



Nota. Fuente: Elaboración propia

Es evidente que no se logró una calibración óptima, si bien los para confinamientos de 50 y 100kPa se tiene cierta proximidad en comportamiento, para la calibración de 200kPa está muy por debajo, recalcar que no se modificaron los valores por defecto en el modelo constitutivo de Hardening Soil como el “ R_f ” o el “ m ”, dado el caso y siendo necesaria una calibración precisa para realizar la comparación entre modelo a escala y modelo físico, se utilizó la herramienta de calibración del Plaxis (Parameter optimization).

Optimización de parámetros.

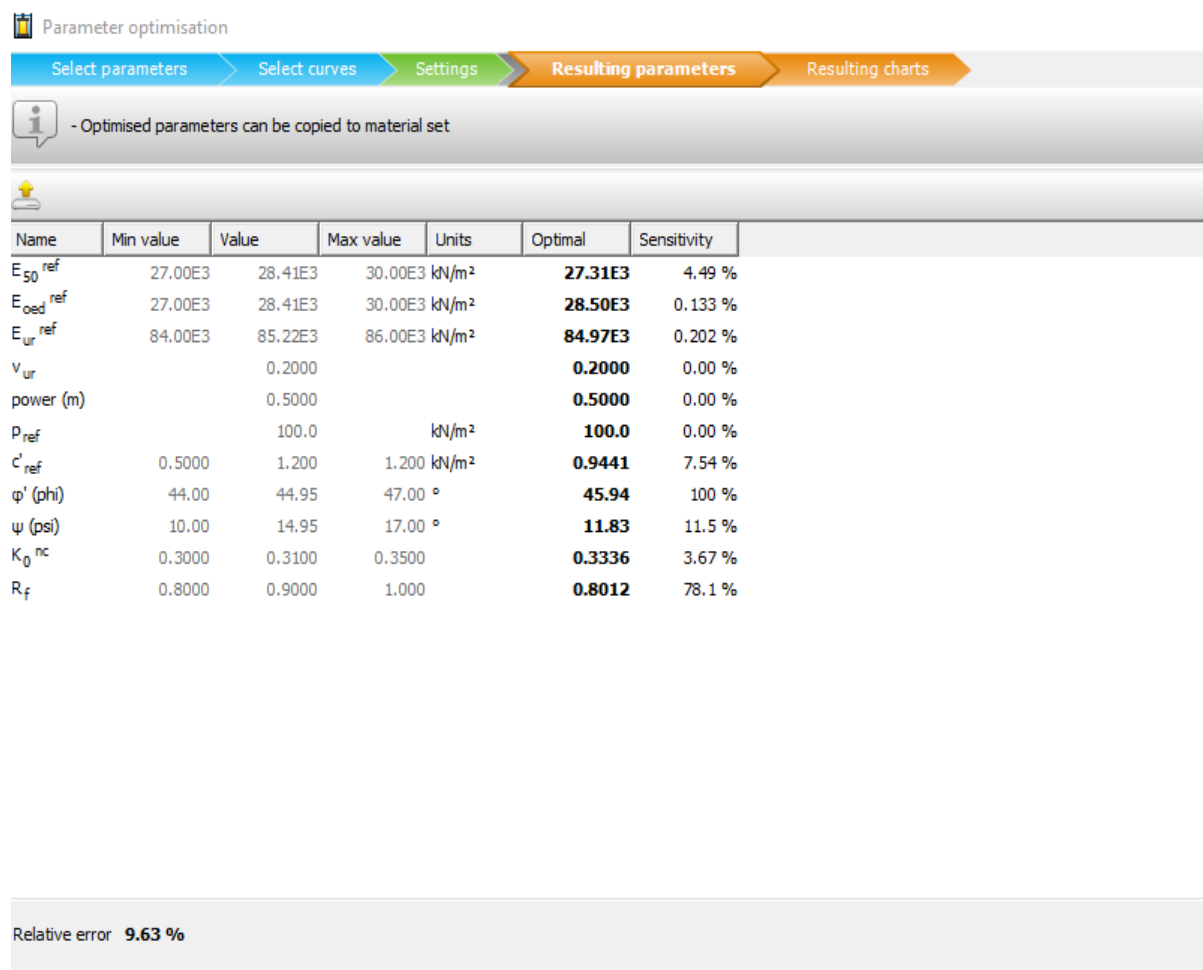
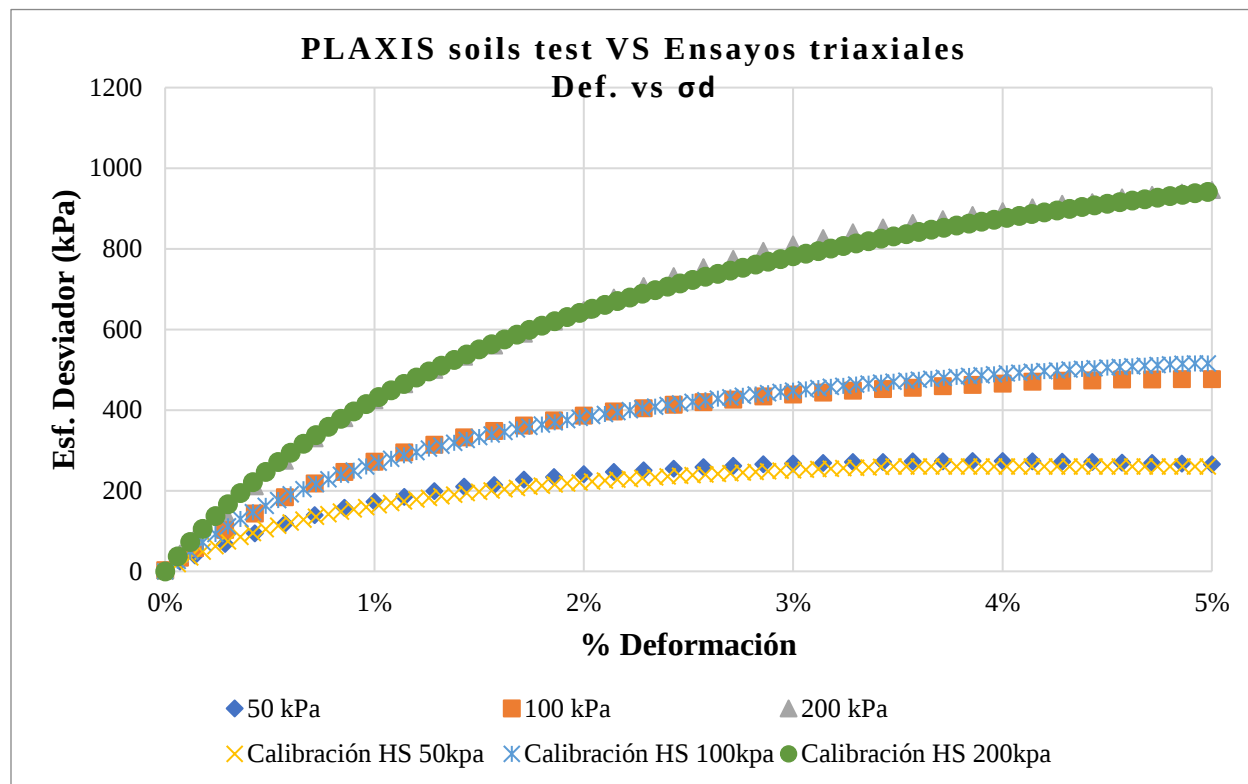


Figura 63. Optimización de parámetros con herramienta de PLAXIS.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 40

Curvas esfuerzo deformación del PLAXIS Soil test (optimizado) VS Curvas de ensayos triaxiales



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Los parámetros calibrados reflejan una mejora significativa. Se notan curvas superpuestas, esto garantiza que el software reconozca fielmente las condiciones del suelo en estudio.

4.3. Resultados del modelo Prototipo (Fase III)

La presente investigación tiene como objetivo analizar el efecto que tiene la separación entre muros escalonados de concreto armado sobre el comportamiento mecánico del talud. Se han evaluado específicamente variables críticas como:

- Factor de seguridad bajo diferentes separaciones.
- Carga última soportada por el sistema al aplicar carga en la corona del talud.
- Los desplazamientos generados por cargas aplicadas en la corona del talud.

Este estudio es particularmente relevante porque permite comprender cómo la variación en la separación influye en la interacción entre los muros y el talud, siendo fundamental para el diseño seguro y eficiente de estos sistemas.

4.3.1. Análisis de Esfuerzos

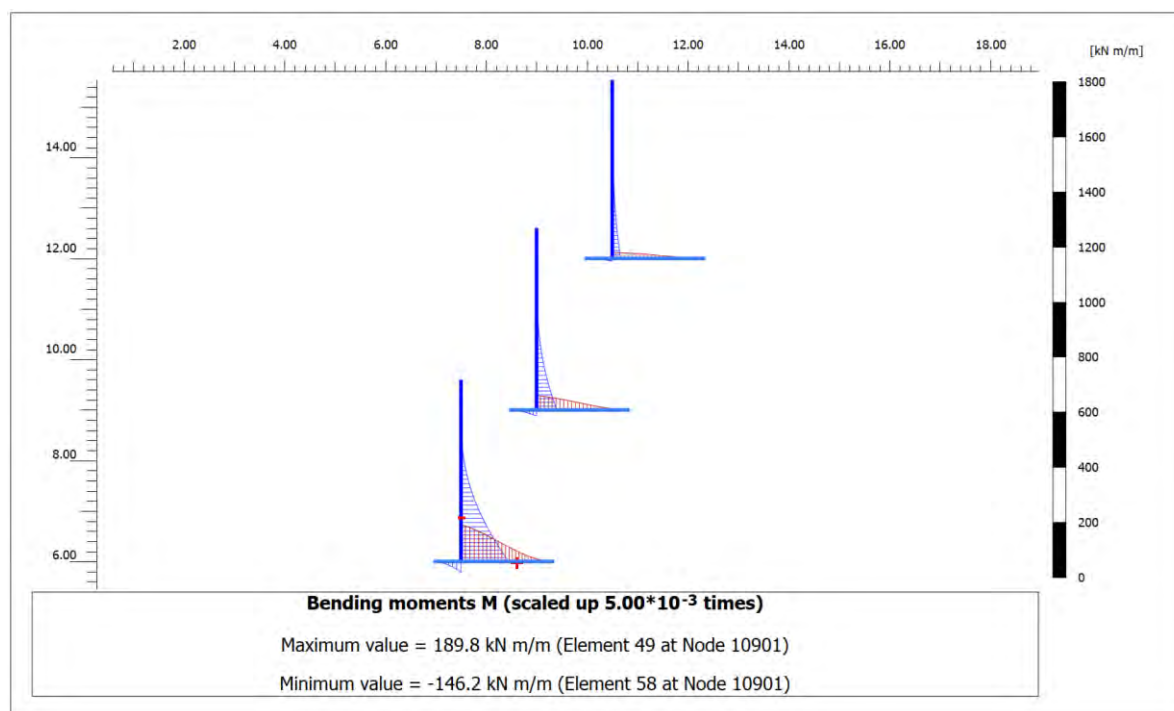
La interacción entre muros es considerable para separaciones menores, evidenciándose mayores esfuerzos en el primer muro debido a la proximidad del segundo. El segundo muro experimenta esfuerzos influenciados directamente por la cercanía al primero, mientras que el tercero muestra esfuerzos derivados únicamente del empuje del terreno.

A partir del análisis se concluye que la separación ideal para minimizar la interacción entre muros es 6.0 m.

Tabla 60*Momentos en pantalla y zapata para diferentes separaciones entre muros.*

SEPARACIÓN	N° ESCALÓN	MOMENTOS (kN.m/m)		
		PANTALLA	ZAPATA	
1.5	Muro 1	189.80	43.55	-146.20
	Muro 2	80.80	24.07	-56.73
	Muro 3	33.36	10.57	-22.79
3.0	Muro 1	86.91	25.06	-61.85
	Muro 2	48.90	16.54	-32.36
	Muro 3	33.67	13.39	-20.28
4.5	Muro 1	55.20	18.16	-37.04
	Muro 2	42.02	14.44	-27.62
	Muro 3	38.34	14.80	-23.54
6.0	Muro 1	46.17	15.72	-31.00
	Muro 2	40.60	14.07	-26.53
	Muro 3	40.55	15.17	-25.38
7.0	Muro 1	44.14	15.44	-28.70
	Muro 2	40.56	14.26	-26.30
	Muro 3	40.14	14.00	-25.87

Nota. Fuente: Elaboración propia

*Figura 64. Momentos sobre los muros, separación de 1.50m*

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D.

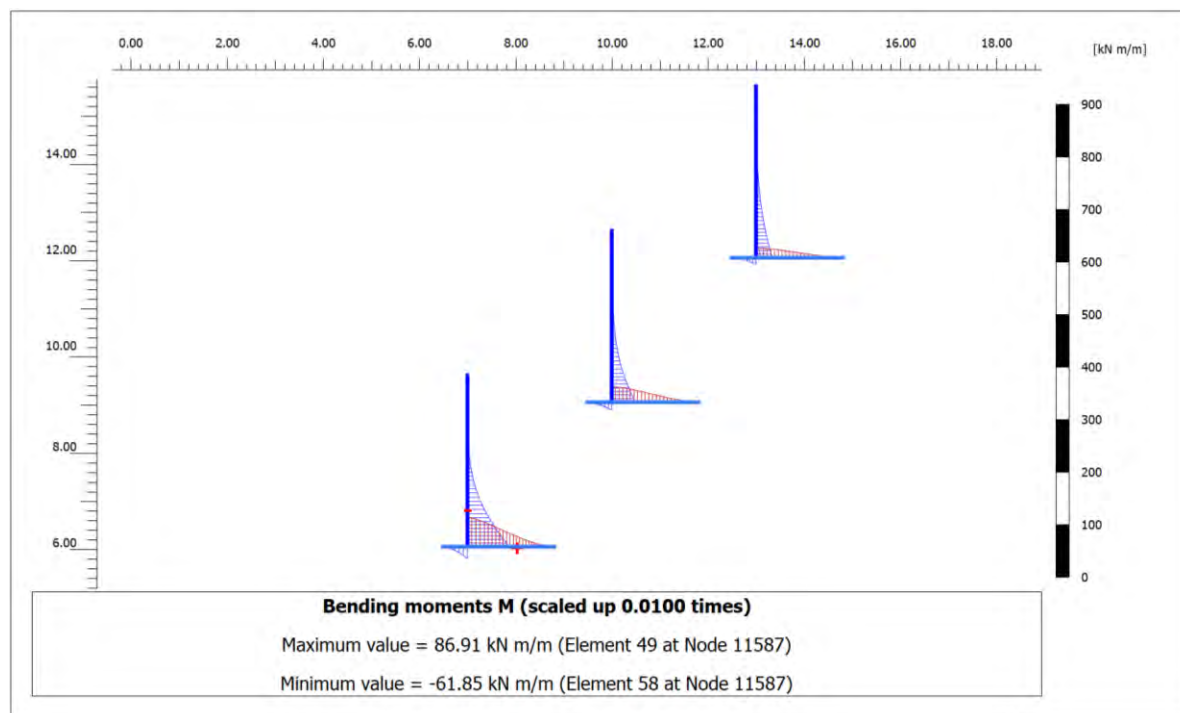


Figura 65. Momentos sobre los muros, separación de 3.0m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

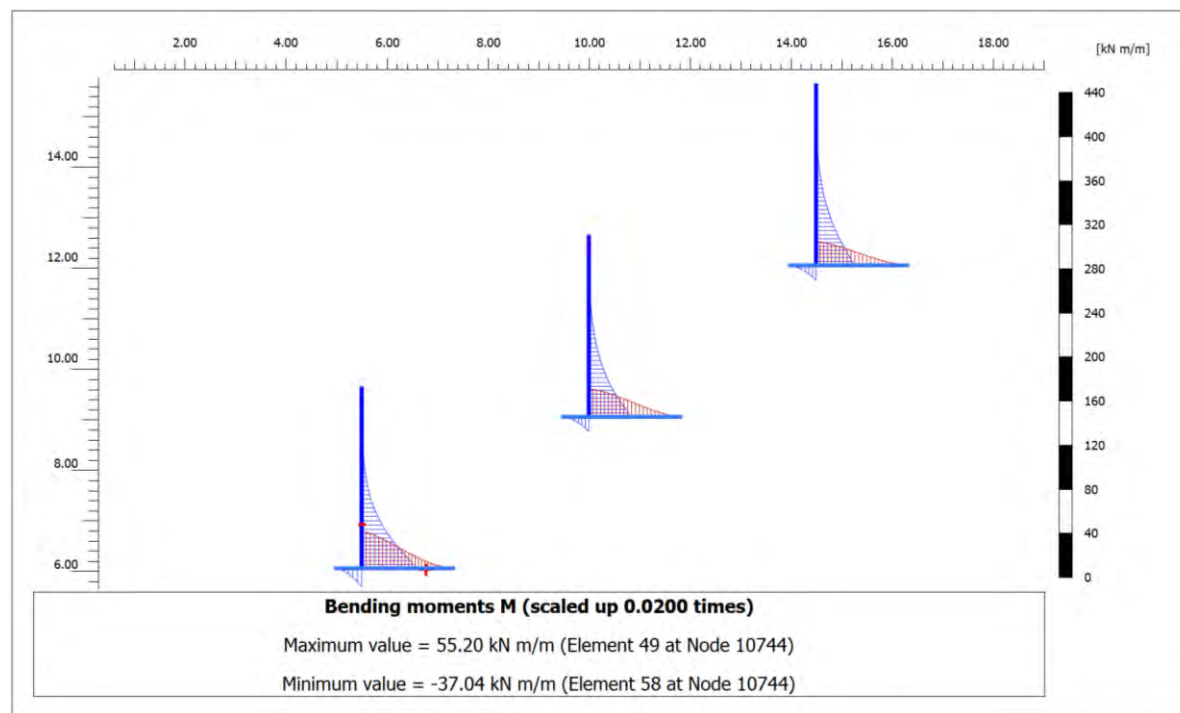


Figura 66. Momentos sobre los muros, separación de 4.5m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

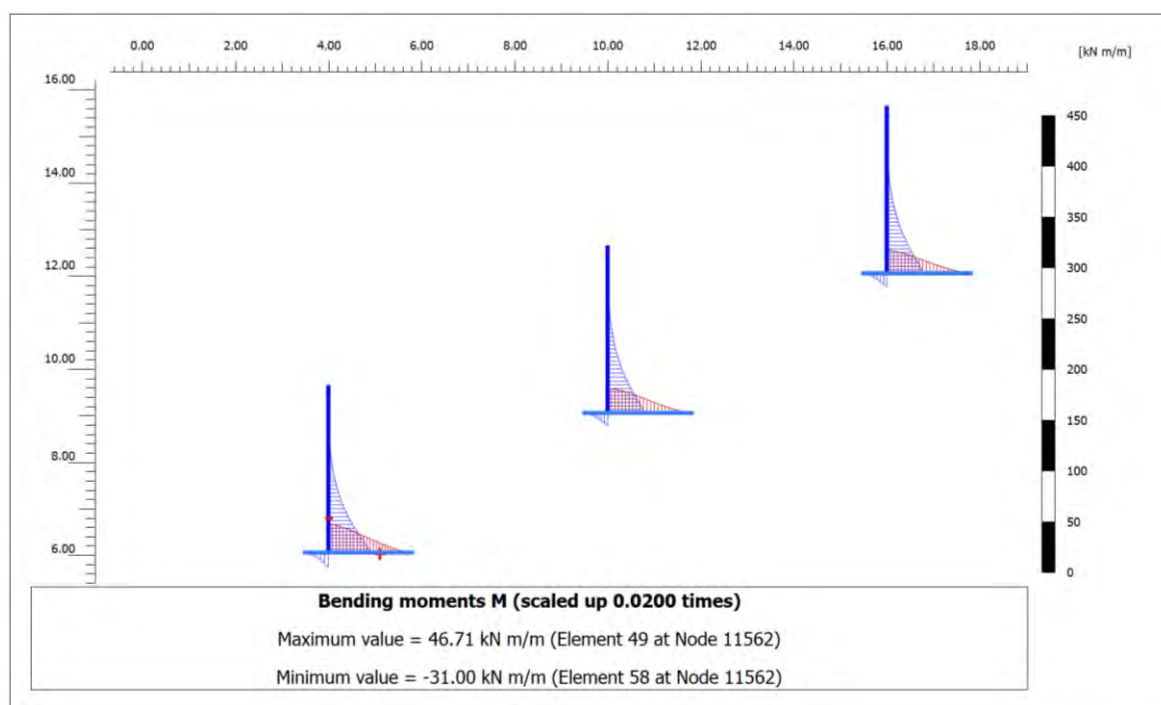


Figura 67. Momentos sobre los muros, separación de 6.0m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

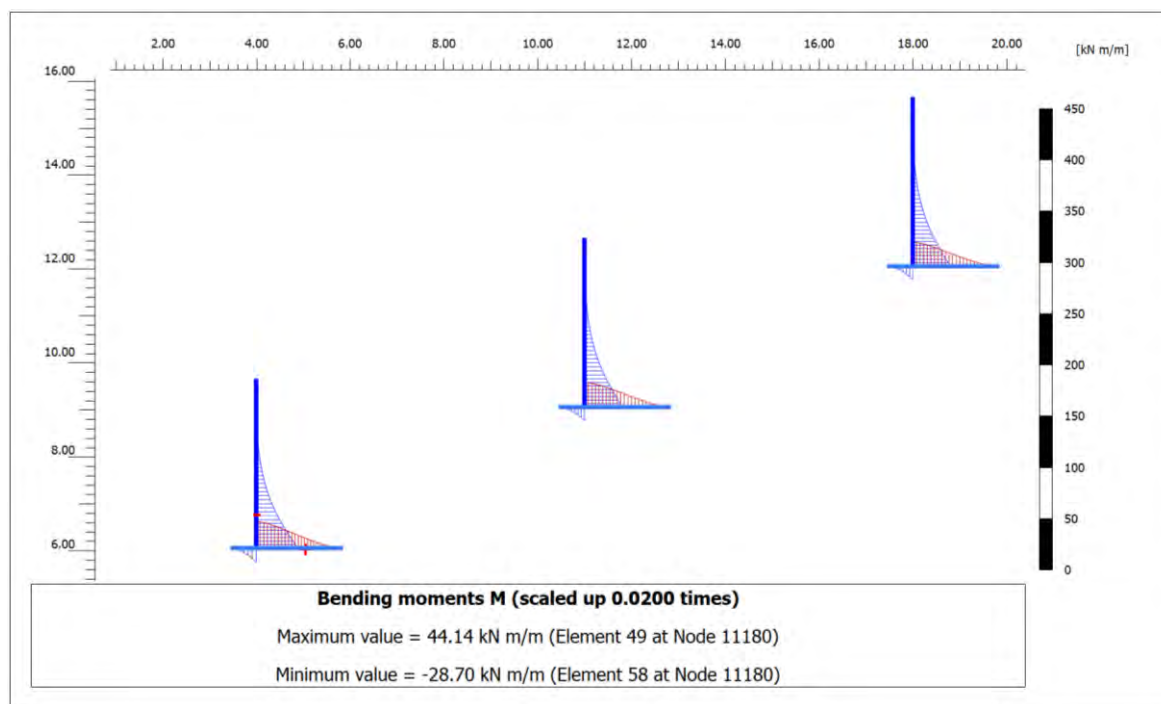


Figura 68. Momentos sobre los muros, separación de 7.0m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Tabla 61

Esfuerzo cortante en pantalla y zapata para diferentes separaciones entre muros.

SEPARACIÓN	N° ESCALÓN	ESFUERZO CORTANTE (kN/m)	
		PANTALLA	ZAPATA
1.5	Muro 1	140.00	-145.40
	Muro 2	75.19	-79.69
	Muro 3	30.02	-38.31
3.0	Muro 1	78.36	-83.02
	Muro 2	49.30	-55.72
	Muro 3	28.76	-42.67
4.5	Muro 1	46.43	-60.16
	Muro 2	38.31	-48.62
	Muro 3	31.92	-47.12
6.0	Muro 1	37.63	-51.73
	Muro 2	32.49	-46.82
	Muro 3	33.10	-48.58
7.0	Muro 1	35.01	-50.29
	Muro 2	32.03	-46.92
	Muro 3	32.55	-47.81

Nota. Fuente: Elaboración propia

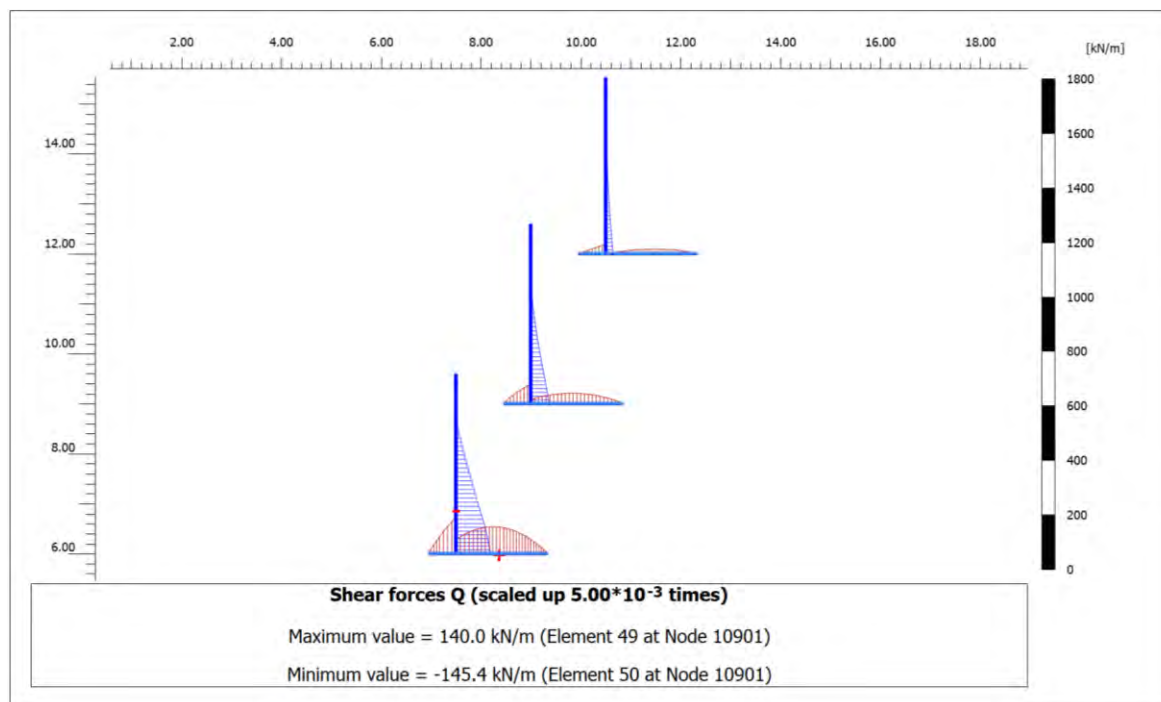


Figura 69. Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 1.50m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

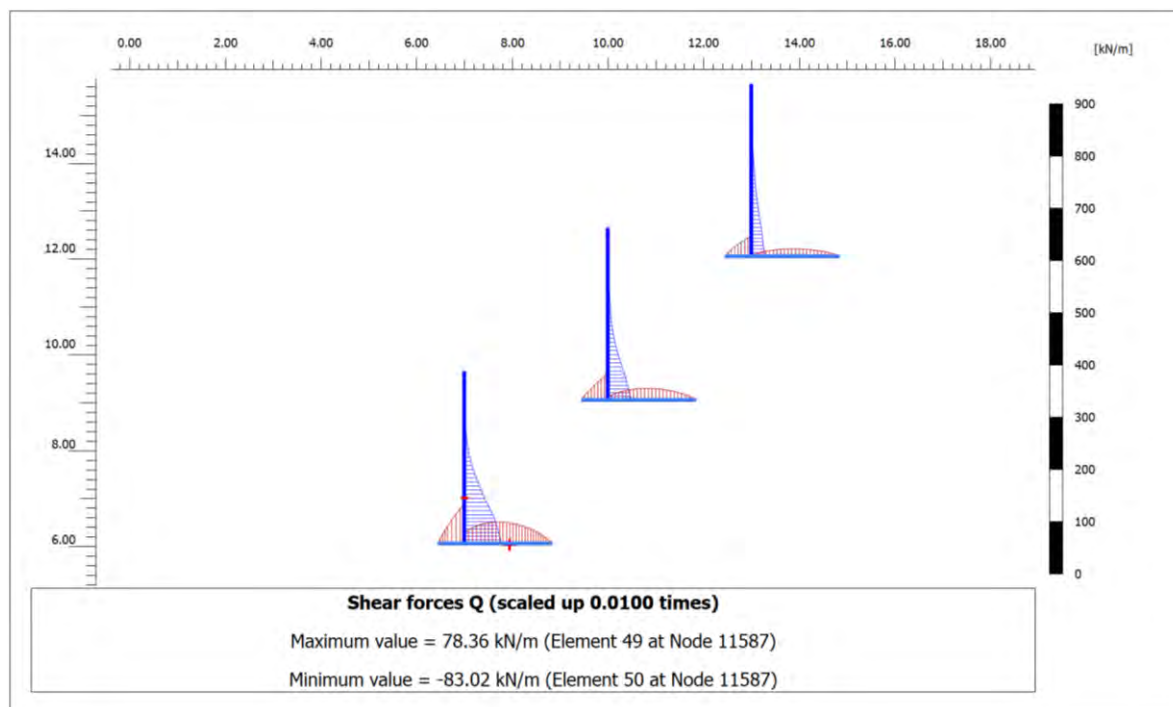


Figura 70. Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 3.0m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

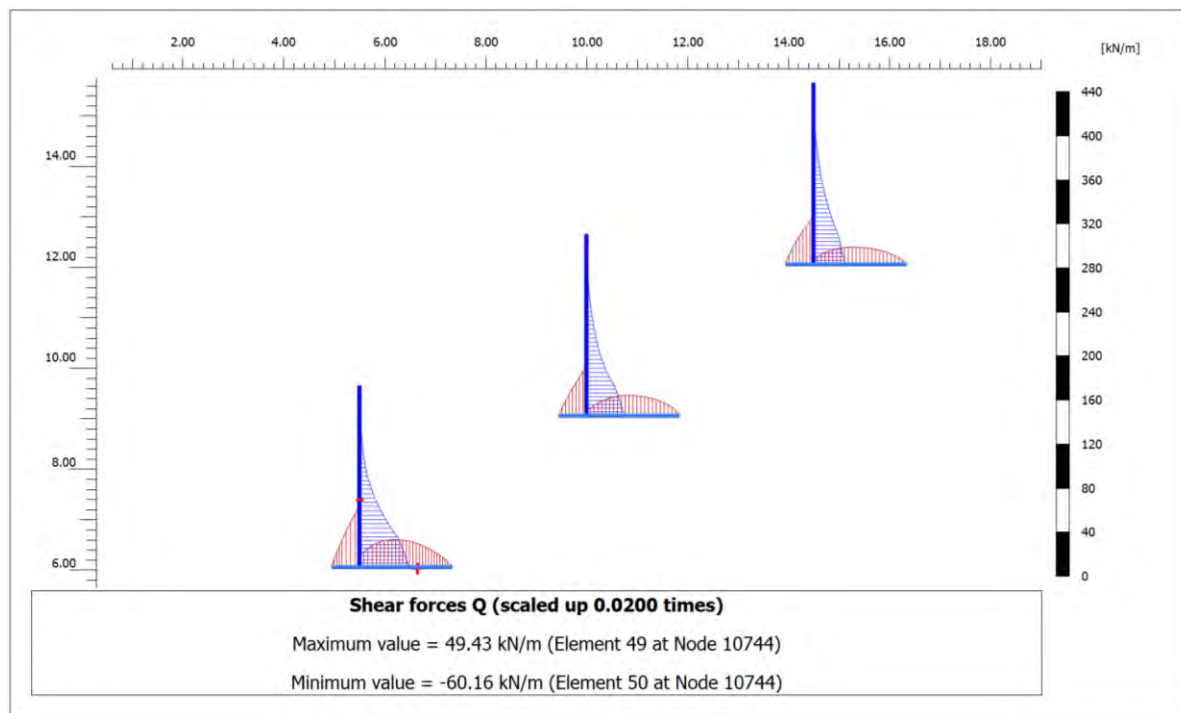


Figura 71. Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 4.5m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

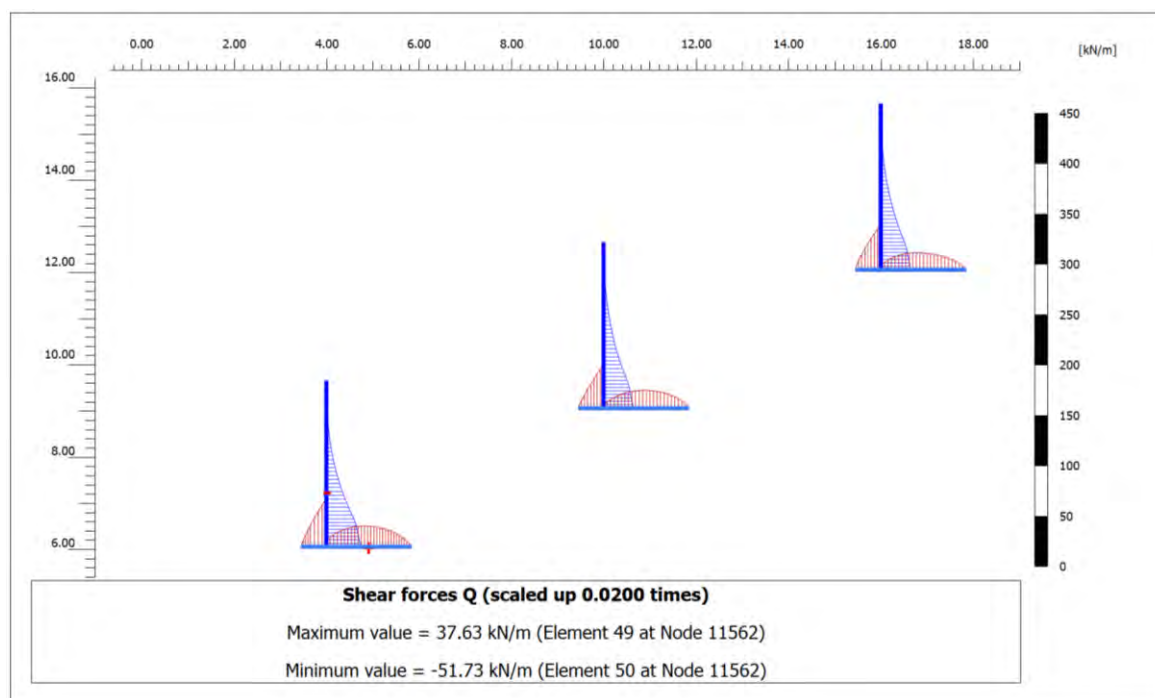


Figura 73. Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 6.0m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

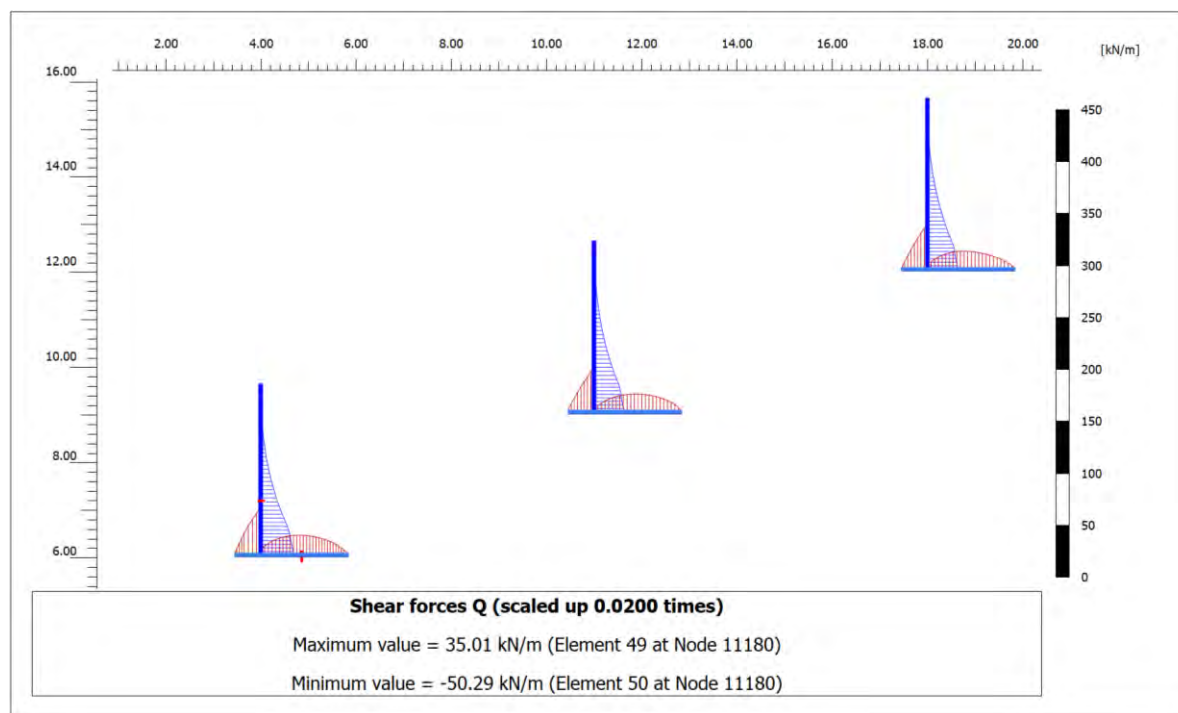


Figura 72. Esfuerzos cortantes sobre los muros, separación de 7.0m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Tabla 62

Esfuerzo axial en pantalla y zapata para diferentes separaciones entre muros escalonados.

SEPARACIÓN	Nº ESCALÓN	ESFUERZO AXIAL (kN/m)		
		PANTALLA	ZAPATA	
1.5	Muro 1	-90.18	84.32	-55.62
	Muro 2	-64.05	59.19	-18.92
	Muro 3	-39.64	28.96	
3.0	Muro 1	-61.49	40.26	38.07
	Muro 2	-49.67	33.92	-15.31
	Muro 3	-40.56	22.67	-6.02
4.5	Muro 1	-49.59	21.62	-27.77
	Muro 2	-45.01	20.60	-17.66
	Muro 3	-42.81	21.01	-10.85
6.0	Muro 1	-45.38	15.81	-21.78
	Muro 2	-43.67	16.36	-16.09
	Muro 3	-43.76	19.75	-13.28
7.0	Muro 1	-44.33	15.90	-19.07
	Muro 2	-43.42	16.67	-15.31
	Muro 3	43.08	19.97	12.52

Nota. Fuente: Elaboración propia

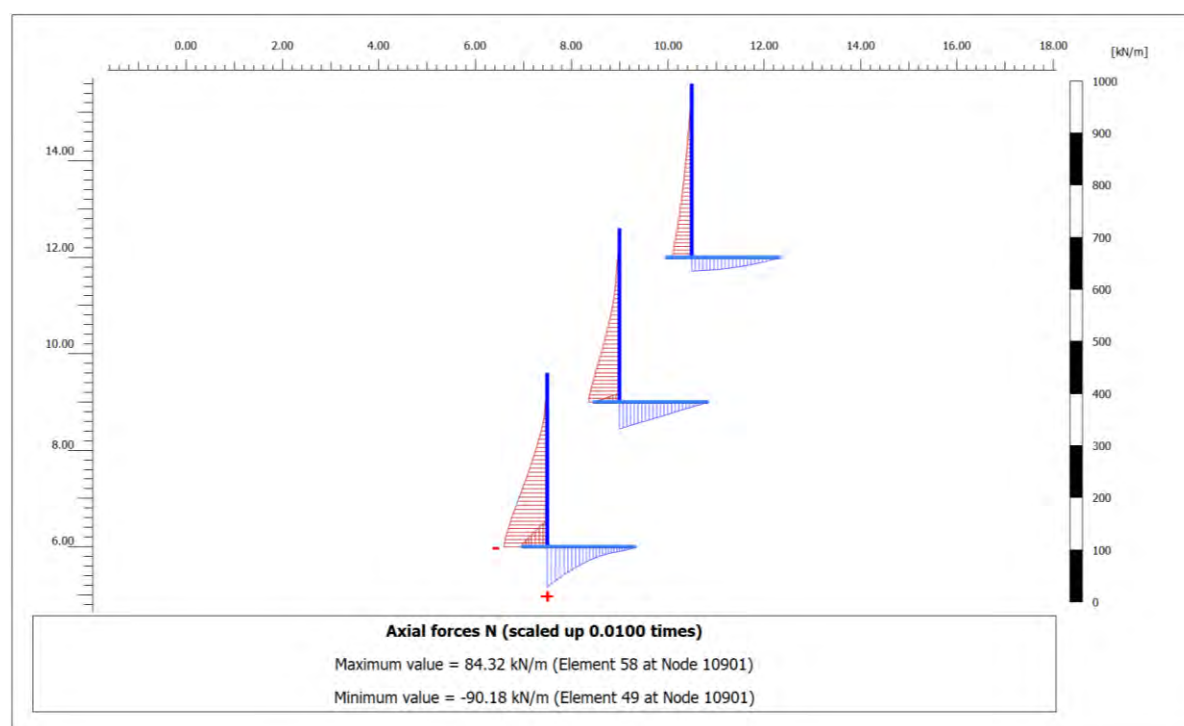


Figura 74. Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 1.5m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

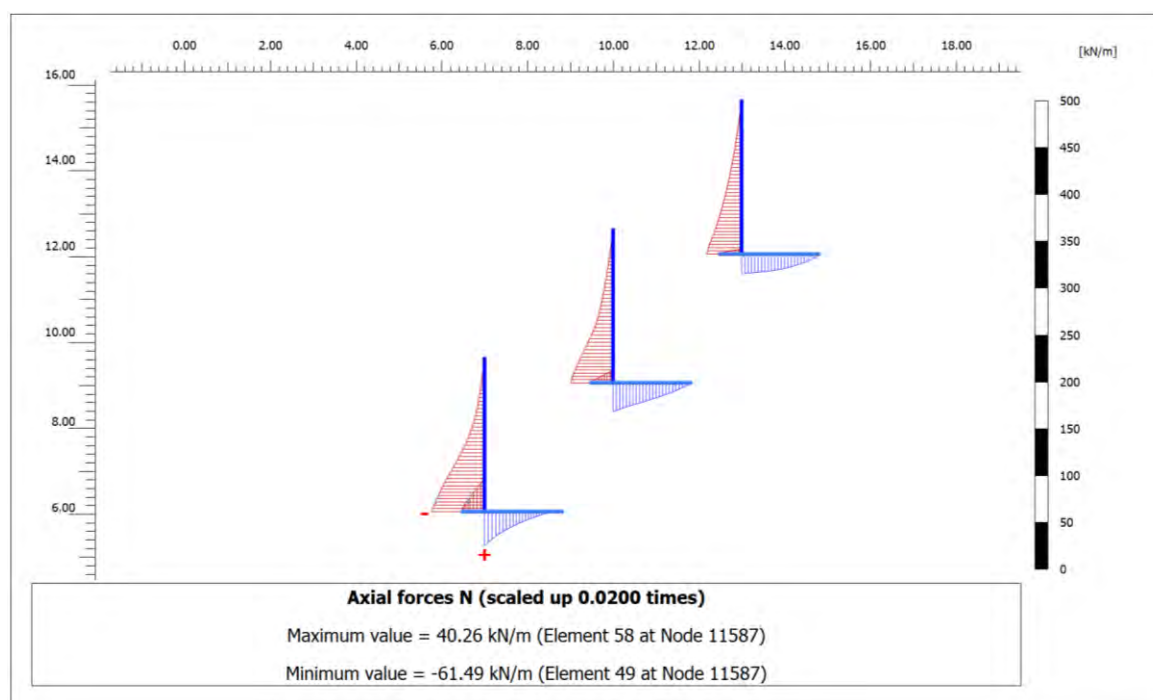


Figura 76. Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 3.0m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

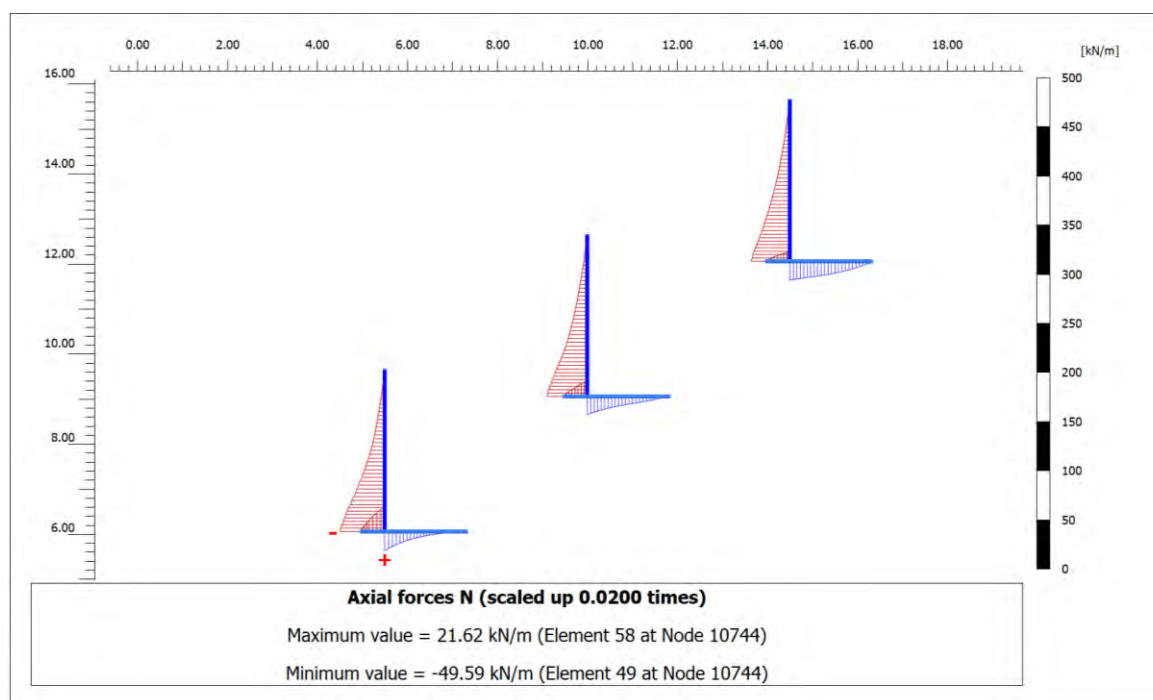


Figura 75. Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 4.5m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

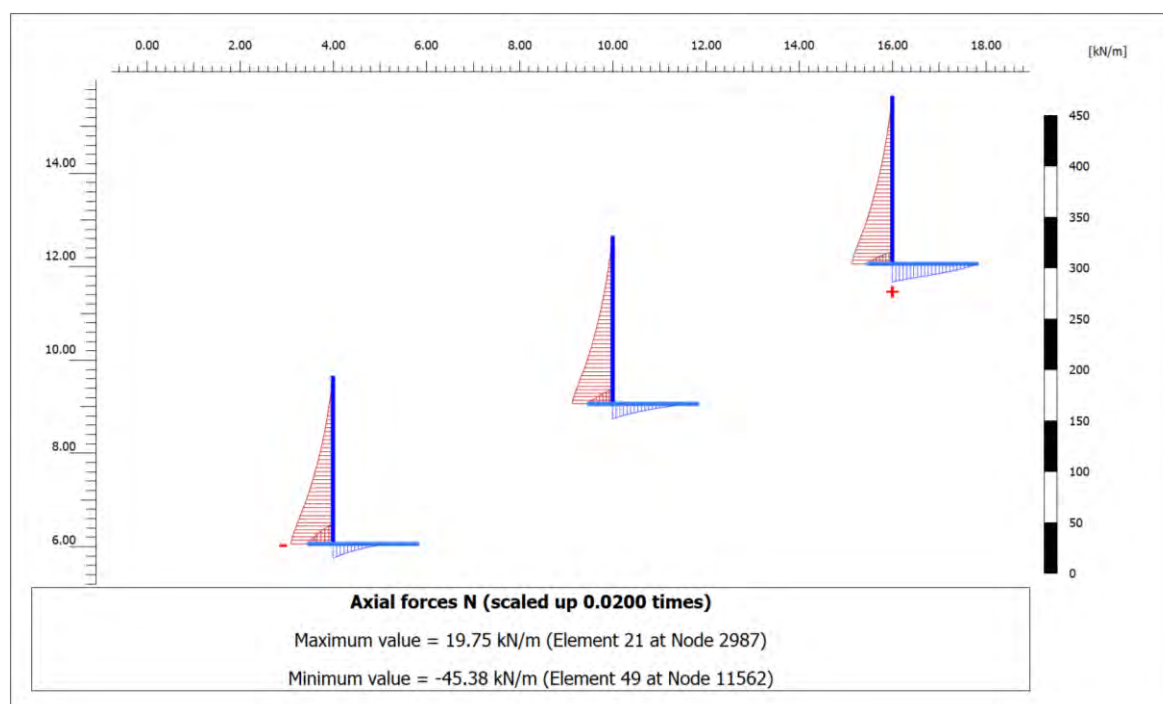


Figura 78. Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 6.0m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

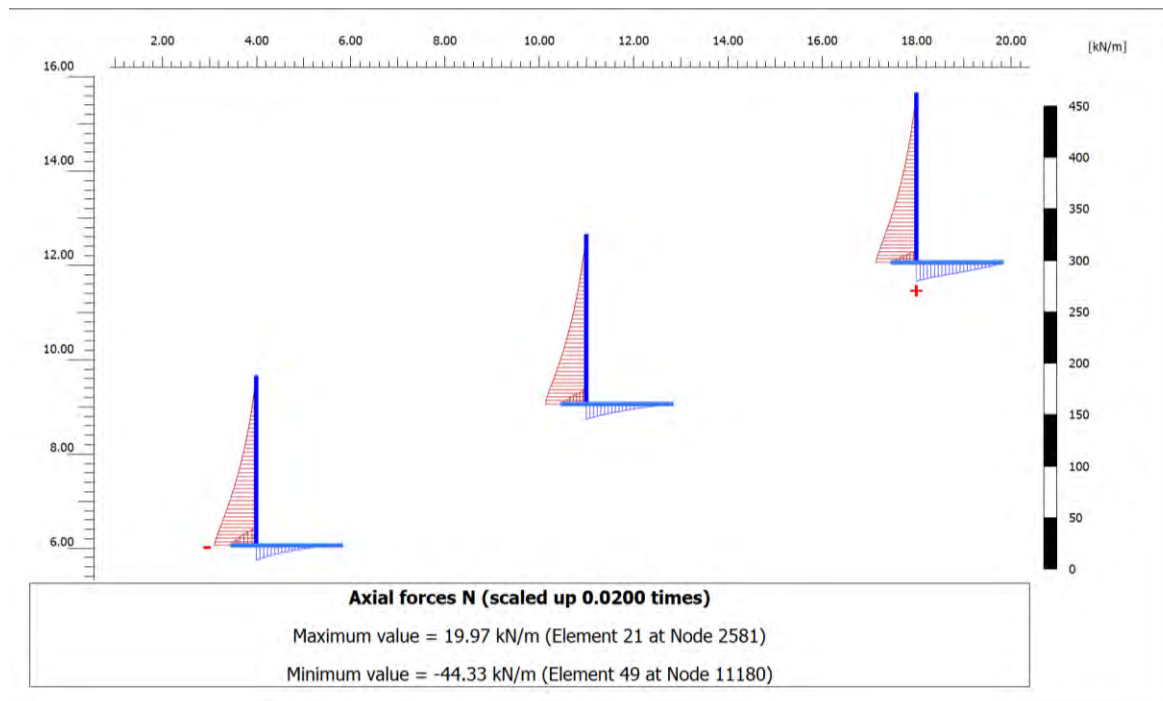


Figura 77. Esfuerzos axiales sobre los muros, separación de 7.0m

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

4.3.1.1. Relación Proporcional entre Altura y Separación

Con el fin de establecer una posible relación entre la separación óptima y la altura, se analizaron dos geometrías de muro complementarias, de 6 y 8 metros de altura. Para mantener la consistencia de estudio, se siguió el mismo proceso de pre-dimensionamiento antes descrito.

Tabla 63

Esfuerzos generados en la pantalla para distintas separaciones entre muros $H=6m$.

SEPARACION	Nº ESCALÓN	ESFUERZOS SOBRE LA PANTALLA		
		MOMENTOS (Kn.m/m)	ESFUERZO CORTANTE (Kn/m)	ESFUERZO AXUAL (Kn/m)
3.0	Muro 1	490.40	257.00	-168.20
	Muro 2	216.70	148.00	-121.00
	Muro 3	112.30	66.88	-81.09
6.0	Muro 1	208.90	130.70	-112.50
	Muro 2	151.00	95.35	-97.58
	Muro 3	126.40	70.17	-87.52
8.0	Muro 1	163.70	92.46	-97.03
	Muro 2	140.00	81.10	-92.24
	Muro 3	136.90	74.60	-90.37
9.0	Muro 1	155.30	84.85	-94.19
	Muro 2	138.80	76.49	-91.33
	Muro 3	138.50	75.18	-90.88

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 64

Esfuerzos generados en la pantalla para distintas separaciones entre muros $H=8m$.

SEPARACION	Nº ESCALÓN	ESFUERZOS SOBRE LA PANTALLA		
		MOMENTOS (Kn.m/m)	ESFUERZO CORTANTE (Kn/m)	ESFUERZO AXUAL (Kn/m)
4.0	Muro 1	1171.00	463.70	-298.40
	Muro 2	512.10	261.10	-209.90
	Muro 3	265.60	117.80	-137.10
8.0	Muro 1	486.00	234.80	-196.00
	Muro 2	349.60	172.00	-166.00
	Muro 3	301.00	129.20	-149.10
10.0	Muro 1	393.40	176.90	-169.80
	Muro 2	329.50	149.10	-157.40
	Muro 3	316.40	134.30	-152.40
12.0	Muro 1	366.40	155.10	-161.20
	Muro 2	326.10	138.40	-154.60
	Muro 3	324.90	136.50	-153.20

Nota. Fuente: Elaboración propia

4.3.2. Resultados de Factor de Seguridad

4.3.2.1. A 1.5 metros de separación

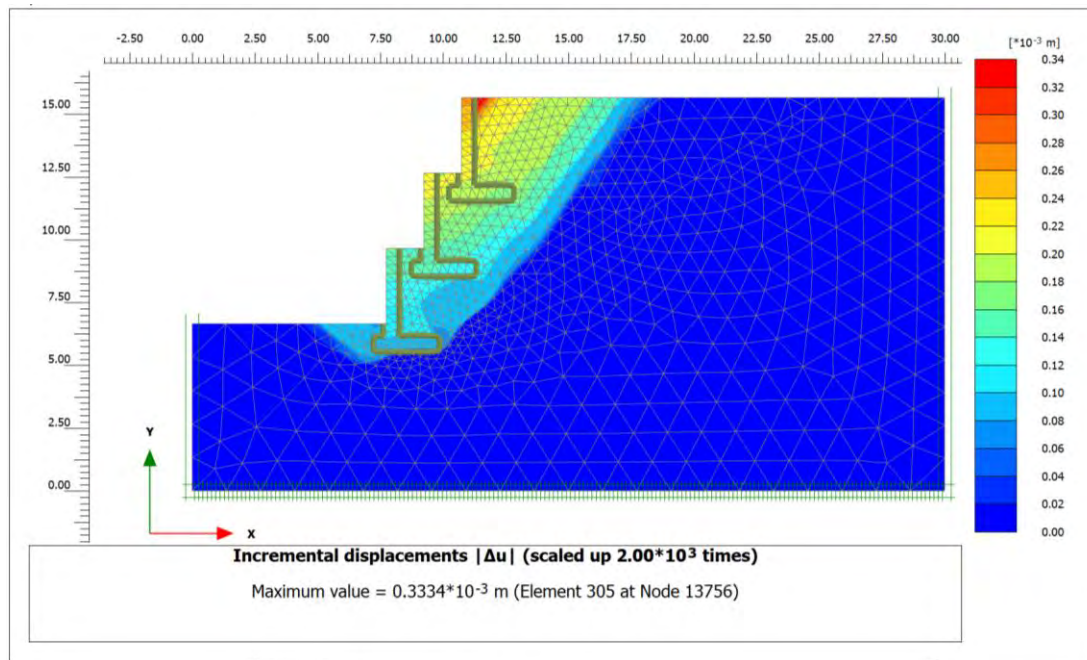
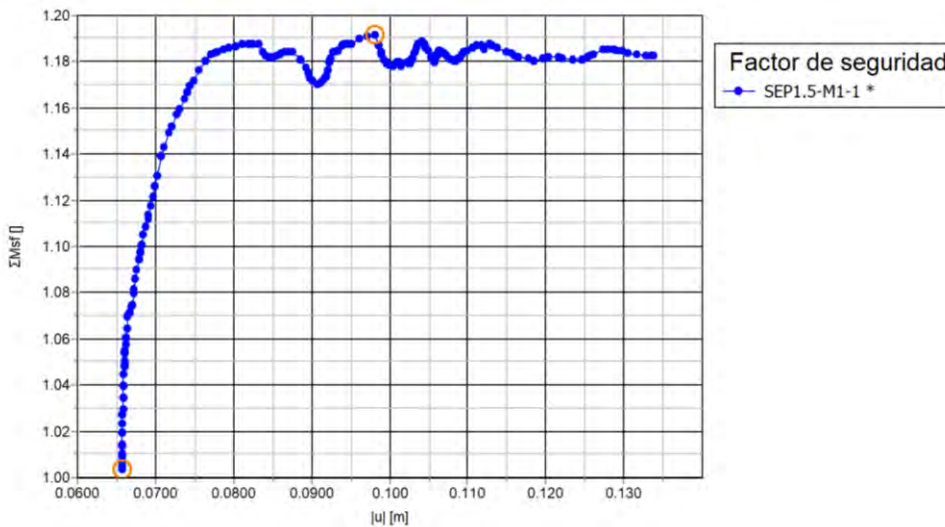


Figura 79. Falla Global, incremento de Desplazamientos, separación de 1.50m entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Gráfica 41

Factor de seguridad para 1.50m de separación entre muros



Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

$$\text{Safety Factor} = \sum M_{sf} = 1.182$$

4.3.2.2. A 3.0m de separación

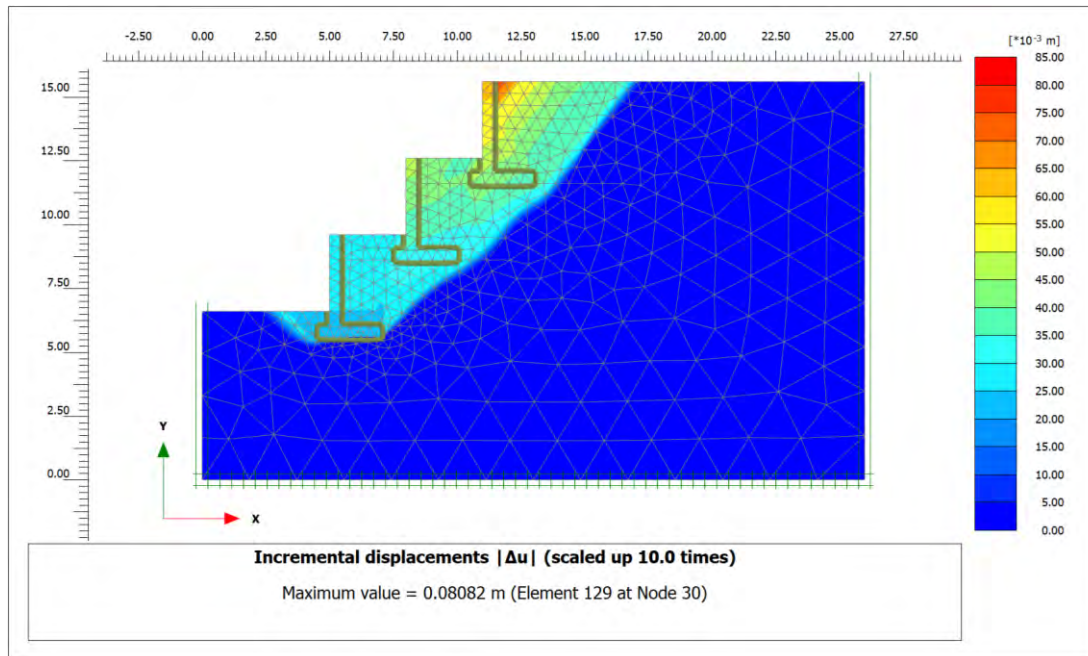
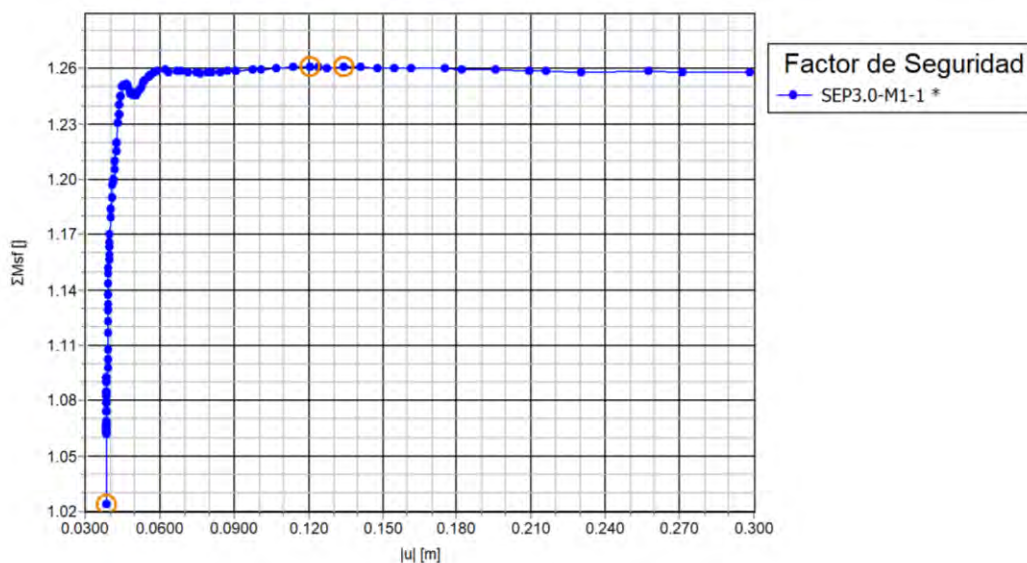


Figura 80. Falla Global, incremento de Desplazamientos, separación de 3.0m entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Gráfica 42

Factor de seguridad para 3.00m de separación entre muros



Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

$$\text{Safety Factor} = \sum M_{sf} = 1.258$$

4.3.2.3. A 4.50m de separación.

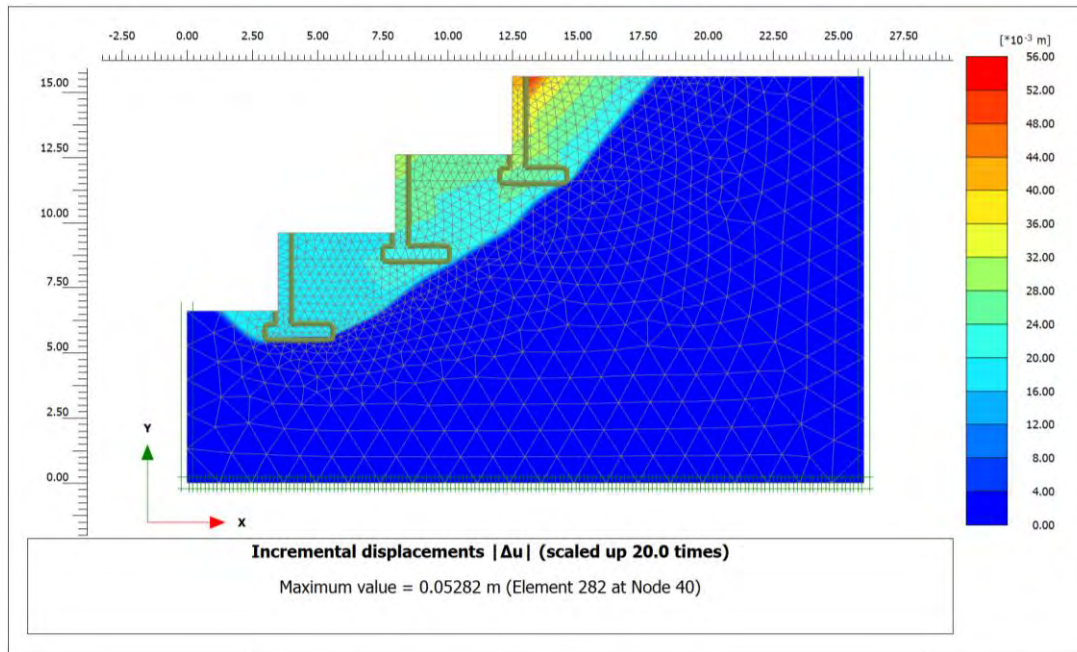
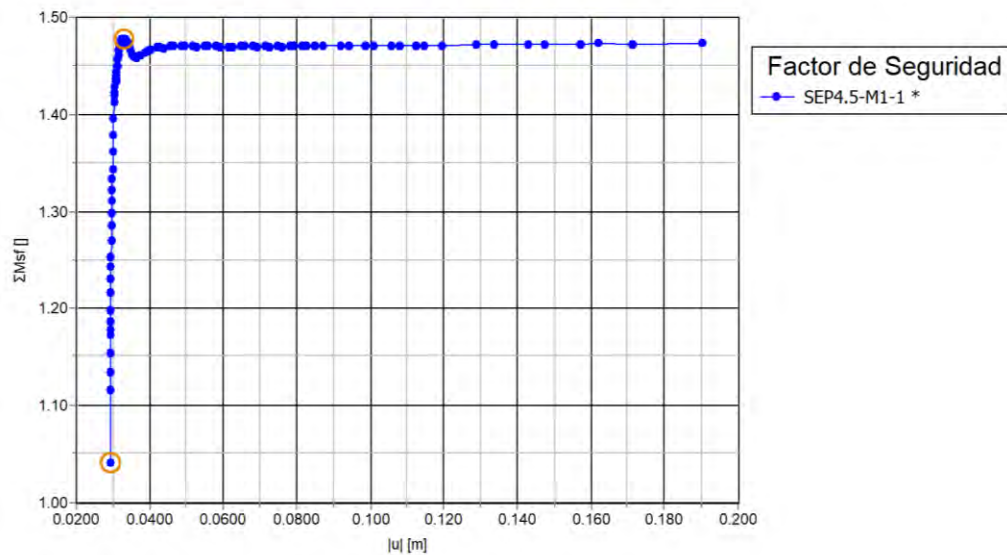


Figura 81. Falla Global, incremento de Desplazamientos, separación de 4.5m entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Gráfica 43

Factor de seguridad para 4.50m de separación entre muros



Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

$$\text{Safety Factor} = \sum M_{sf} = 1.473$$

4.3.2.4. A 6.00m de separación

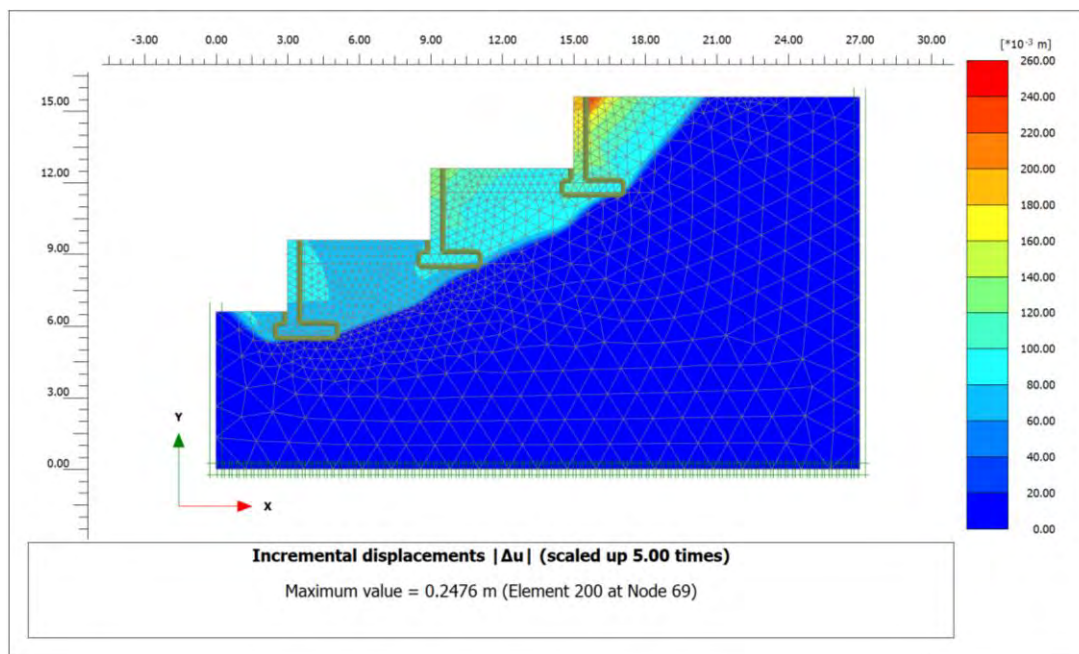
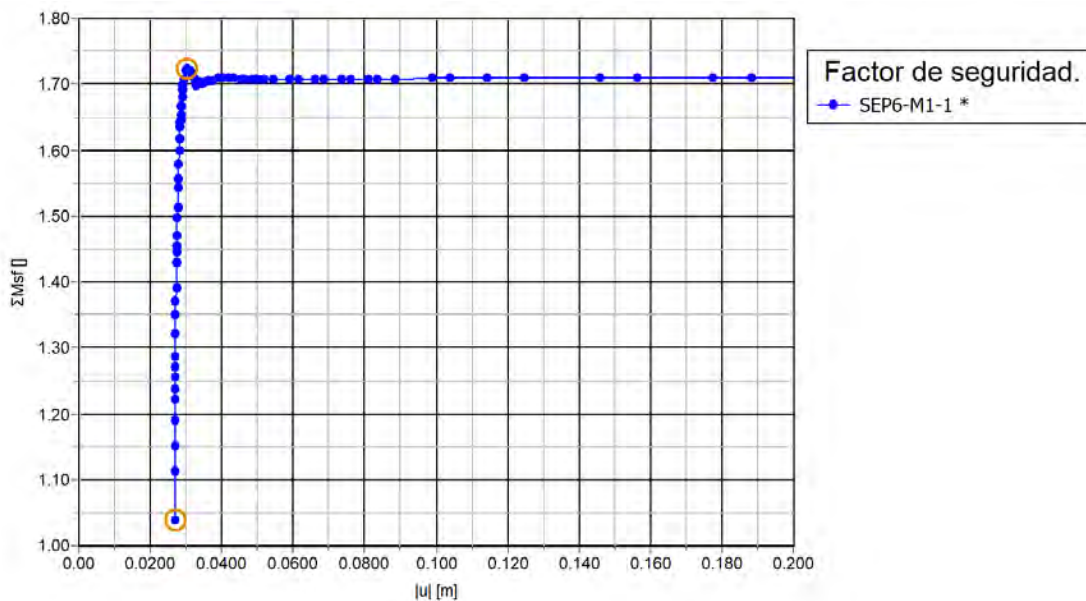


Figura 82. Falla Global, incremento de Desplazamientos, separación de 6.0m entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Gráfica 44

Factor de seguridad para 6.00m de separación entre muros



Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

$$\text{Safety Factor} = \sum M_{sf} = 1.710$$

Tabla 65

Factores de Seguridad global para las diferentes separaciones entre muros.

SEPARACIÓN	Factor de Seguridad ΣM_{sf}
1.50m	1.182
3.00m	1.258
4.50m	1.473
6.00m	1.710

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.3.3. Resultados de desplazamientos generados.

4.3.3.1. A 1.50m de separación

Fase 1, comprende el primer escalón. Deformación total=1.596cm

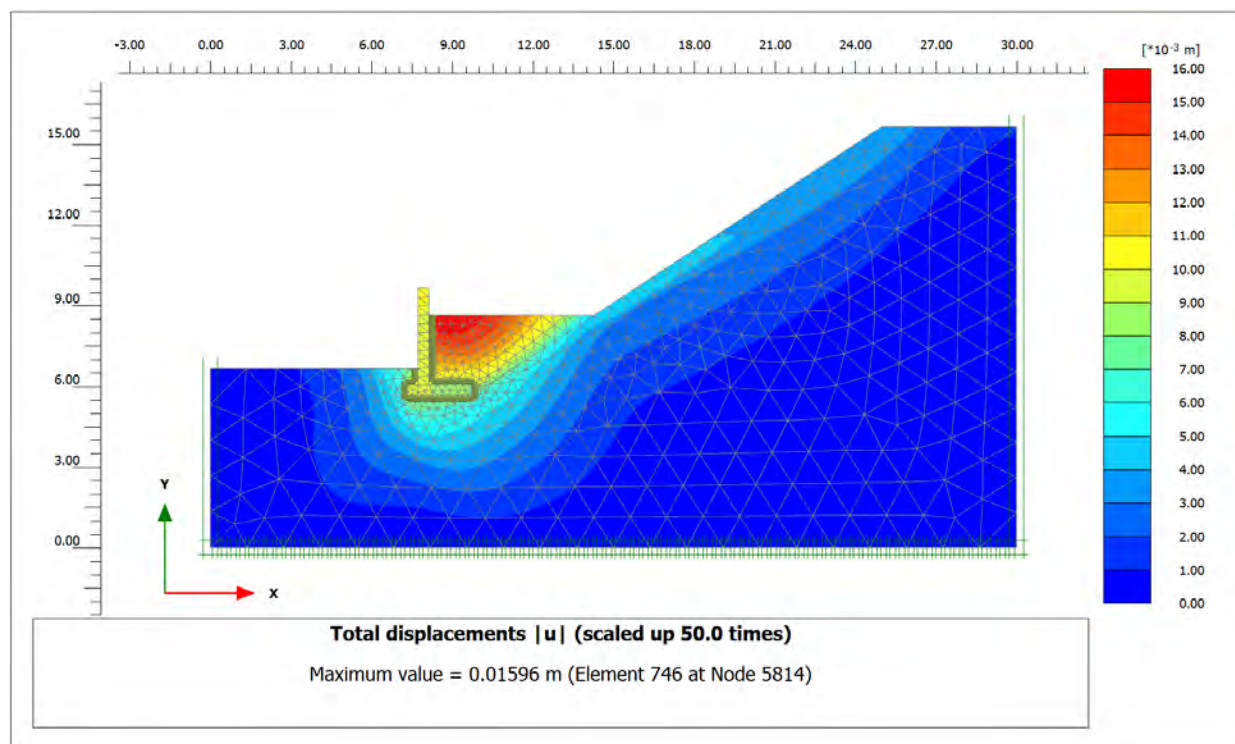


Figura 83. Desplazamientos totales en la Fase 1 a 1.50m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Fase 2, comprende el segundo escalón. Deformación total=4.982cm

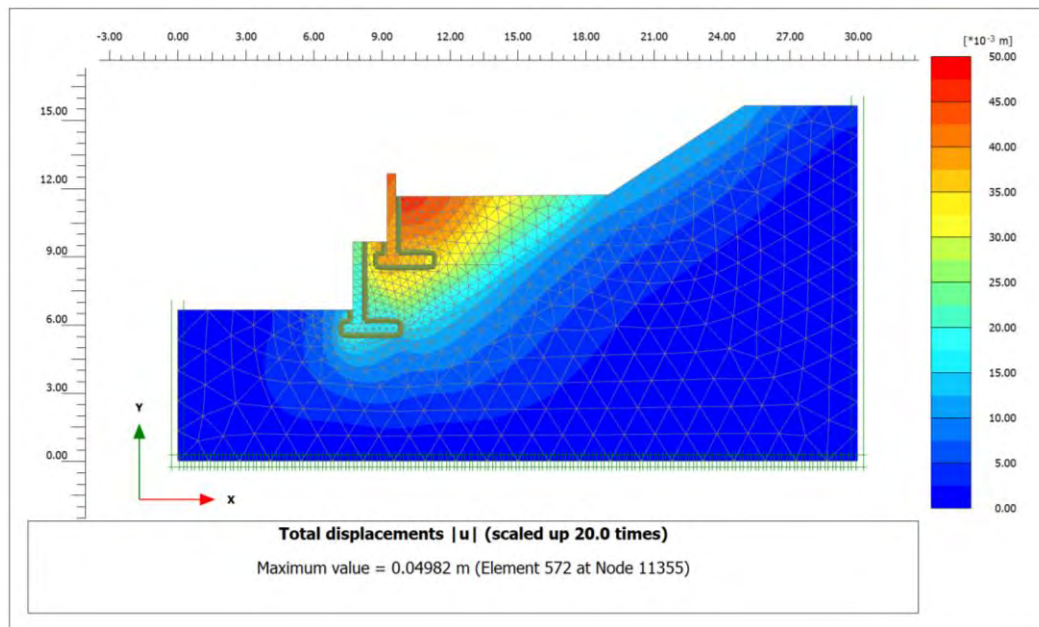


Figura 84. Desplazamientos totales en la Fase 2 a 1.50m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Fase 3, comprende el tercer escalón. Deformación total=14.43cm

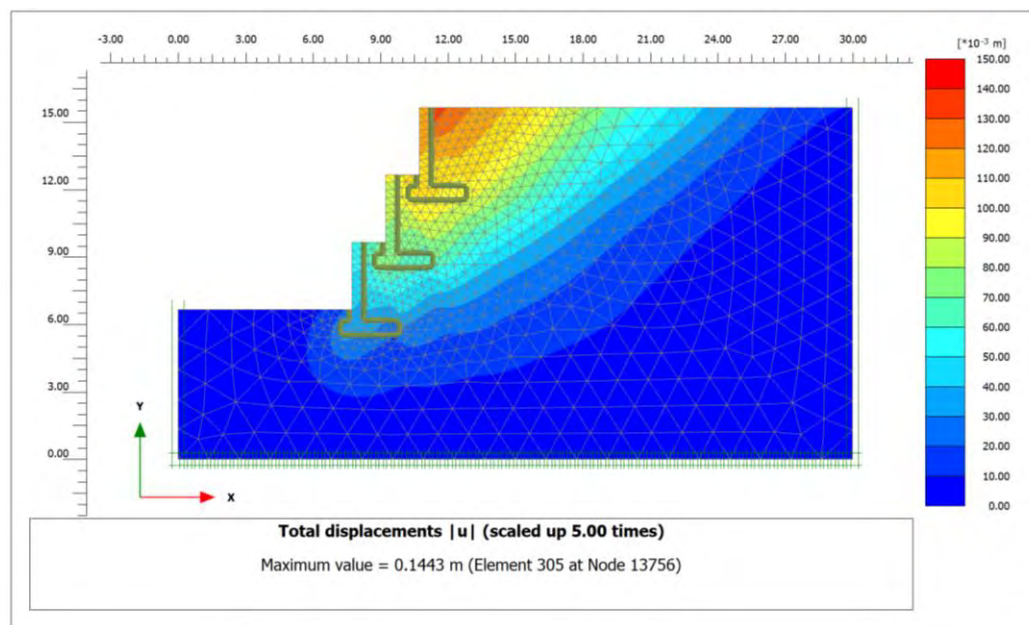


Figura 85. Desplazamientos totales en la Fase 3 a 1.50m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

4.3.3.2. A 3.00m de separación

Fase 1, comprende el primer escalón. Deformación total=1.579cm

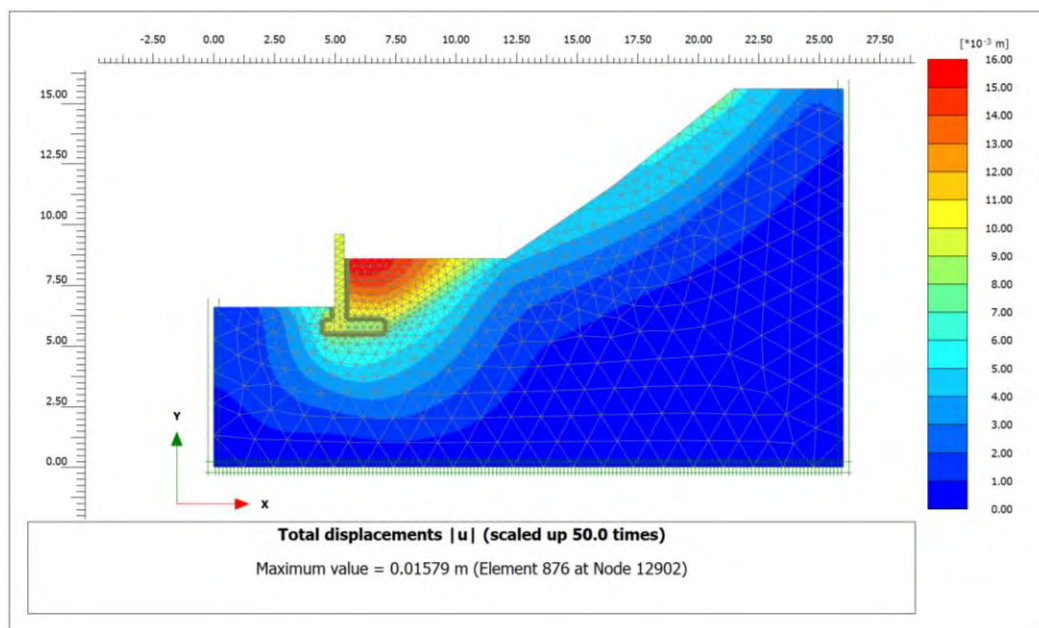


Figura 86. Desplazamientos totales en la Fase 1 a 3.00m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Fase 2, comprende el segundo escalón. Deformación total=4.252cm

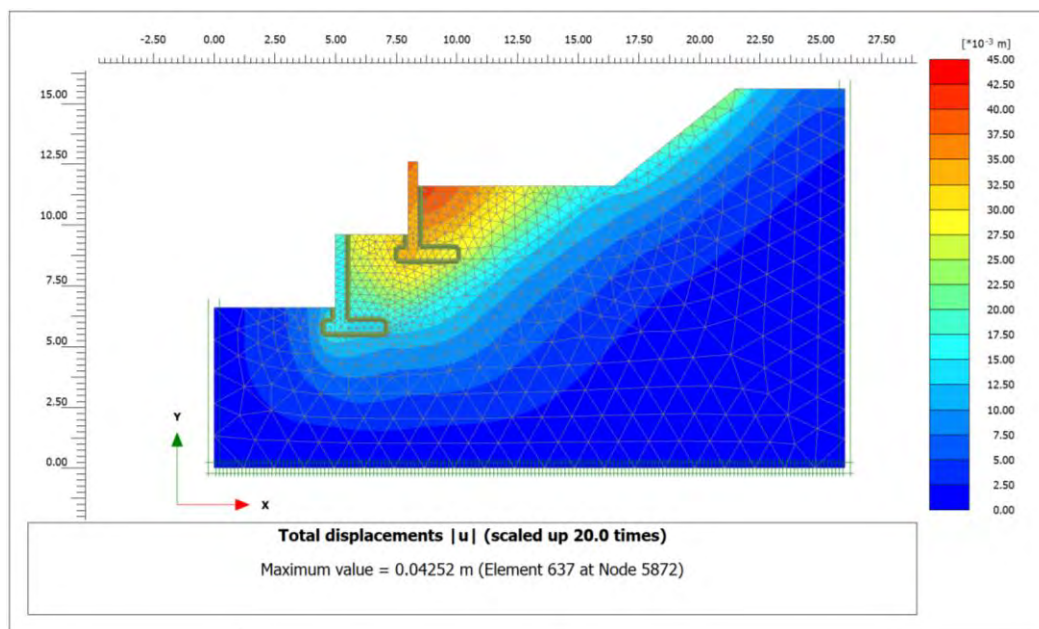


Figura 87. Desplazamientos totales en la Fase 2 a 3.00m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Fase 3, comprende el tercer escalón. Deformación total=10.61cm

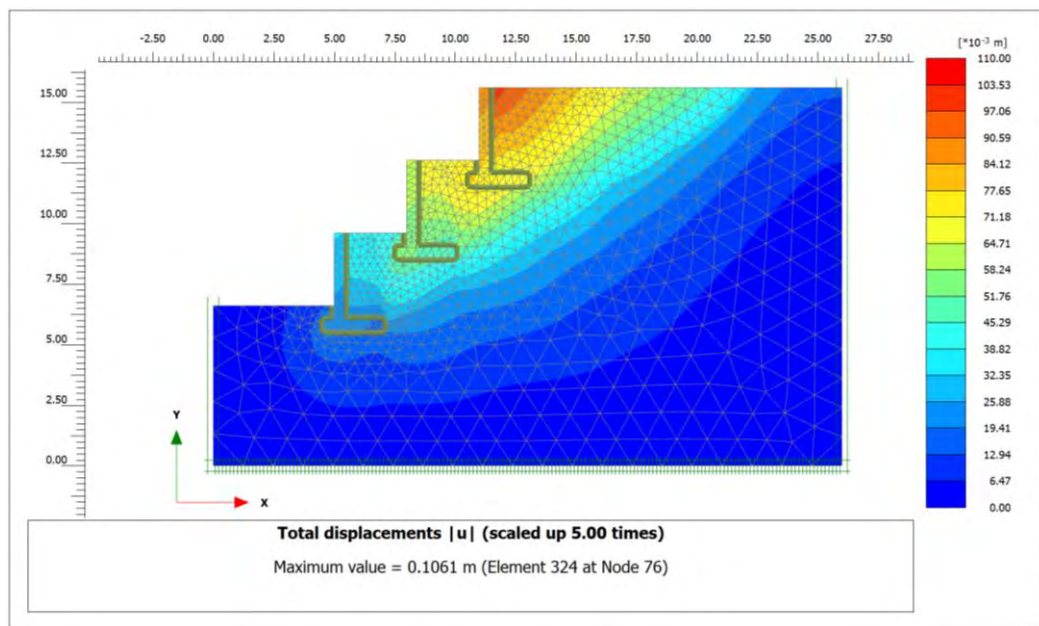


Figura 88. Desplazamientos totales en la Fase 3 a 3.00m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

4.3.3.3. A 4.50m de separación

Fase 1, comprende el primer escalón. Deformación total=1.605cm

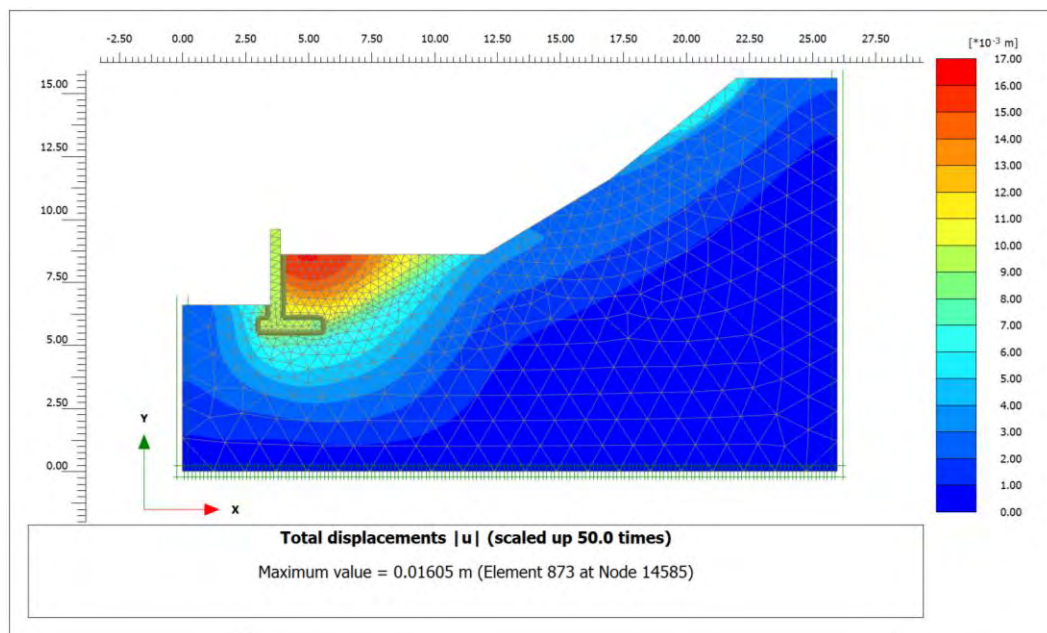


Figura 89. Desplazamientos totales en la Fase 1 a 4.50m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Fase 2, comprende el segundo escalón. Deformación total=3.833cm

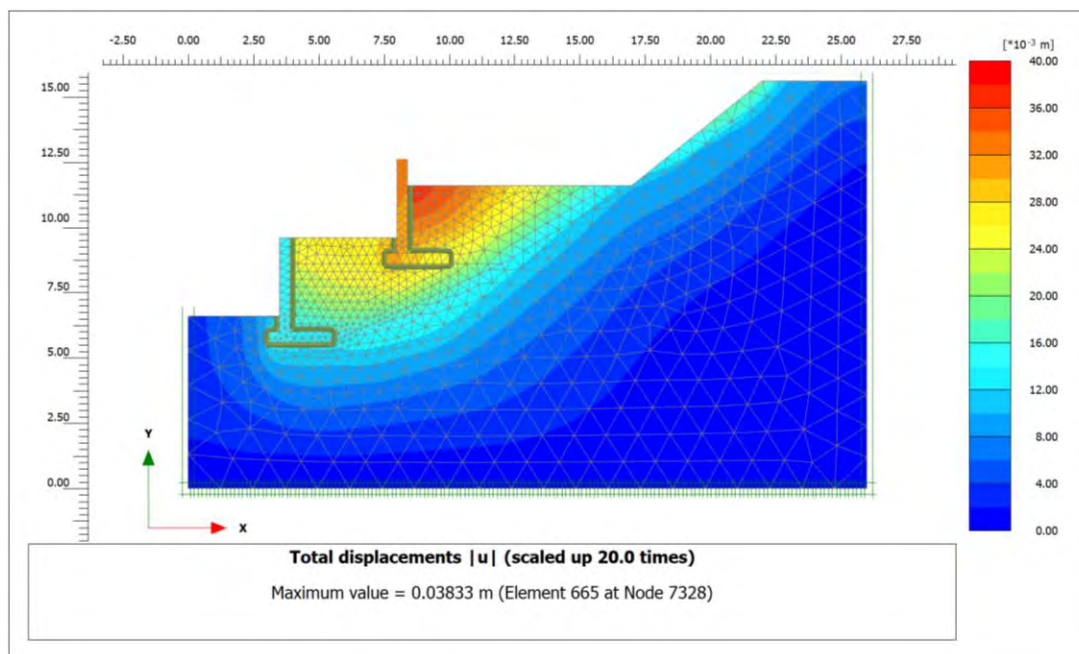


Figura 90. Desplazamientos totales en la Fase 2 a 4.50m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Fase 3, comprende el tercer escalón. Deformación total=7.645cm

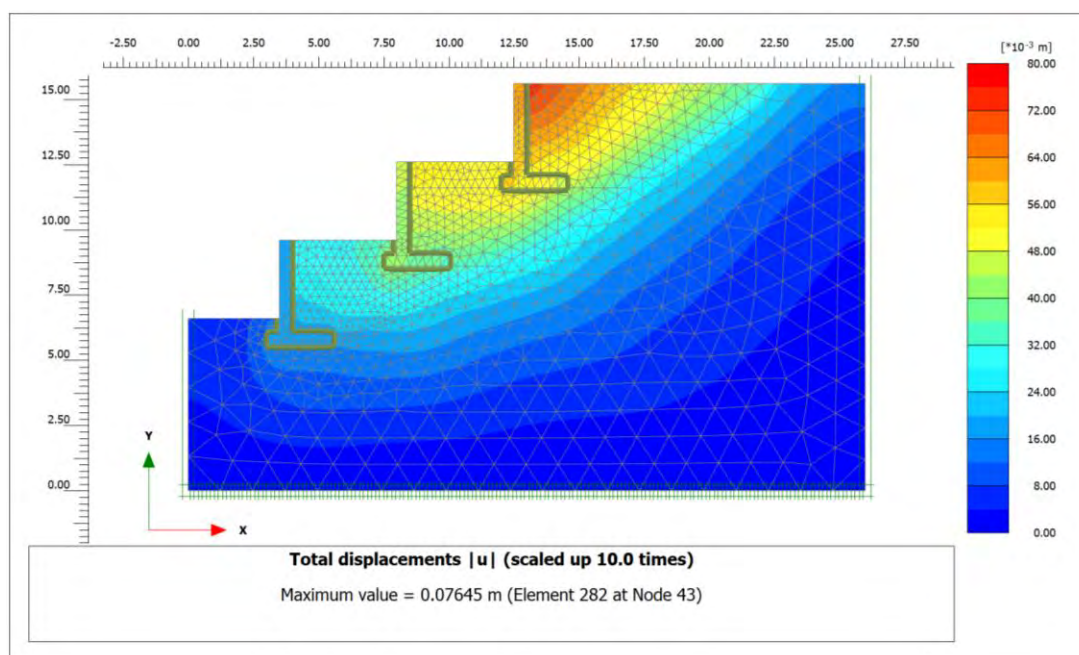


Figura 91. Desplazamientos totales en la Fase 3 a 4.50m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

4.3.3.4. A 6.00m de separación

Fase 1, comprende el primer escalón. Deformación total=1.566cm

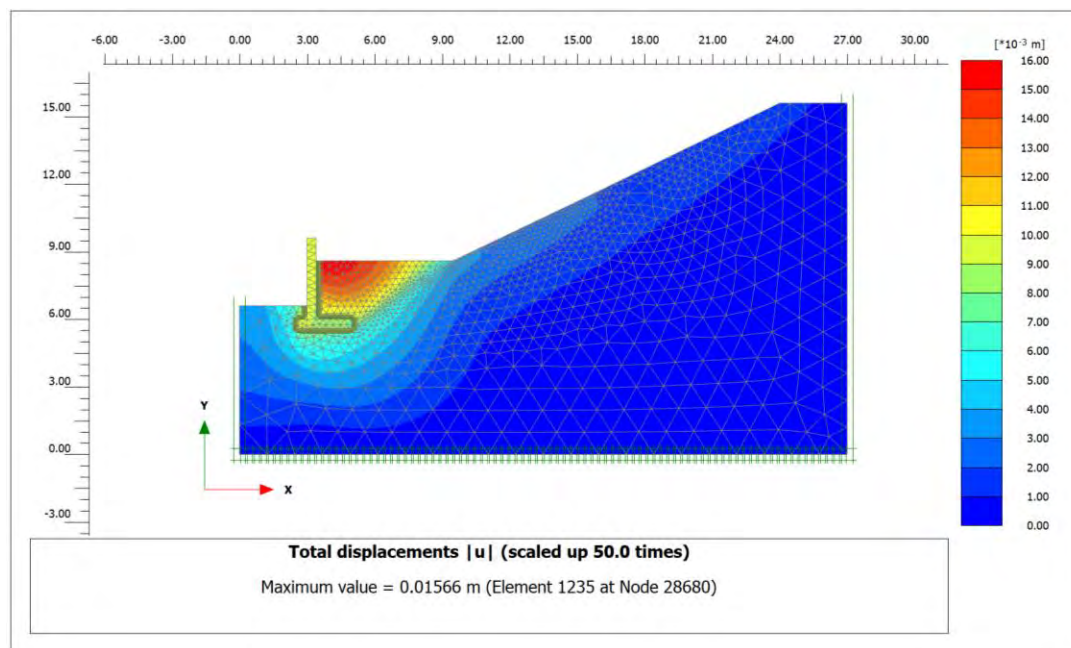


Figura 92. Desplazamientos totales en la Fase 1 a 6.00m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Fase 2, comprende el primer escalón. Deformación total=3.021cm

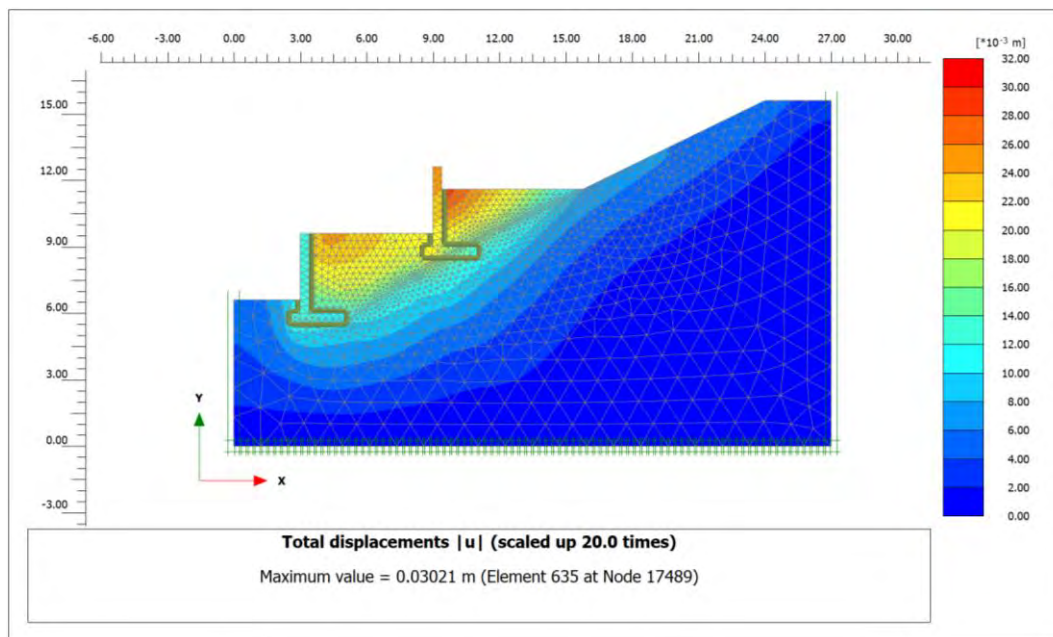


Figura 93. Desplazamientos totales en la Fase 2 a 6.00m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Fase 3, comprende el primer escalón. Deformación total=5.372cm

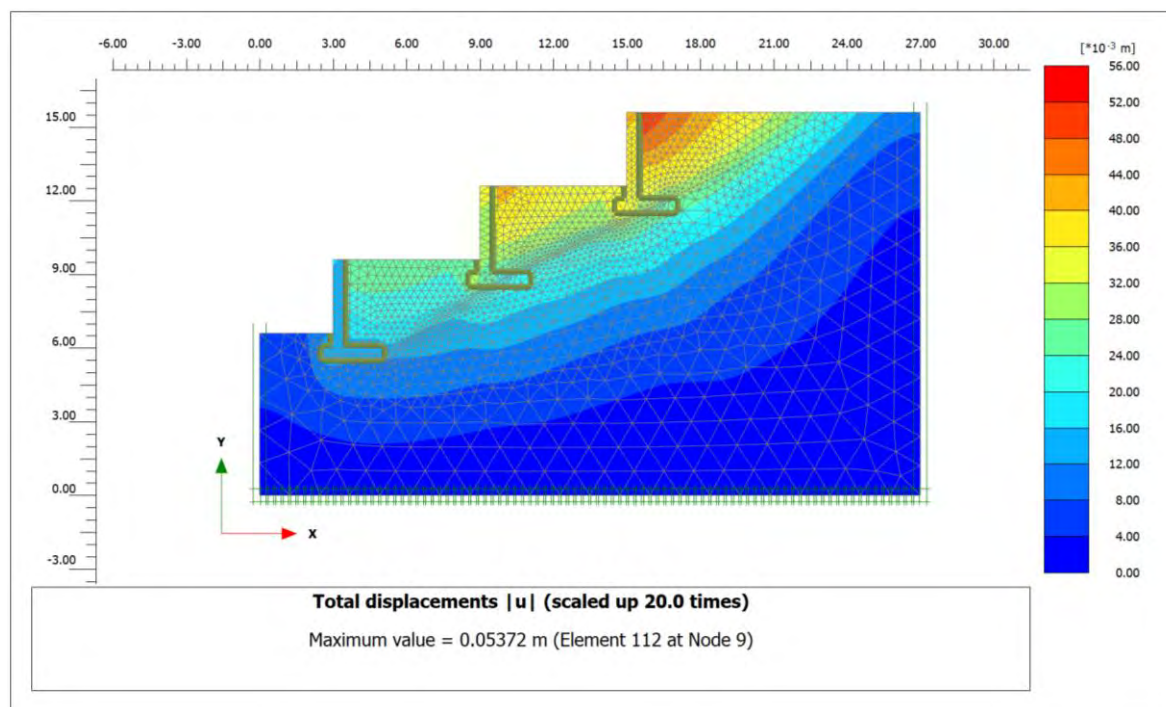


Figura 94. Desplazamientos totales en la Fase 3 a 6.00m de separación entre muros

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

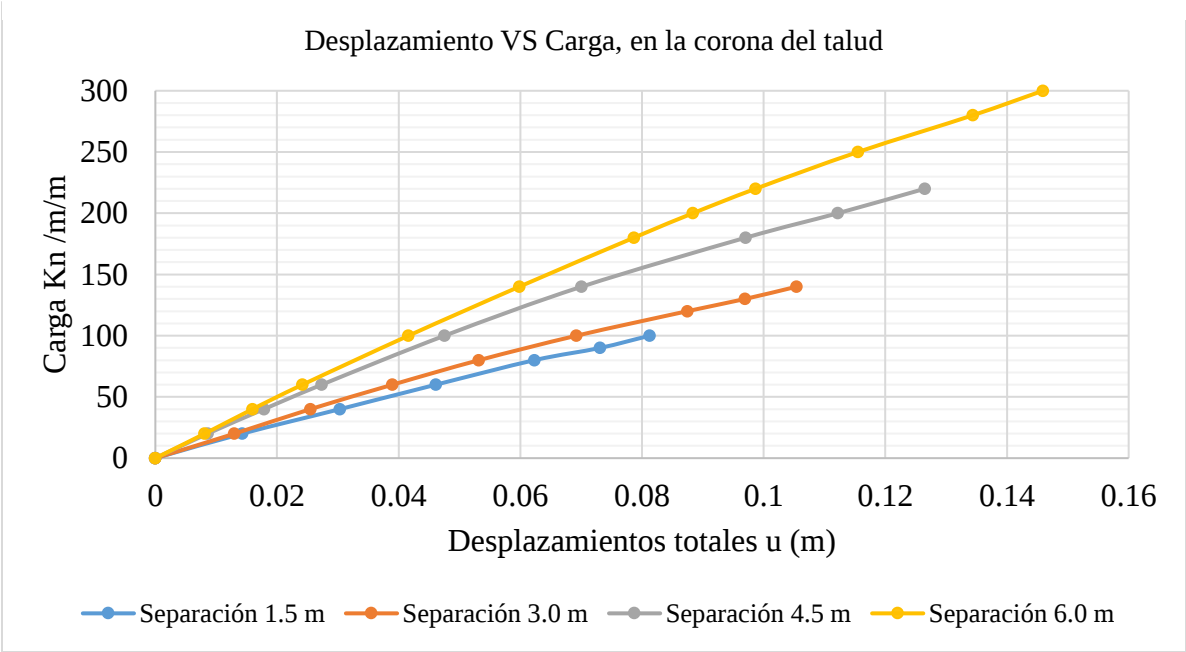
4.3.4. Resultados de desplazamiento bajo carga aplicada.

Tabla 66
Desplazamiento bajo Carga en la corona del talud para las diferentes separaciones

Separación 1.5m		Separación 3.0m		Separación 4.5m		Separación 6.0m	
Carga kN/m/m	Desplazamiento total (m)	Carga kN/m/m	Desplazamiento total (m)	Carga kN/m/m	Desplazamiento total (m)	Carga kN/m/m	Desplazamiento total (m)
0	0.000	0	0.000	0	0.000	0	0.000
20	0.014	20	0.013	20	0.009	20	0.008
40	0.030	40	0.025	40	0.018	40	0.016
60	0.046	60	0.039	60	0.027	60	0.024
80	0.062	80	0.053	100	0.048	100	0.042
90	0.073	100	0.069	140	0.070	140	0.060
100	0.081	120	0.087	180	0.097	180	0.079
		130	0.097	200	0.112	200	0.088
		140	0.105	220	0.127	250	0.116
						280	0.134
						300	0.146

Nota. Fuente: Elaboración propia

Gráfica 45
Desplazamiento bajo Carga en la corona del talud para las diferentes separaciones entre muros



Nota. Fuente: Elaboración propia

Para el análisis del comportamiento bajo carga, se seleccionaron puntos de control ubicados en el talud a la altura de cada muro, en posiciones que permiten observar el impacto de la carga aplicada sobre los desplazamientos. Estos puntos se distribuyen de igual forma para las diferentes separaciones estudiadas (1.5 m, 3.0 m, 4.5 m, 6.0 m), permitiendo observar la evolución de los desplazamientos conforme se incrementa la carga.

Se tienen dos puntos por nivel de muro (inferior y superior), con un total de 6 puntos por condición de separación.

A la altura del Muro 1: M1-1 y M1-2.

A la altura del Muro 2: M2-1 y M2-2.

A la altura del Muro 3: M3-1 y M3-2.

Ejemplo de colocación de puntos a una distancia de 6m, cabe recalcar que para todas las separaciones se tuvo el mismo criterio de colocación de distribución de puntos de control

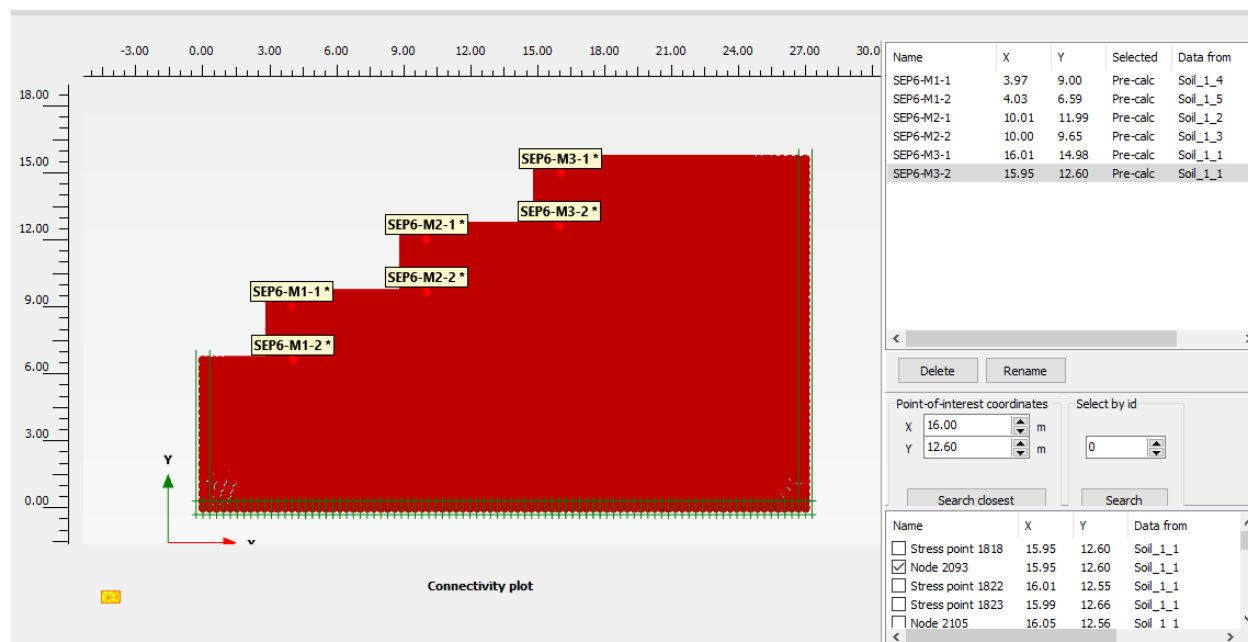


Figura 95. Colocación de puntos de control, aplicado a todas las separaciones

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

4.3.4.1. A 1.50m de separación

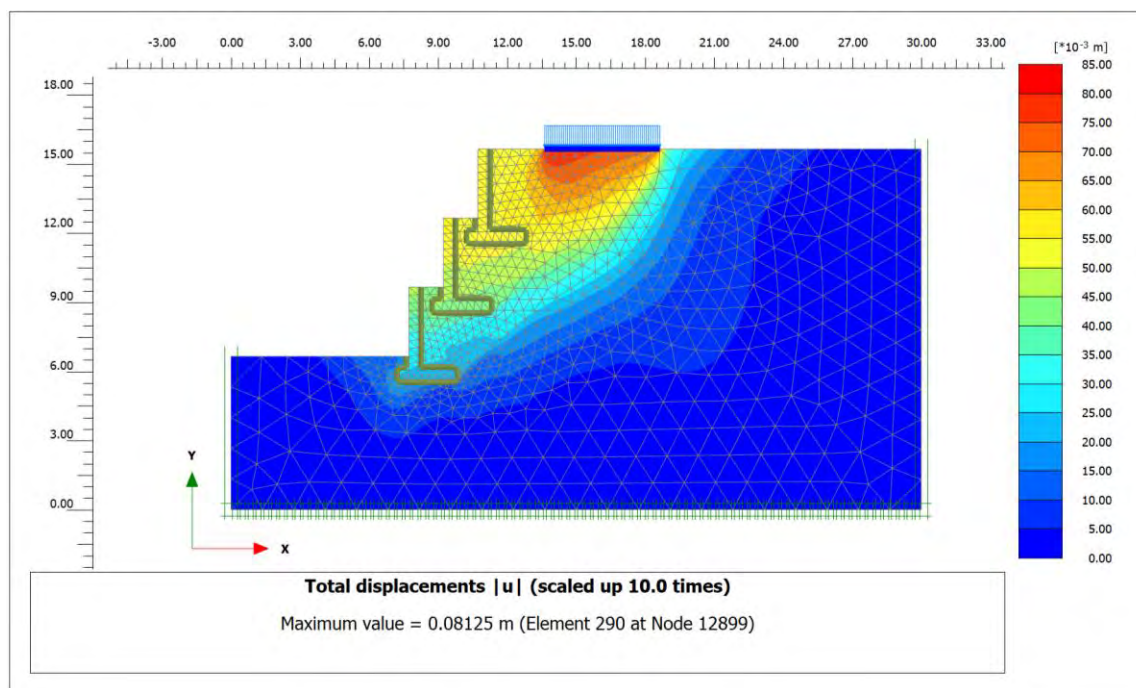
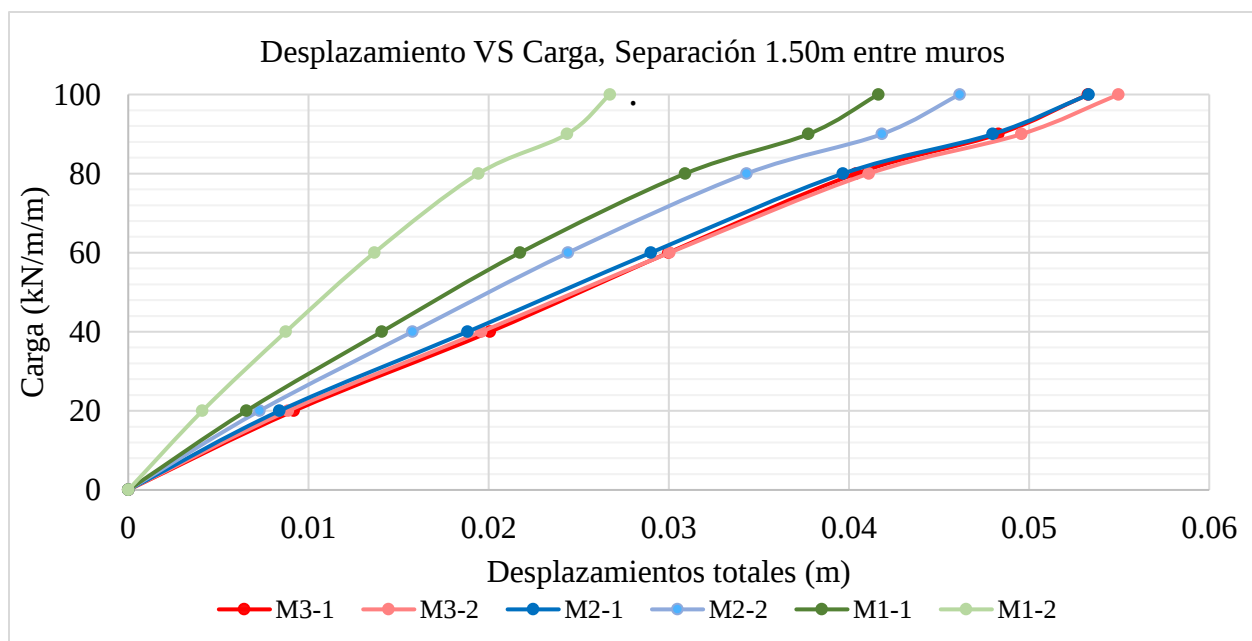


Figura 96. Desplazamientos ante carga máxima para 1.50 de separación.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Gráfica 46

Desplazamientos de puntos de control bajo carga para 1.50m de separación



Nota. Fuente: Elaboración propia

4.3.4.2. A 3.00m de separación

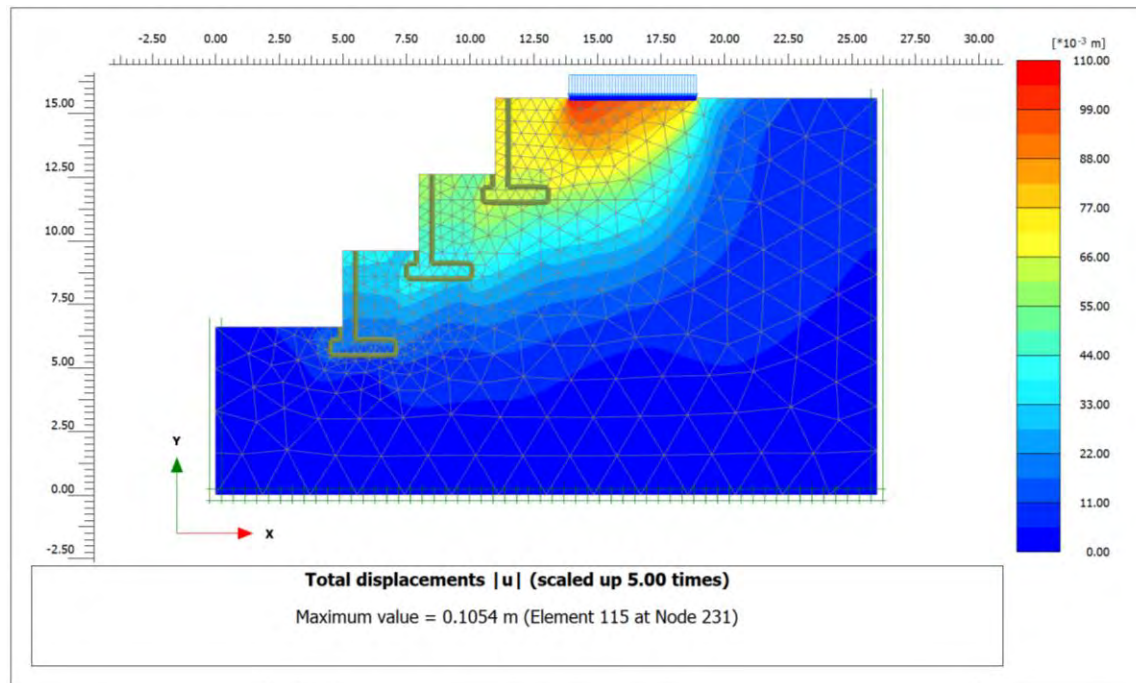
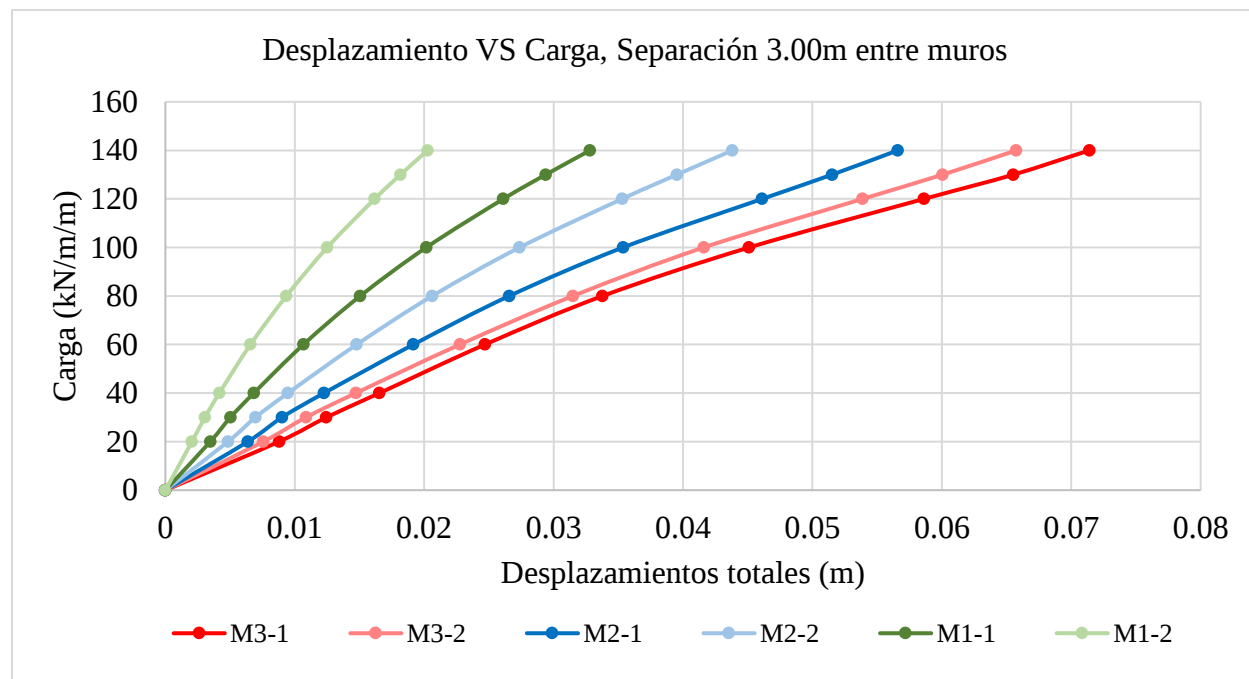


Figura 97. Desplazamientos ante carga máxima para 3.00m de separación.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Gráfica 47

Desplazamientos de puntos de control bajo carga para 3.00m de separación



Nota. Fuente: Elaboración propia

4.3.4.3. A 4.50m de separación

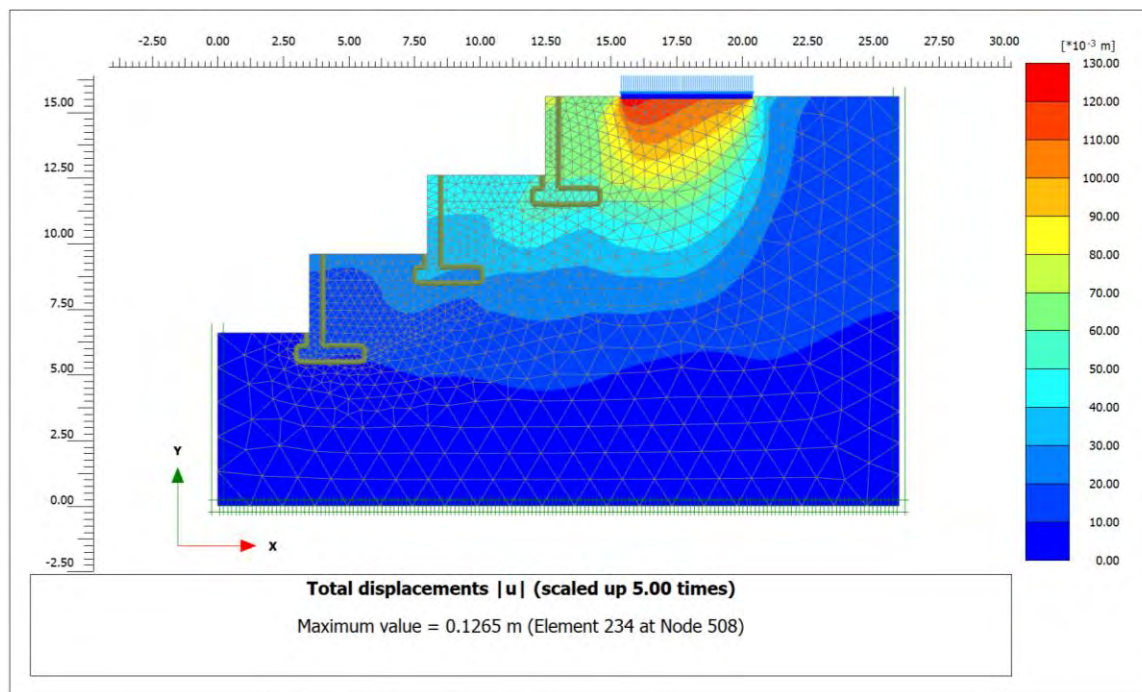
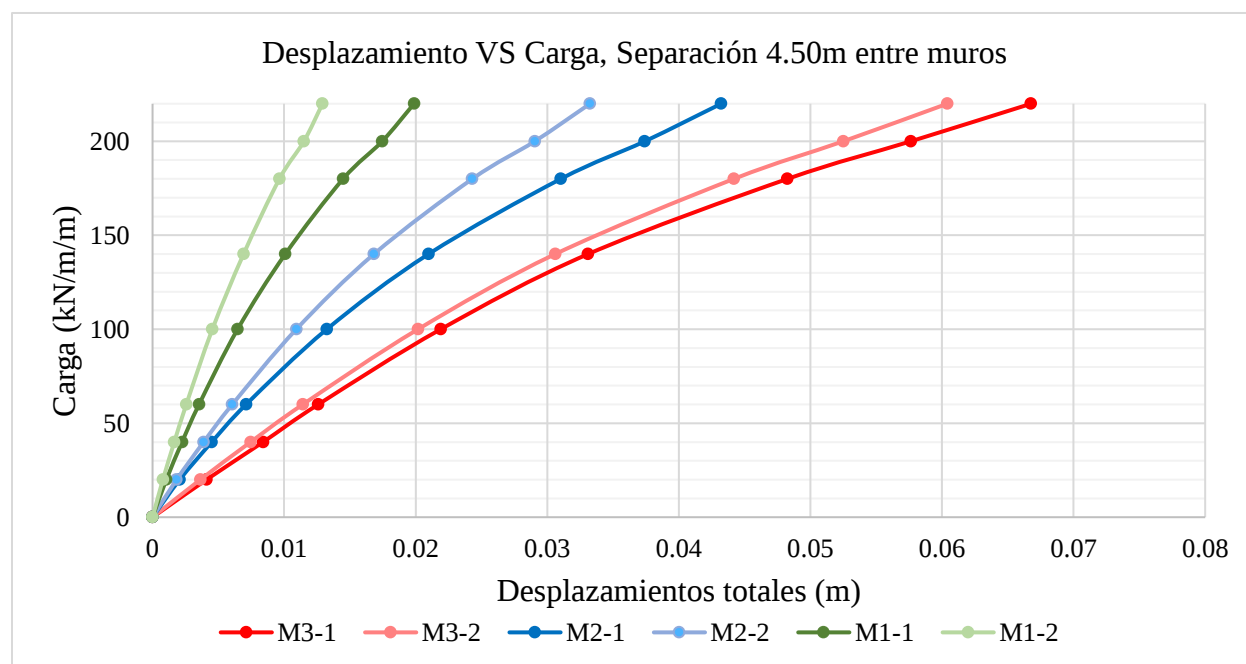


Figura 98. Desplazamientos ante carga máxima para 4.50m de separación.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Gráfica 48

Desplazamientos de puntos de control bajo carga para 4.50m de separación



Nota. Fuente: Elaboración propia

4.3.4.4. A 6.00m de separación

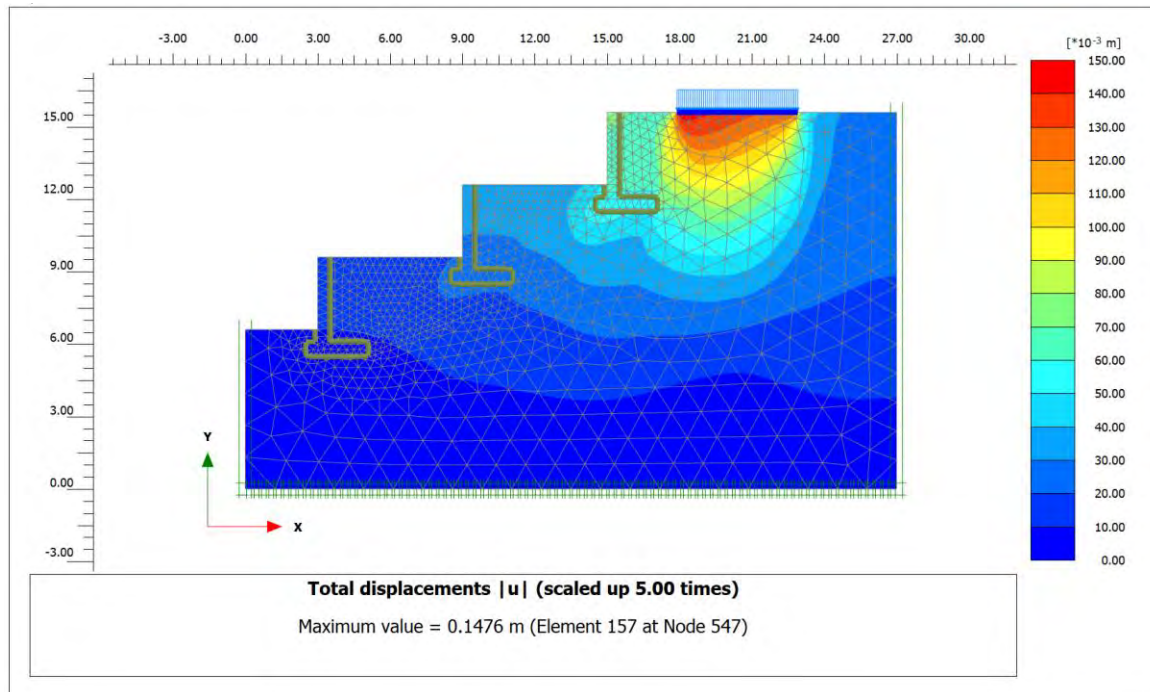
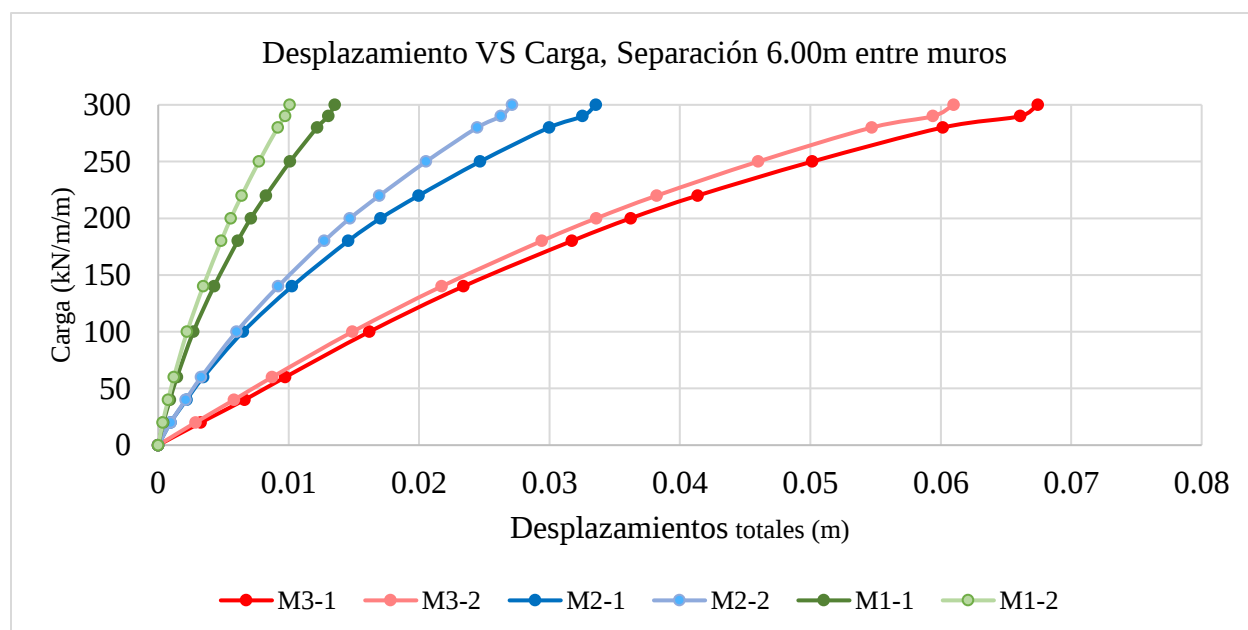


Figura 99. Desplazamientos ante carga máxima para 6.00m de separación.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Gráfica 49

Desplazamientos de puntos de control bajo carga para 6.00m de separación



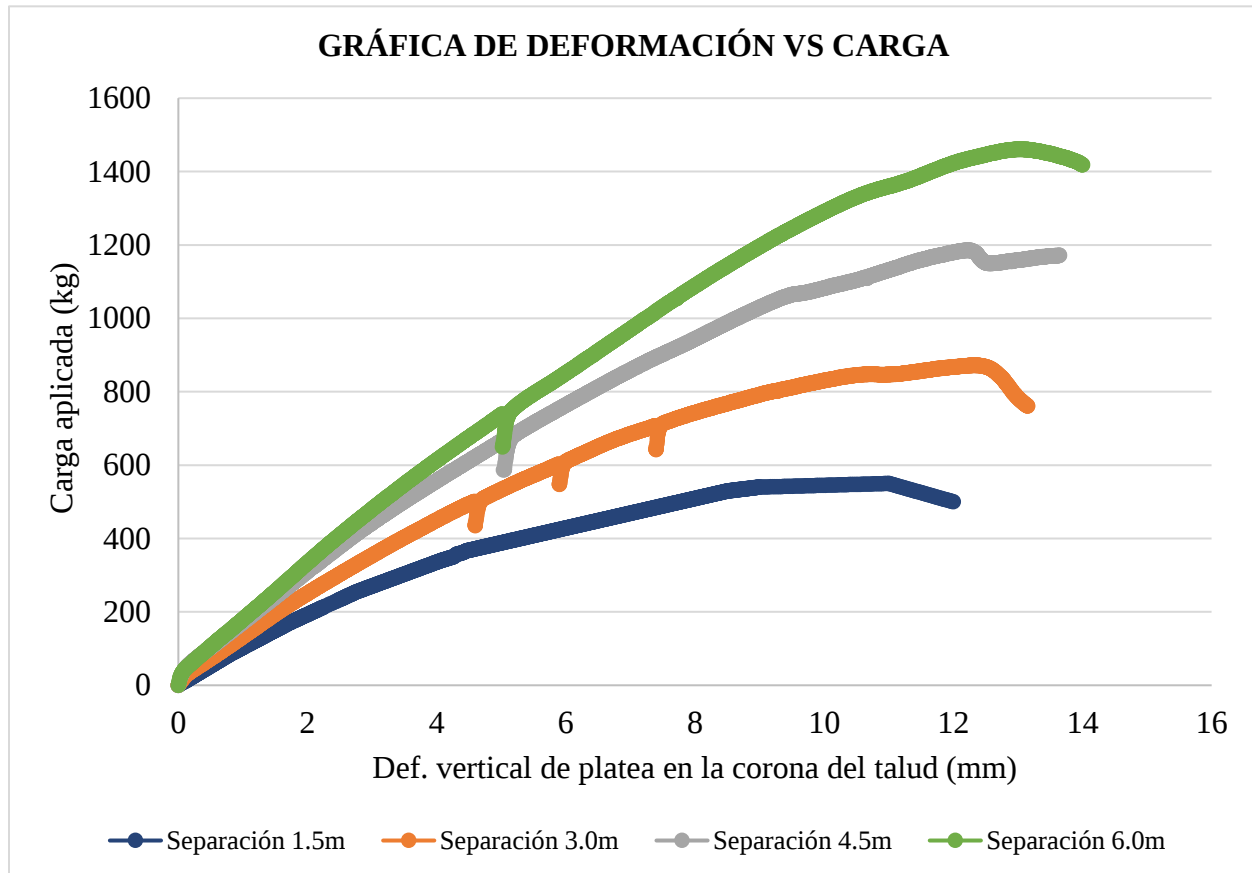
Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4. Resultados del modelo físico a escala reducida (Fase IV)

Se presentan los resultados de deformación vertical de la platea de carga por acción del equipo universal.

Gráfica 50

Deformación Vertical VS Carga, en la corona del talud por acción del equipo universal de compresión para las diferentes separaciones.



Nota. Fuente: Elaboración propia. Datos adaptados del equipo universal de compresión.

Se presenta los resultados del modelo físico a escala reducida para dos condiciones.

- La primera que es la **falla del experimento**, es decir, la falla que se alcanzó debido a la aplicación de carga utilizando el equipo universal.
- Una **falla forzada** para visualizar un mejor comportamiento y forma de falla.

4.4.1. A 1.50 metros de separación.

4.4.1.1. Falla del experimento.

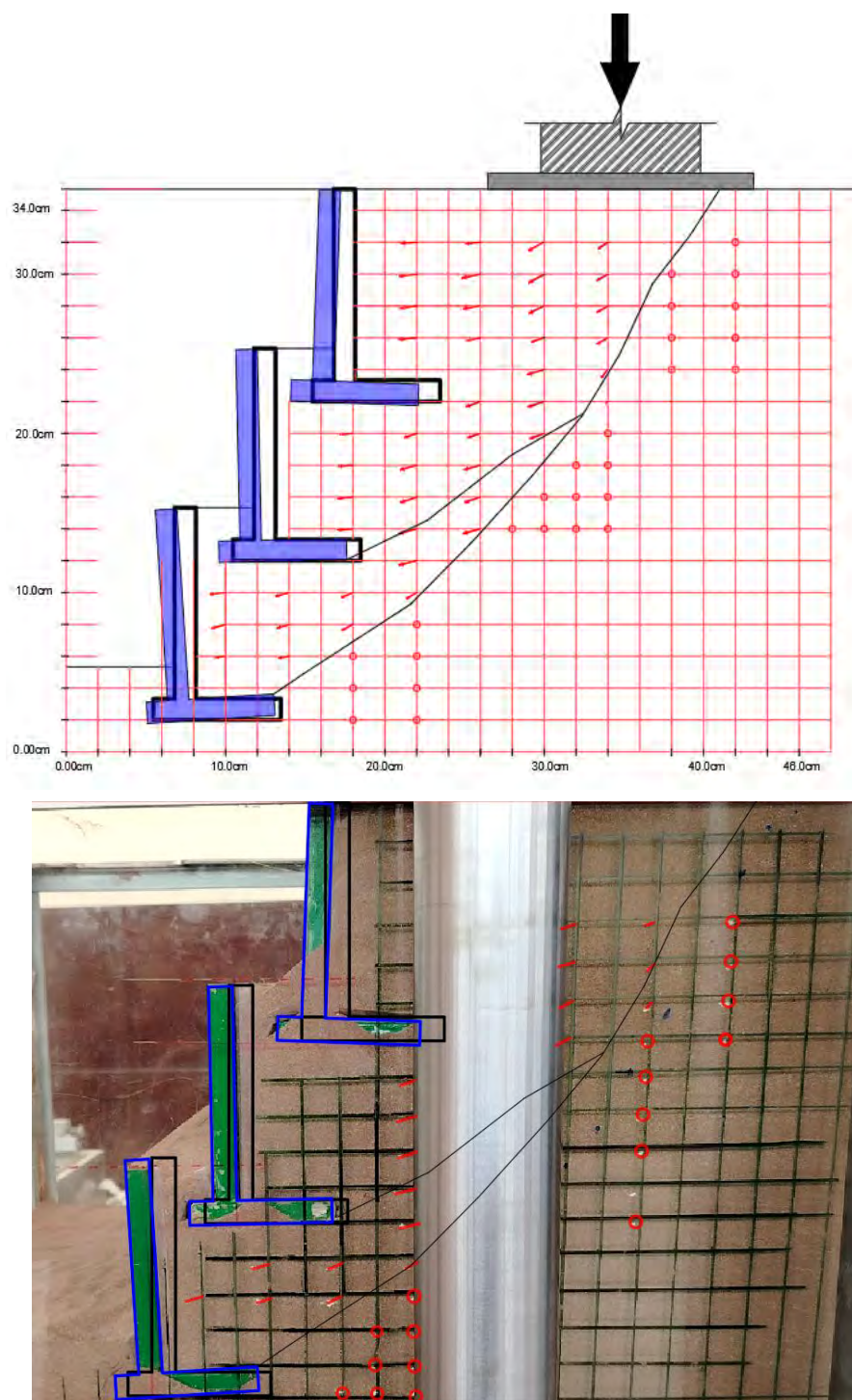


Figura 100. Desplazamientos del modelo a escala bajo aplicación de carga la corona del talud, separación de 1.50m, falla del experimento.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4.1.2. Falla forzada

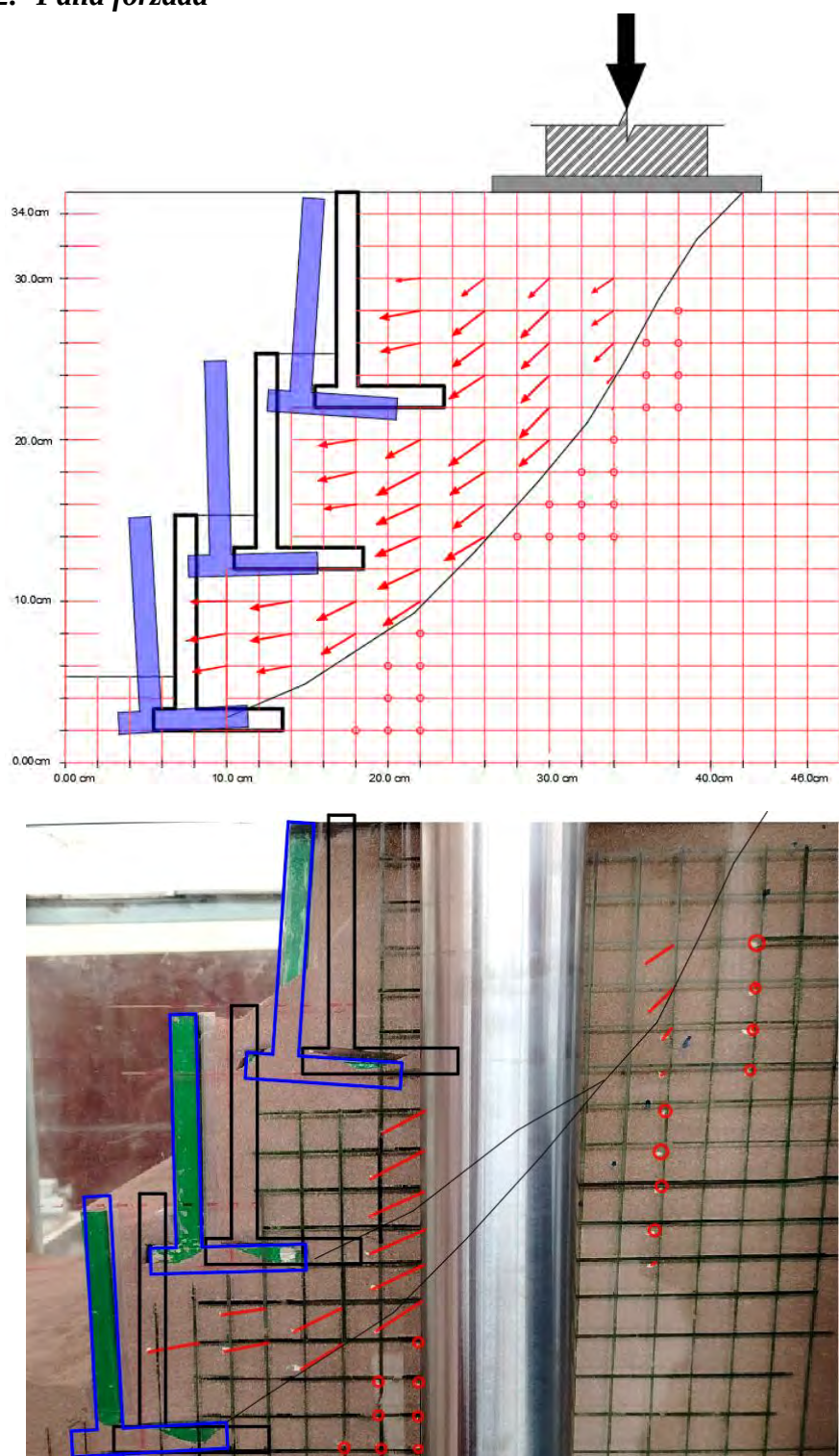


Figura 101. Desplazamientos del modelo a escala con carga aplicada en la corona del talud, separación de 1.50m, falla forzada.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2. A 3.00 metros de separación.

4.4.2.1. Falla del experimento.

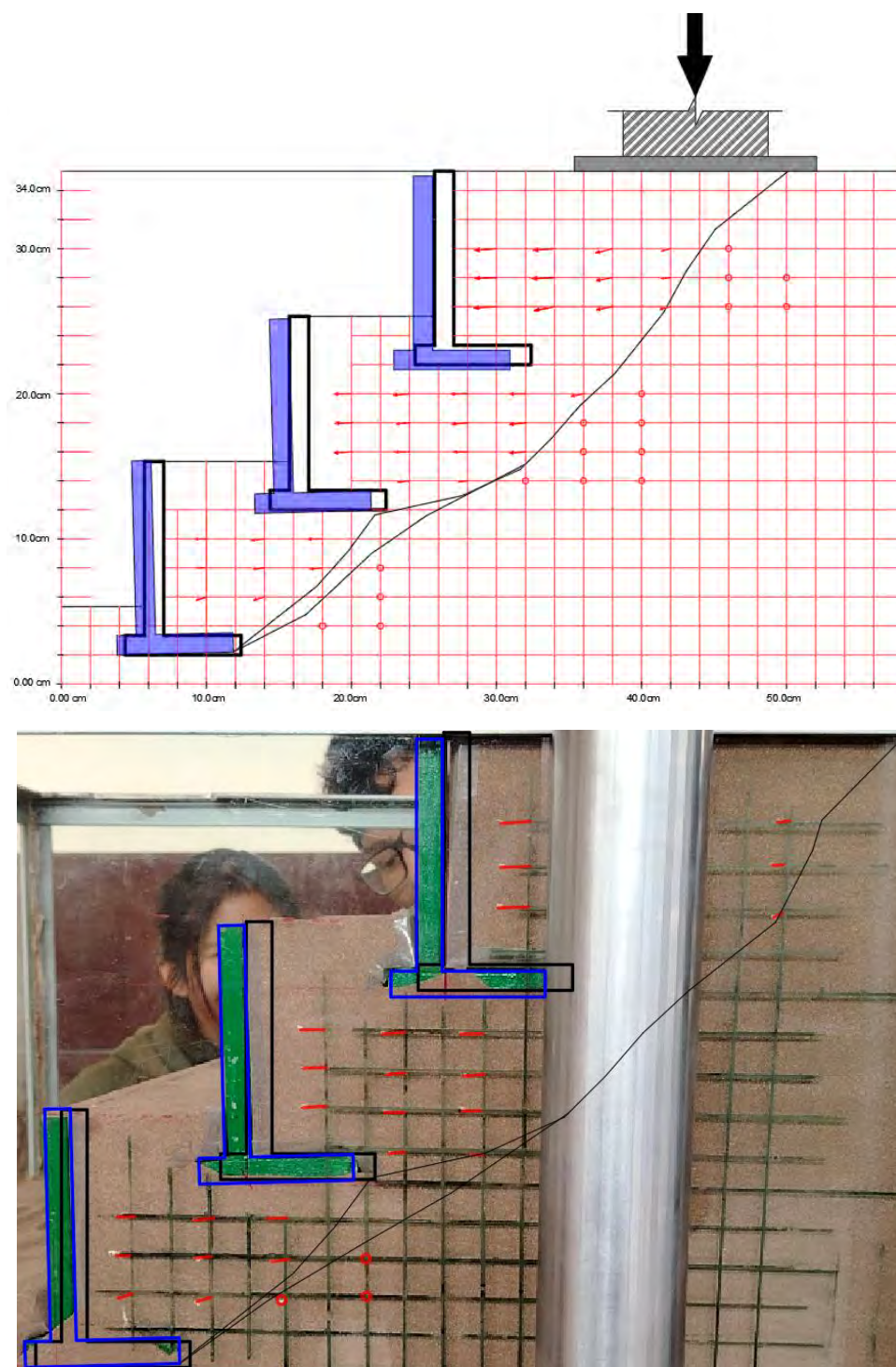


Figura 102. Desplazamientos del modelo a escala con carga aplicada en la corona del talud, separación de 3.00m, falla del experimento.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.2. Falla forzada.

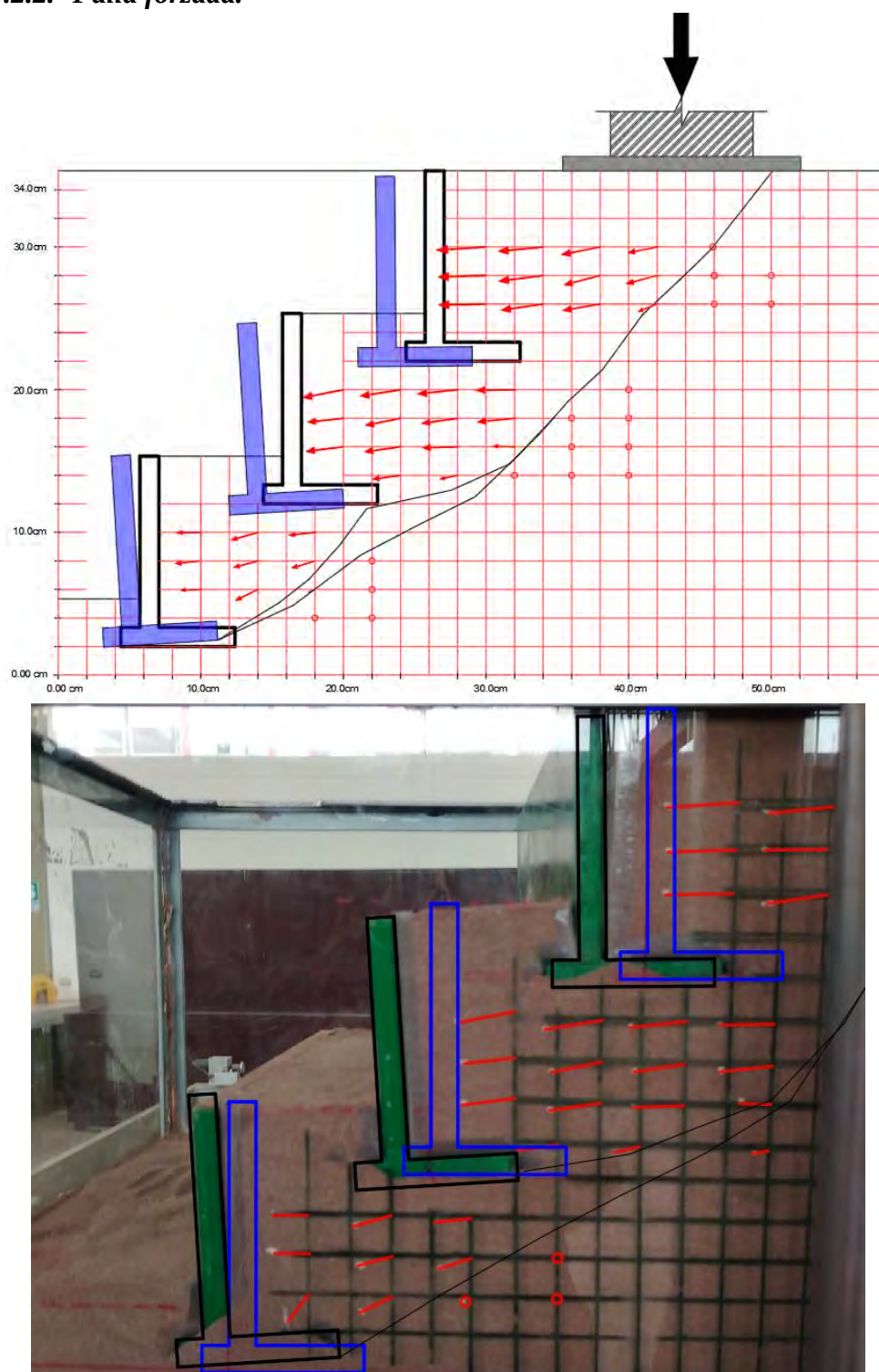


Figura 103. Desplazamientos del modelo a escala con carga aplicada en la corona del talud, separación de 3.00m, falla forzada.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4.3. A 4.50 metros de separación.

4.4.3.1. Falla del experimento.

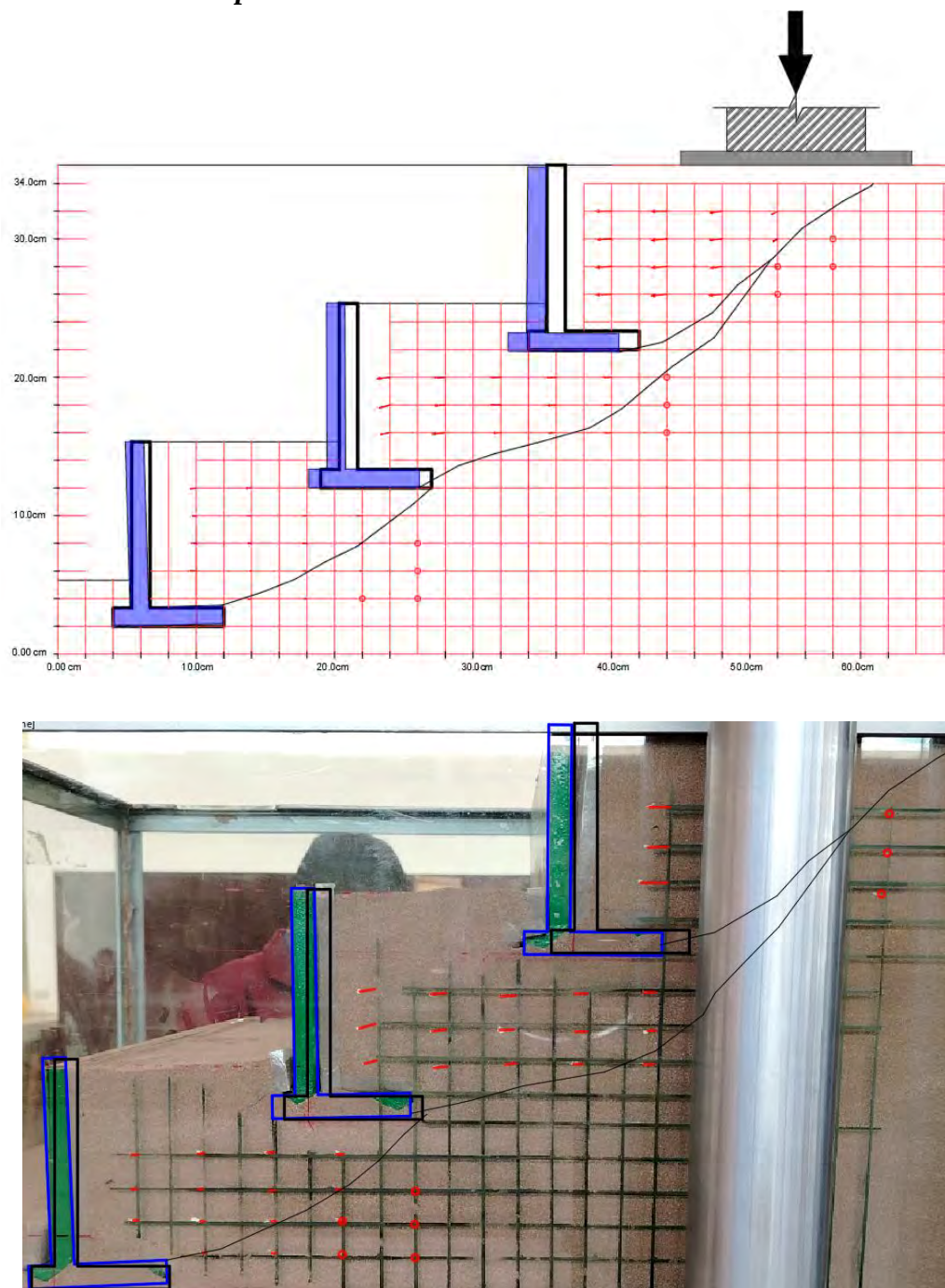


Figura 104. Desplazamientos del modelo a escala con carga aplicada en la corona del talud, separación de 4.50m, falla del experimento.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4.3.2. Falla forzada.

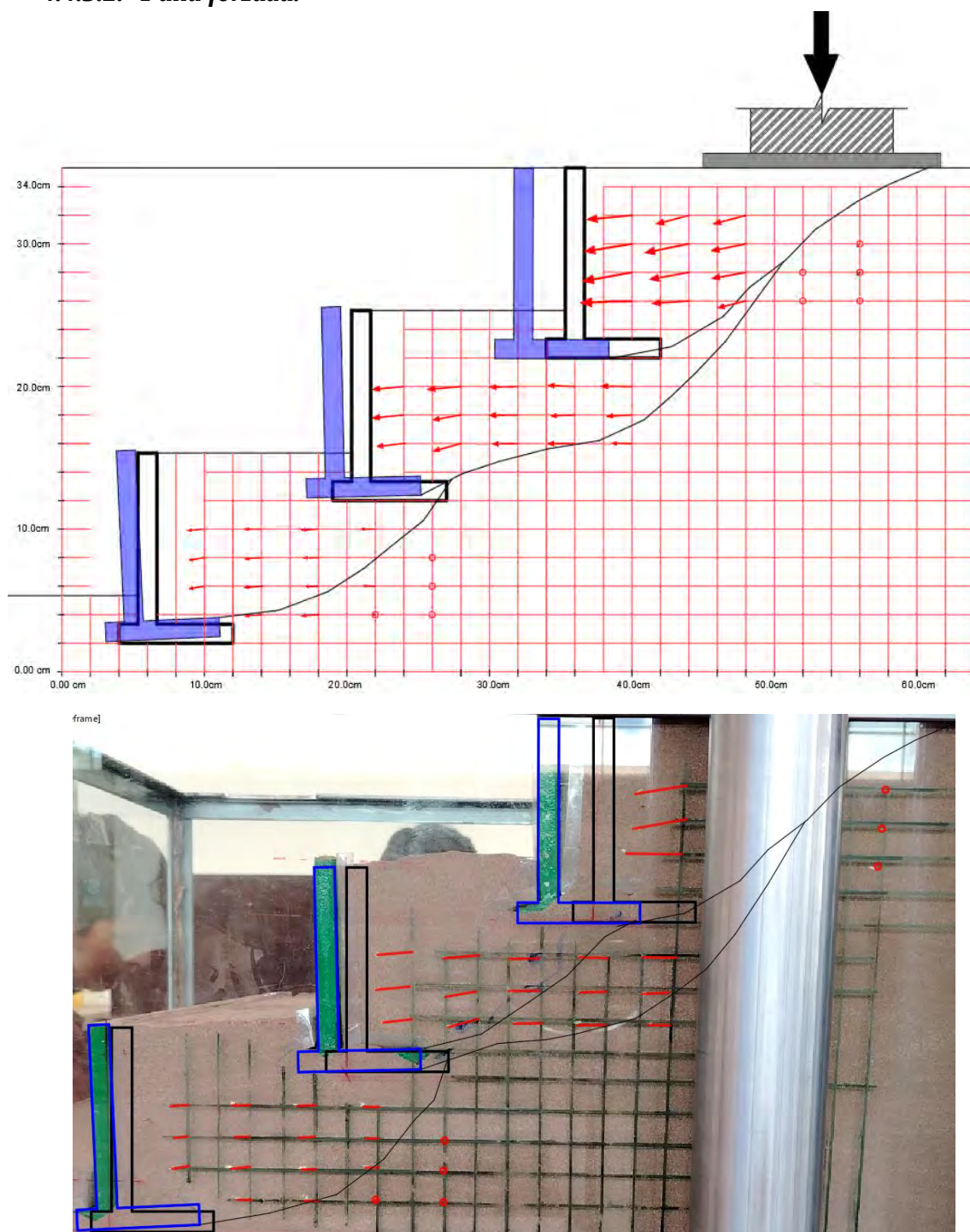


Figura 105. Desplazamientos del modelo a escala con carga aplicada en la corona del talud, separación de 4.50m, falla forzada.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.4.4. A 6.00 metros de separación.

4.4.4.1. Falla del experimento.

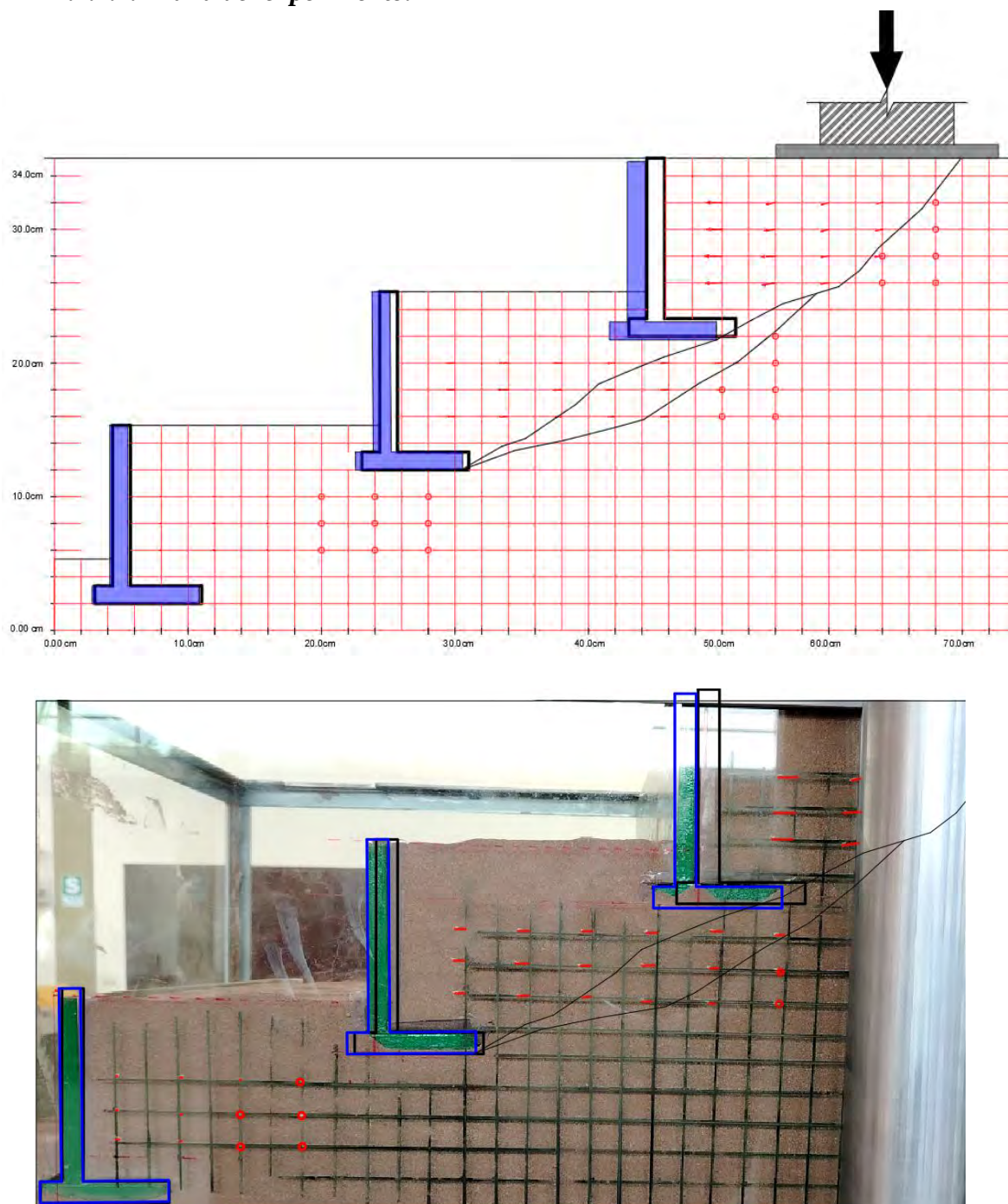


Figura 106. Desplazamientos del modelo a escala con carga aplicada en la corona del talud, separación de 6.00m, falla forzada.

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Se presenta los resultados del modelo físico a escala reducida en comparación con el modelo numérico también a escala reducida.

4.5. Resultados de modelo numérico a escala reducida.

Tabla 67

Desplazamiento bajo Carga en la corona del talud para las diferentes separaciones del modelo numérico a escala reducida.

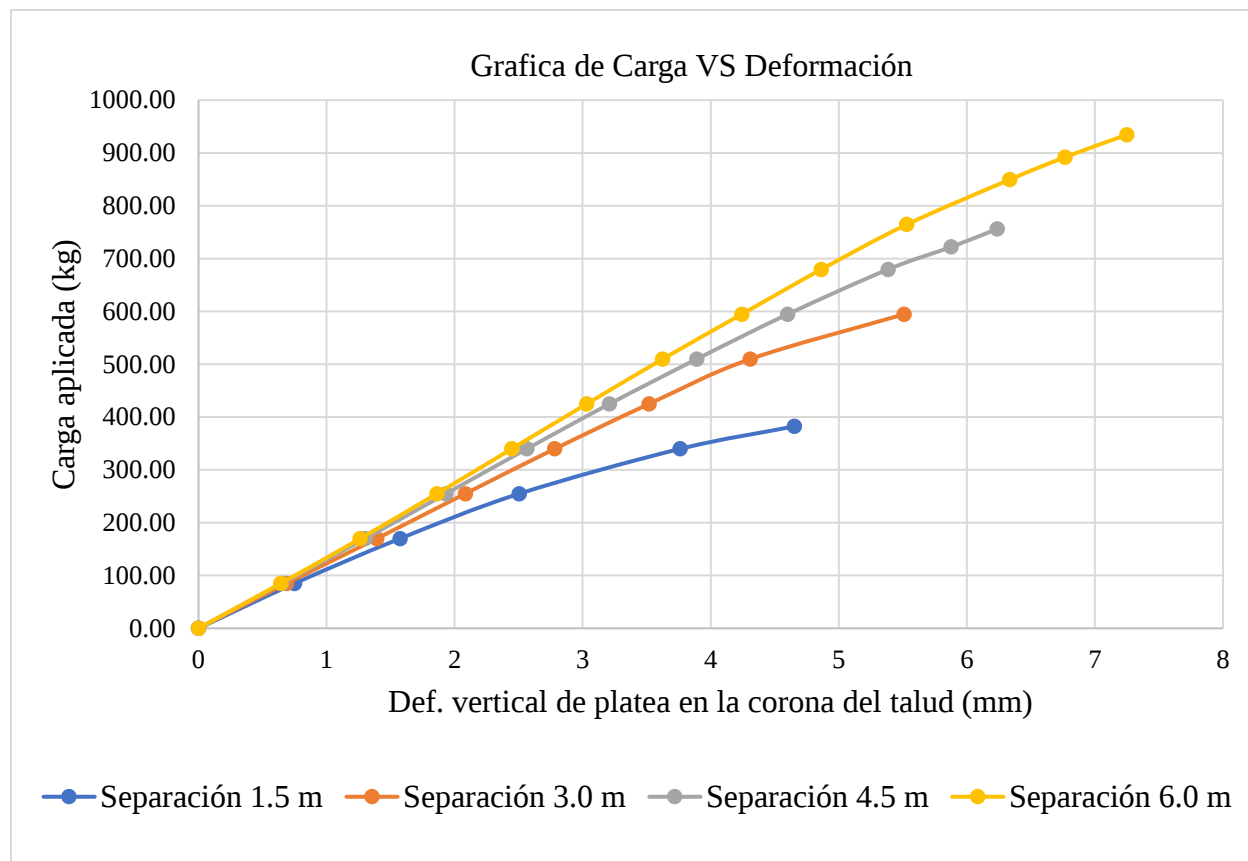
Separación 1.50m				Separación 3.00m			
Carga kN/m ²	Carga Kg	Deformación (mm)		Carga kN/m ²	Carga Kg	Deformación (mm)	
		Total (U)	Vertical (Uz)			Total (U)	Vertical (Uz)
0.00	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.000	0.000
20.00	84.95	0.764	0.750	20.00	84.95	0.692	0.687
40.00	169.89	1.619	1.574	40.00	169.89	1.411	1.392
60.00	254.84	2.611	2.505	60.00	254.84	2.122	2.083
80.00	339.79	4.005	3.762	80.00	339.79	2.850	2.782
90.00	382.26	5.028	4.652	100.00	424.74	3.625	3.518
				120.00	509.68	4.472	4.308
				143.00	607.37	5.893	5.582

Separación 4.50m				Separación 6.00m			
Carga kN/m ²	Carga Kg	Deformación (mm)		Carga kN/m ²	Carga Kg	Deformación (mm)	
		Total (U)	Vertical (Uz)			Total (U)	Vertical (Uz)
0.00	0.00	0.000	0.000	0.00	0.00	0.000	0.000
20.00	84.95	0.655	0.653	20.00	84.95	0.643	0.642
40.00	169.89	1.309	1.301	40.00	169.89	1.269	1.263
60.00	254.84	1.954	1.933	60.00	254.84	1.875	1.862
80.00	339.79	2.604	2.564	80.00	339.79	2.471	2.446
100.00	424.74	3.275	3.209	100.00	424.74	3.072	3.031
120.00	509.68	3.993	3.890	120.00	509.68	3.688	3.624
140.00	594.63	4.751	4.601	140.00	594.63	4.337	4.242
160.00	679.58	5.599	5.385	160.00	679.58	4.997	4.864
170.00	722.05	6.143	5.878	180.00	764.53	5.714	5.531
178.00	756.03	6.540	6.236	200.00	849.47	6.597	6.335
				210.00	891.95	7.076	6.766
				220.00	934.42	7.619	7.249

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 51

Deformación VS carga, en la corona del talud para las diferentes separaciones.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

4.5.1. A 1.50 metros de separación.

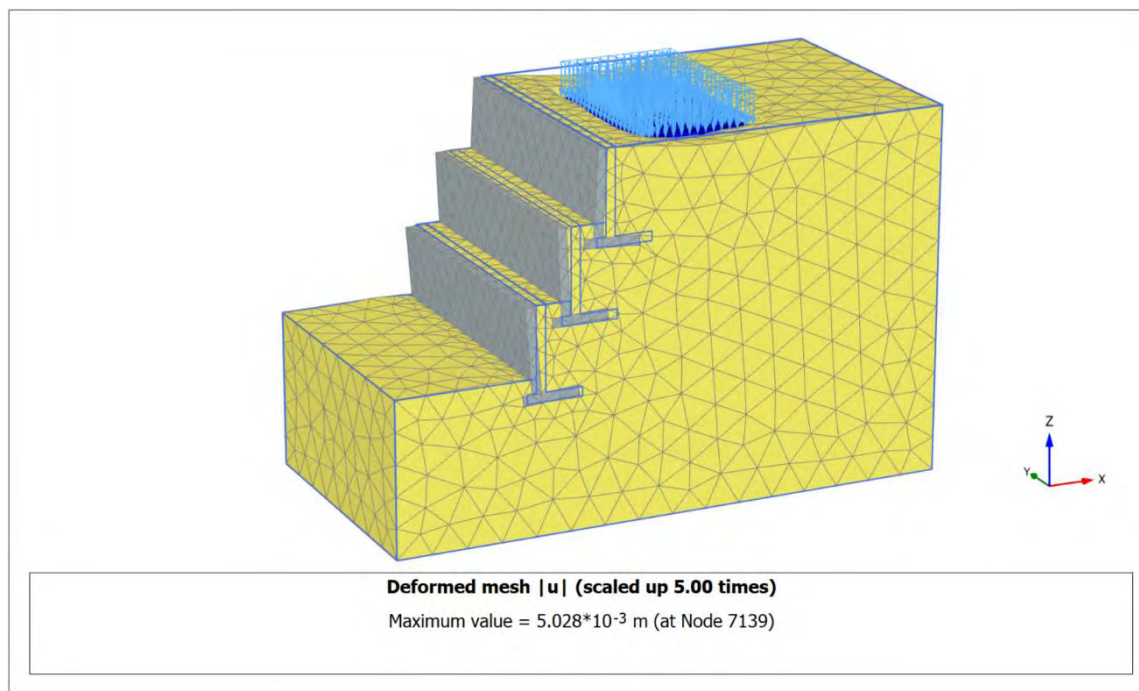


Figura 107. Deformación de malla del modelo numérico a ESCALA a 1.50 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

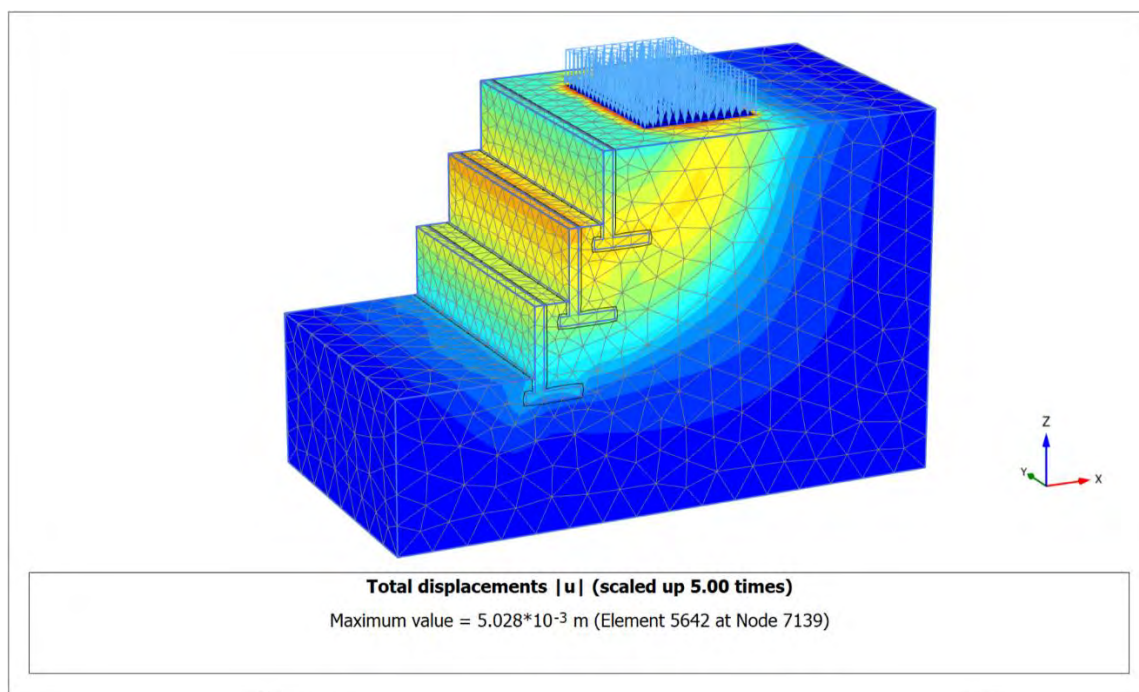


Figura 108. Deformación total del modelo numérico a ESCALA por acción de carga a 1.50 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

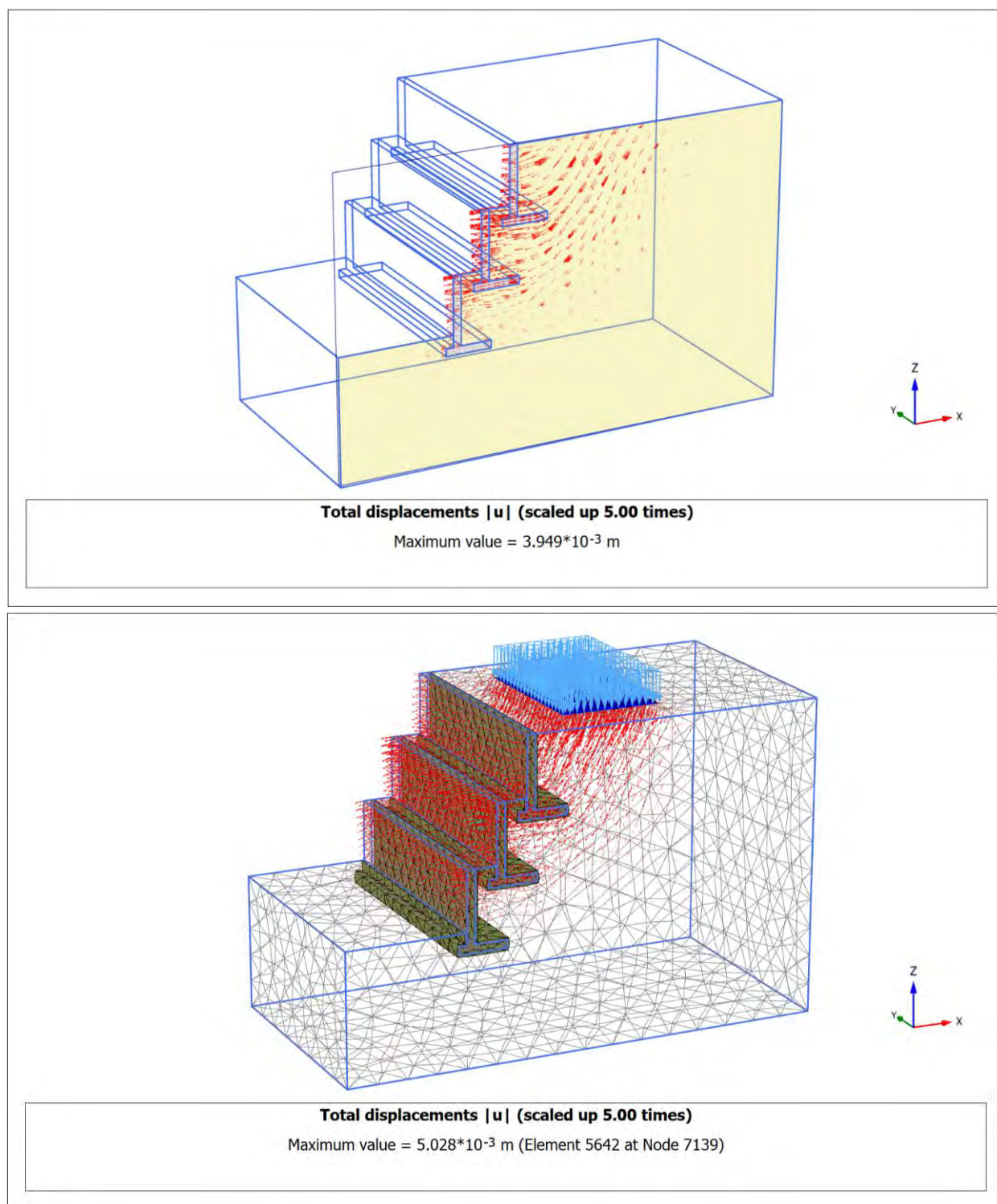


Figura 109. Flechas de desplazamiento total del modelo numérico a ESCALA a 1.50 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

4.5.2. A 3.00 metros de separación.

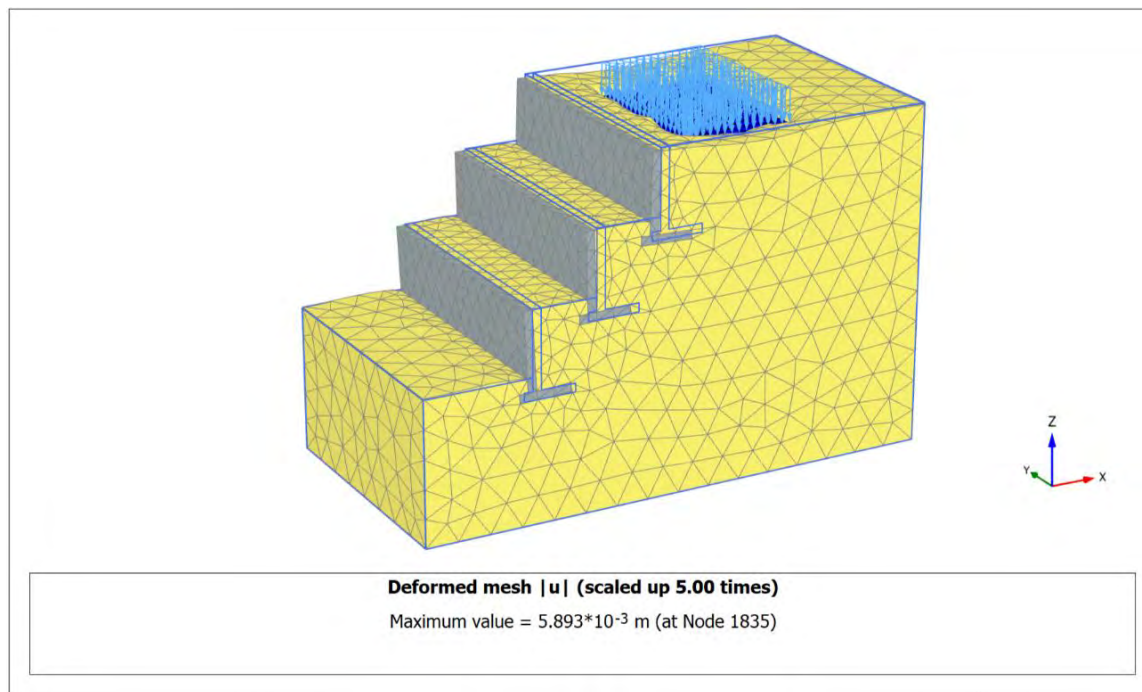


Figura 110. Deformación de malla del modelo numérico a ESCALA a 3.00 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

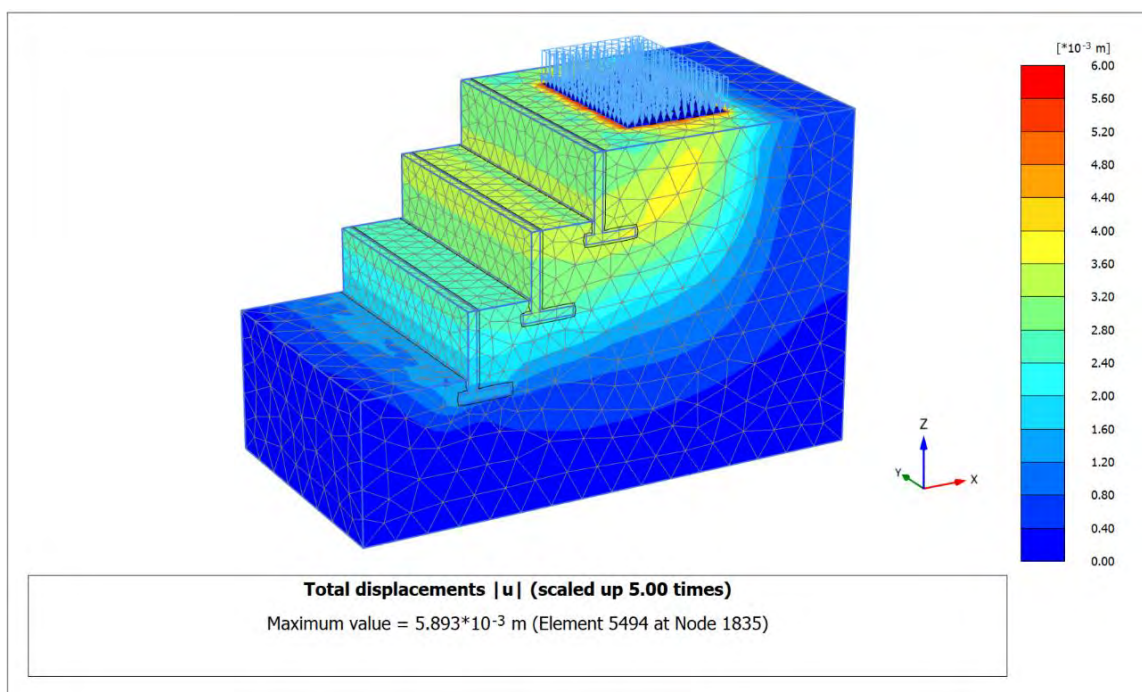


Figura 111. Deformación total del modelo numérico a ESCALA por acción de carga a 3.0 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

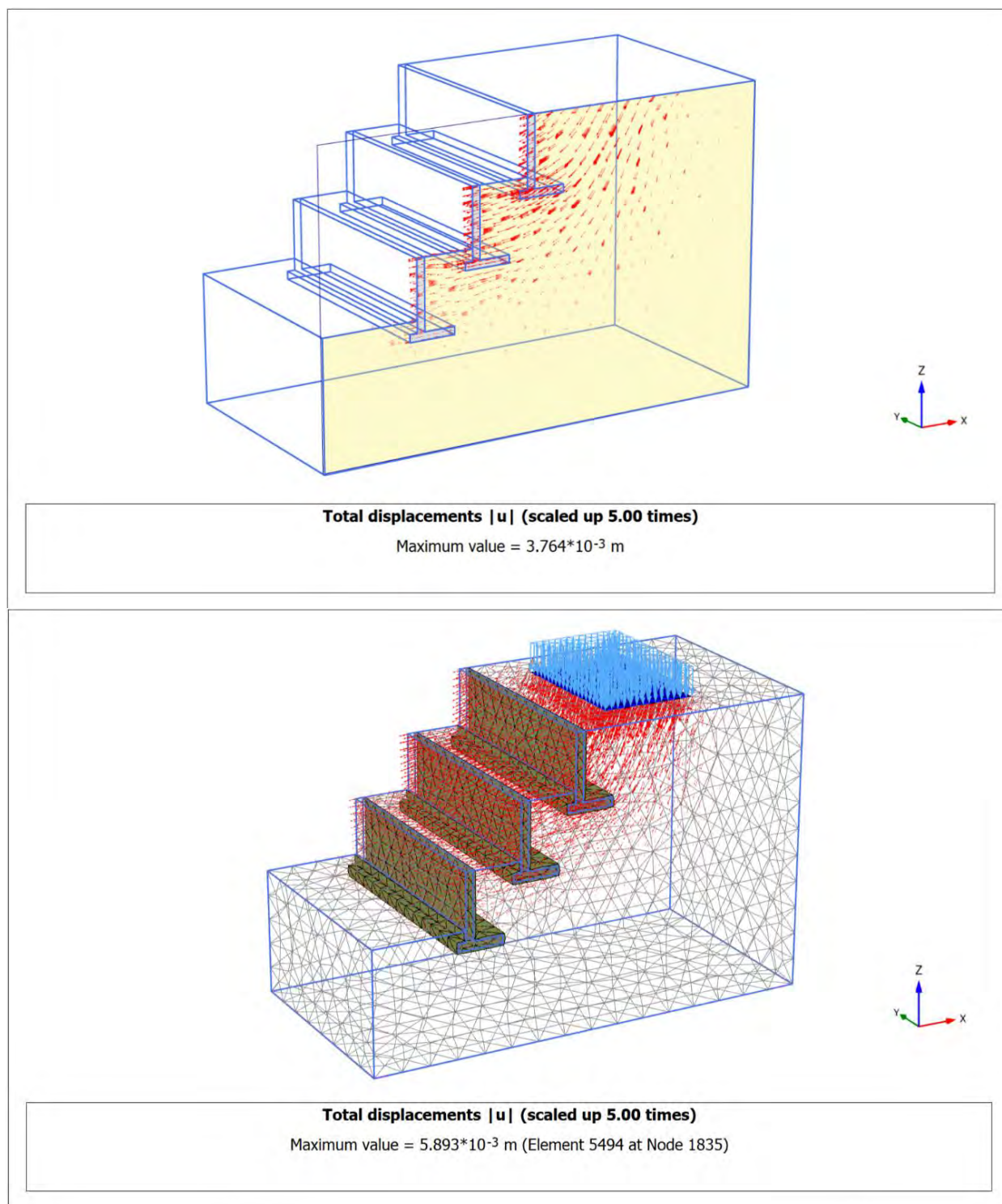


Figura 112. Flechas de desplazamiento total del modelo numérico a ESCALA a 3.00 m.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

4.5.3. A 4.50 metros de separación.

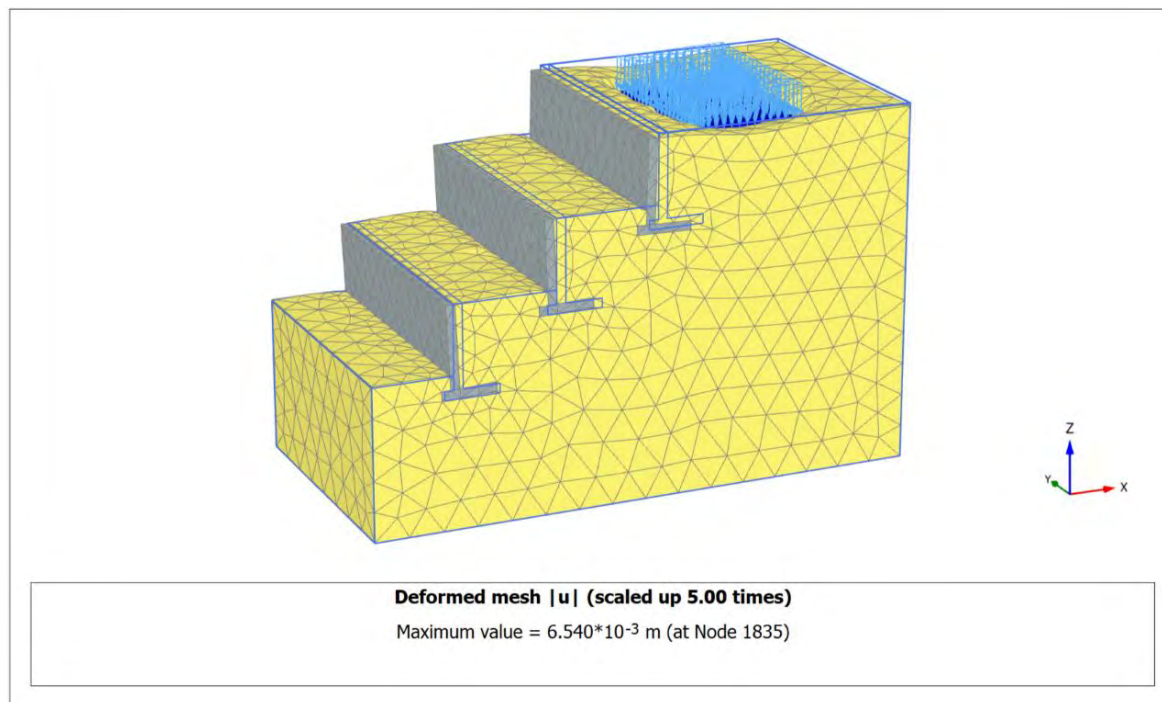


Figura 113. Deformación de malla del modelo numérico a ESCALA a 4.50 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

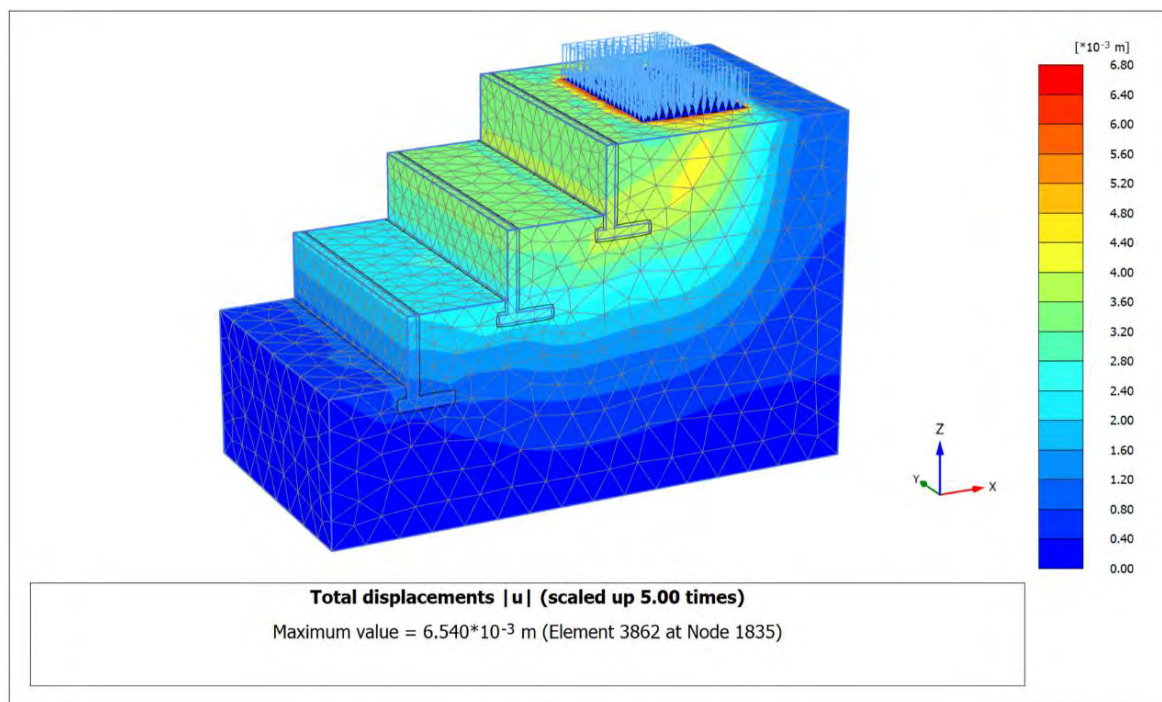


Figura 114. Deformación total del modelo numérico a ESCALA por acción de carga a 4.50 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

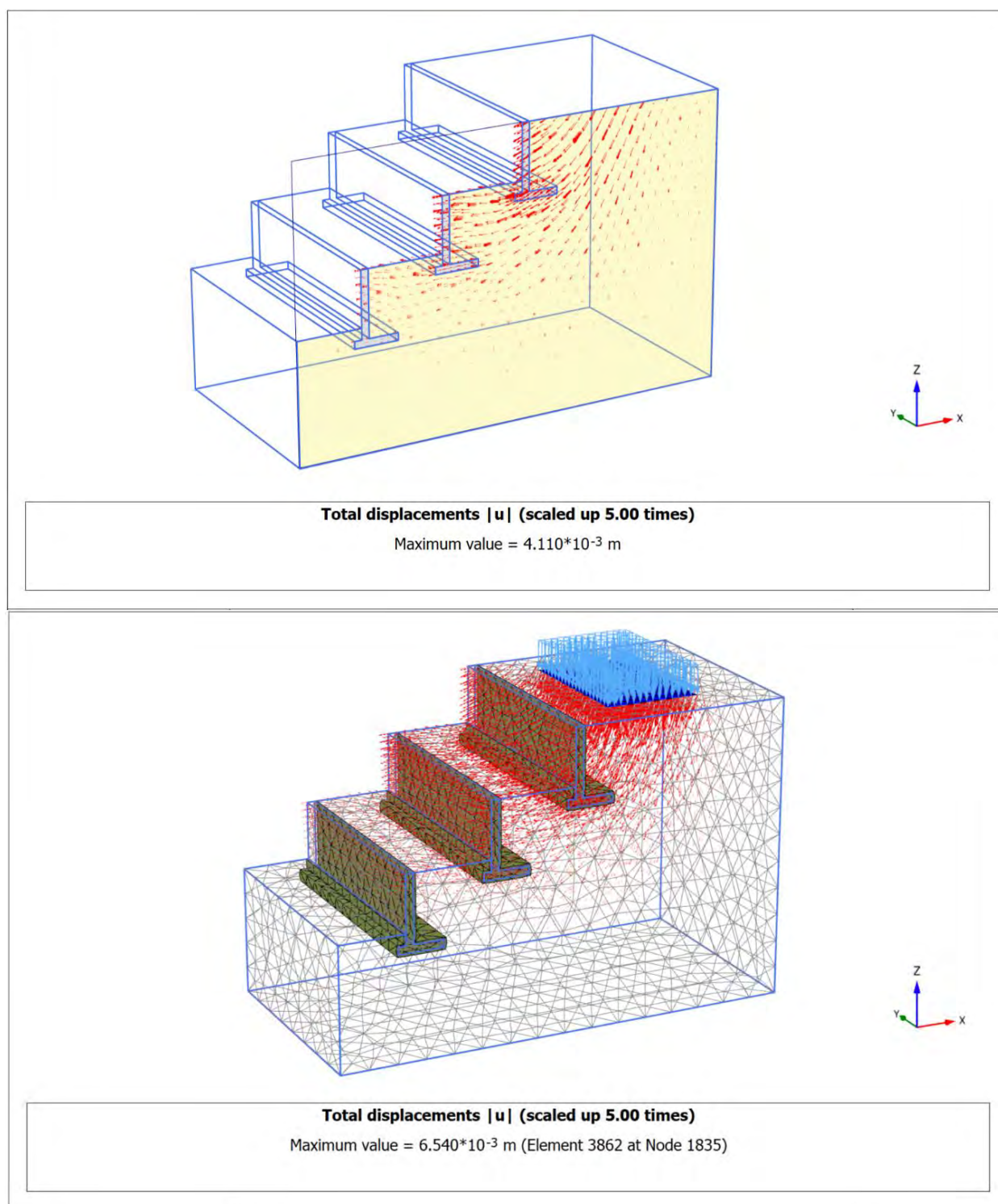


Figura 115. Flechas de desplazamiento total del modelo numérico a ESCALA a 4.50 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

4.5.4. A 6.00 metros de separación.

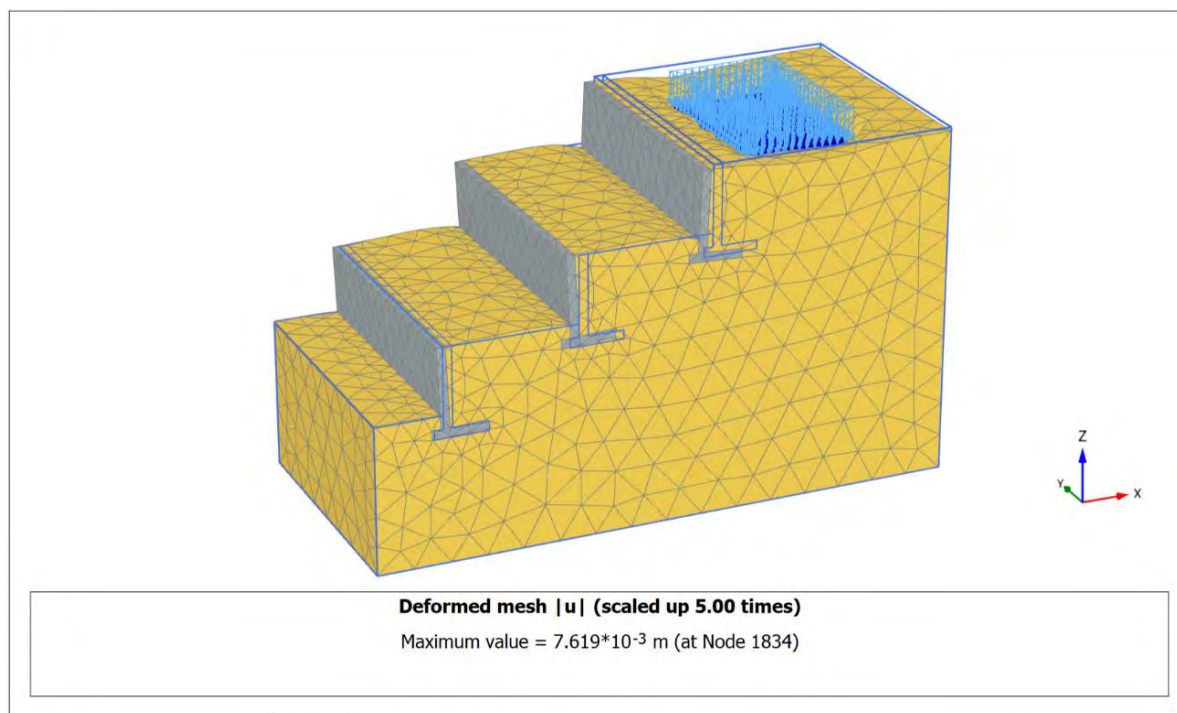


Figura 116. Deformación de malla del modelo numérico a ESCALA a 6.00 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

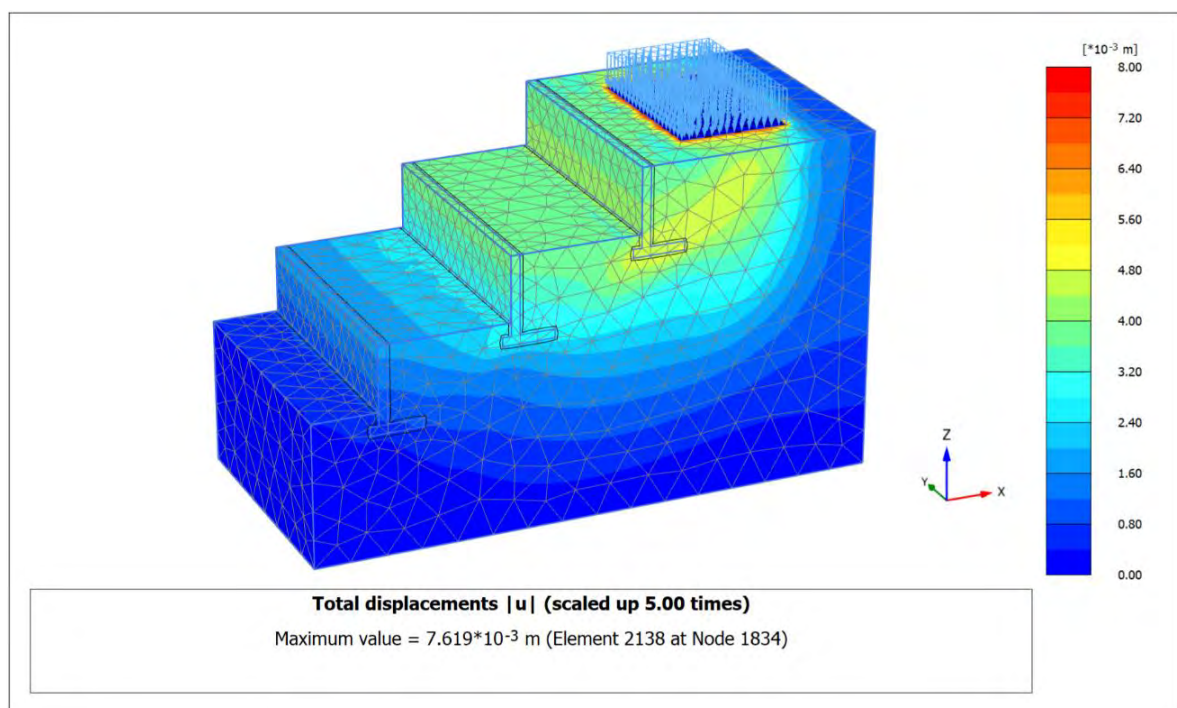


Figura 117. Deformación total del modelo numérico a ESCALA por acción de carga a 6.0 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

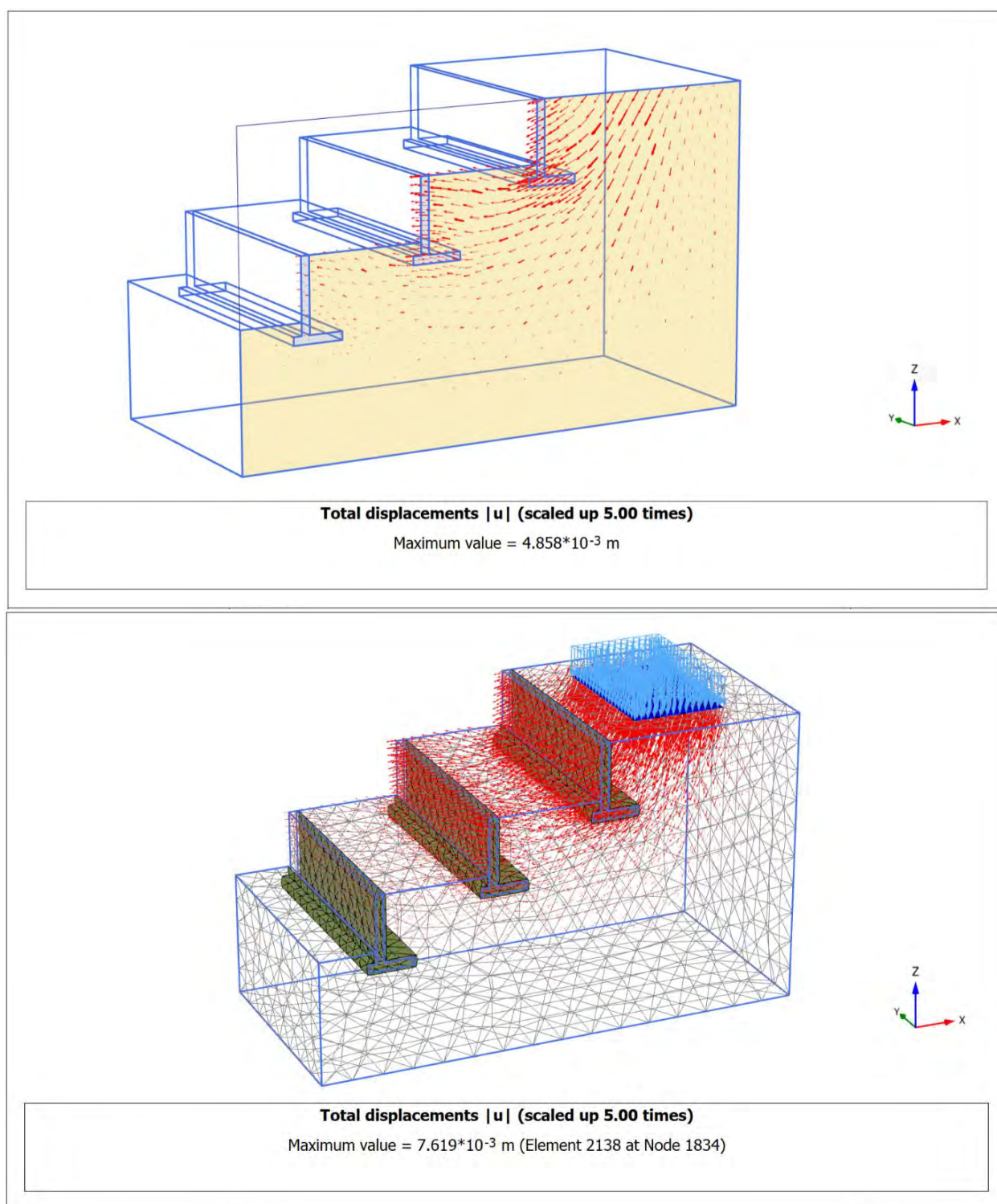


Figura 118. Flechas de desplazamiento total del modelo numérico a ESCALA a 6.00 m. de sep. entre muros.

Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 3D

5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.

5.1. Descripción de los hallazgos más relevantes y significativos.

5.1.1. Respecto al modelo prototipo.

5.1.1.1. *Análisis de esfuerzos internos.*

Uno de los aspectos más determinantes en la comprensión del comportamiento del sistema muro–talud fue el análisis de los esfuerzos internos (momentos flectores, esfuerzos cortantes y axiales) generados en las pantallas y zapatas de los muros escalonados. Estos esfuerzos no solo reflejan las exigencias mecánicas que enfrenta cada elemento estructural, sino que también permiten identificar de manera precisa el grado de interacción entre los distintos muros conforme se modifica su separación.

Con una separación mínima de **1.5 m**, las simulaciones demuestran una fuerte dependencia estructural. El muro inferior (Muro 1) soporta una sobrecarga masiva del sistema superior, registrando un momento flector máximo en la pantalla de **189.80 kN m/m**. Esta interacción es evidente en la gran disparidad de esfuerzos, donde el Muro 1 soporta una carga desproporcionada en comparación con el Muro 3 (33.36 kN.m/m).

A medida que la separación aumenta (3.0 m y 4.5 m), se observa una redistribución progresiva de los esfuerzos. El punto de inflexión ocurre a los **6.0 m**, donde los momentos flectores en las pantallas de los tres muros convergen y se estabilizan en valores muy similares: 46.17 kN·m/m (Muro 1), 40.60 kN·m/m (Muro 2) y 40.55 kN·m/m (Muro 3). Este estado de equilibrio representa una **reducción de casi el 76%** en el momento máximo del sistema en comparación con la separación de 1.5 m.

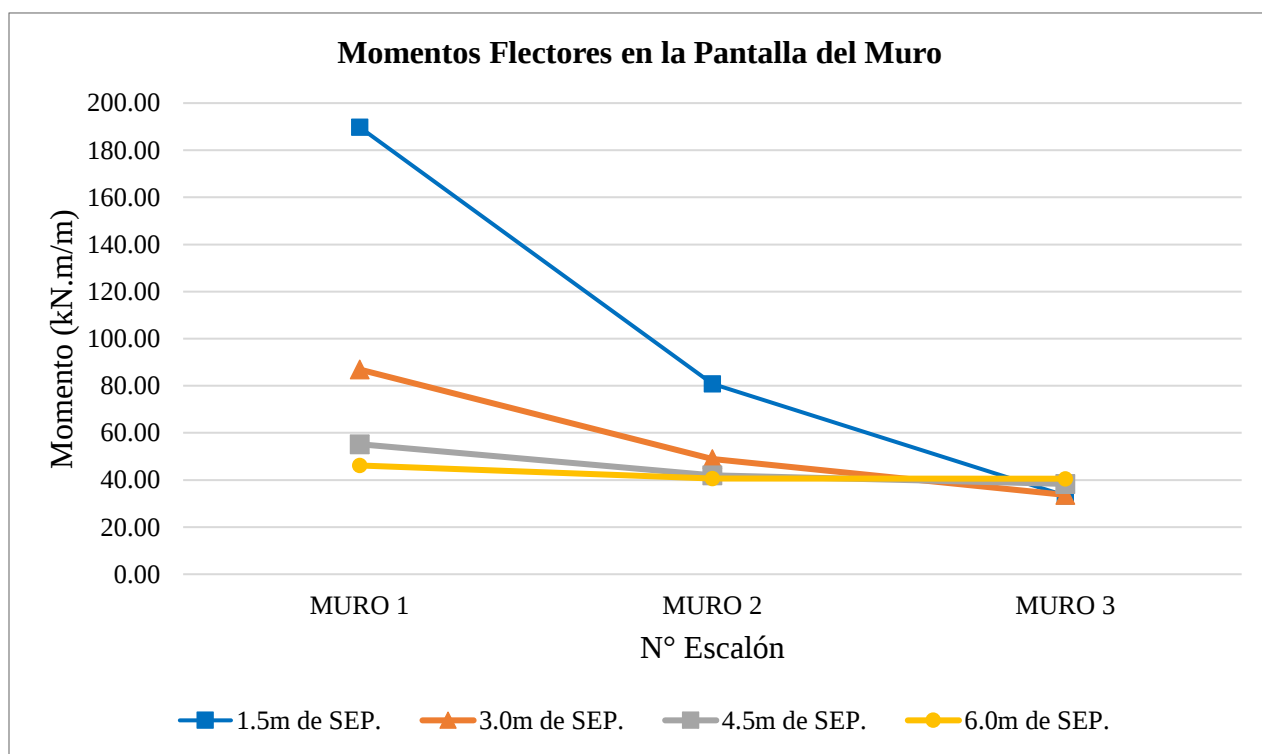
Dado que un análisis a 7.0 m no mostró una variación significativa, se concluye que 6.0 m es la separación óptima. A esta distancia, la interacción por sobrecarga se vuelve despreciable

y cada muro responde de forma autónoma. Este hallazgo es crucial, pues permite un diseño más predecible y seguro, optimizando la estabilidad global del sistema al garantizar que los muros no se afecten negativamente entre sí.

Para ilustrar la respuesta estructural del sistema, el análisis se centrará en los momentos flectores generados en la pantalla, ya que son los más representativos del comportamiento observado. Si bien se realizó un análisis completo que incluyó fuerzas cortantes y axiales, todos los esfuerzos internos exhibieron un patrón de comportamiento idéntico: una clara estabilización al alcanzar la separación óptima. Por lo tanto, las conclusiones derivadas de los momentos en la pantalla son extensivas y representativas del comportamiento mecánico global del sistema, y este enfoque evita la presentación de datos redundantes.

Gráfica 52

Momentos flectores máximos en Pantalla de muros para diferentes separaciones.



Nota. Fuente: Elaboración propia.

La gráfica revela una disparidad de momentos en el muro superior. El análisis del muro superior (Muro 3) reveló un comportamiento crítico y opuesto al de los muros inferiores. Mientras los esfuerzos en Muro 1 y Muro 2 disminuían con la distancia, el momento flector en la pantalla del Muro 3 aumentó progresivamente, pasando de $33.36 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$ a una separación de 1.5 m, hasta estabilizarse en $40.55 \text{ kN}\cdot\text{m/m}$ a los 6.0 m.

Este fenómeno se explica por la **transferencia de carga** en sistemas con alta interacción. Con una separación reducida (1.5 m), el sistema de muros actúa de forma semi-monolítica, permitiendo que parte de la carga del terreno superior se distribuya hacia los muros inferiores. Esto "alivia" artificialmente al muro superior. Conforme la separación aumenta y se alcanza la independencia estructural (6.0 m), esta transferencia de carga desaparece, obligando al muro superior a soportar la totalidad del empuje que le corresponde.

Este resultado fue clave para entender que el muro superior no debe analizarse de forma aislada en sistemas con separación reducida, ya que su comportamiento depende directamente del grado de interacción con los muros inferiores. Por el contrario, cuando los muros están suficientemente separados, su desempeño se define principalmente por su posición y cercanía a la carga, lo cual permite un análisis más directo y específico.

En conjunto, los resultados confirman que la separación de 6.0 metros marca el umbral a partir del cual los muros dejan de interactuar significativamente, distribuyen mejor los esfuerzos y permiten un diseño más predecible y seguro.

Generalización de la regla de diseño $S \approx 1.5H$

A partir de la identificación de la separación óptima de 6.0 m para los muros de 4.0 m, surgió la interrogante de si este comportamiento respondía a una regla de diseño generalizable. Esto desembocó en un hallazgo importante que trasciende el caso de estudio, es la identificación

de una potencial regla de diseño generalizable: $S \approx 1.5H$. La consistencia de este factor en las tres geometrías analizadas (4m, 6m y 8m) sugiere que el espacio necesario para la disipación de los campos de esfuerzo de cada muro es directamente proporcional a su altura.

La drástica reducción de esfuerzos confirma la robustez del fenómeno. Como se observa en los datos, al pasar de la separación más corta a la óptima de $1.5H$, el momento flector en el Muro 1 (el más solicitado) se reduce drásticamente en un 68.33% para los muros de 6 metros y en un 68.71% para los de 8 metros,

Tabla 68

Reducción de momentos para diferentes alturas de muro sobre M-1.

Altura de Muro (m)	Separación (m)	Momentos M-1 (Kn/m/m)	Reducción (%)
4.00	1.50	189.80	75.67%
	6.00	46.17	
6.00	3.00	490.40	68.33%
	9.00	155.30	
8.00	4.00	1171.00	68.71%
	12.00	366.40	

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Un análisis detallado de los datos en el estado estabilizado ($S = 1.5H$) revela que los esfuerzos en los muros superiores (Muro 2 y Muro 3) convergen a valores casi idénticos, confirmando su independencia. Sin embargo, el Muro 1 registra esfuerzos ligeramente mayores. Esta diferencia se atribuye a que, además de contener su cuña de suelo local, actúa como el cimiento y ancla de todo el sistema, efecto que queda en evidencia al analizar la superficie de falla global, cuyos efectos de desplazamiento y esfuerzo se concentran en la base del talud.

Destacar que, la elección de $1.5H$ como umbral óptimo no es una decisión de magnitud, sino de comportamiento. Si bien una separación menor ya reduce drásticamente los esfuerzos, hacerlo implicaría diseñar deliberadamente en una "zona de transición", aceptando una interferencia residual que compromete el objetivo de la independencia estructural. Tomando en

cuenta que las condiciones reales presentan incertidumbres que el modelo no contempla, adoptar el factor $1.5H$ funciona como un criterio de diseño que incorpora un margen de seguridad implícito contra dichas variables.

Es fundamental acotar que las implicancias prácticas de la regla de diseño $S \approx 1.5H$ es completamente referencial, mejor adaptable a contextos con materiales granulares, los cuales constituyen el relleno ideal para estructuras de contención. No obstante, es de esperar que el factor "1.5" varíe en suelos con diferentes parámetros. En materiales cohesivos y poco friccionantes, la transferencia de esfuerzos tendría una zona de influencia más amplia, lo que probablemente exigiría una separación mayor. Por el contrario, en suelos granulares más competentes la cuña de falla sería más reducida, pudiendo requerir una separación incluso menor. Por lo tanto, la aplicación de esta regla en otros contextos geotécnicos exige una validación específica, lo que constituye una importante línea para futuras investigaciones.

5.1.1.2. Análisis de Factor de Seguridad global.

La evaluación del factor de seguridad (F.S.) en cada configuración de separación permitió determinar el nivel de estabilidad global del sistema bajo condiciones estáticas. Este parámetro fue clave para identificar el comportamiento del talud reforzado con muros escalonados.

Los resultados obtenidos muestran una tendencia creciente del F.S. conforme aumenta la separación entre los muros. En el caso de 1.5 m de separación, el sistema alcanzó un F.S. de 1.182, lo que indica un estado cercano al equilibrio límite, donde las estructuras trabajan de forma altamente acoplada, generando acumulación de esfuerzos y deformaciones que comprometen la estabilidad general. En esta condición, las deformaciones mostraban una propagación evidente desde los muros inferiores hasta el superior, afectando al sistema en conjunto.

Al aumentar la separación a 3.0 m, se obtiene un F.S. de 1.258, reflejando una mejora parcial en términos de estabilidad. Sin embargo, los incrementos de desplazamientos observados aún muestran una falla generalizada.

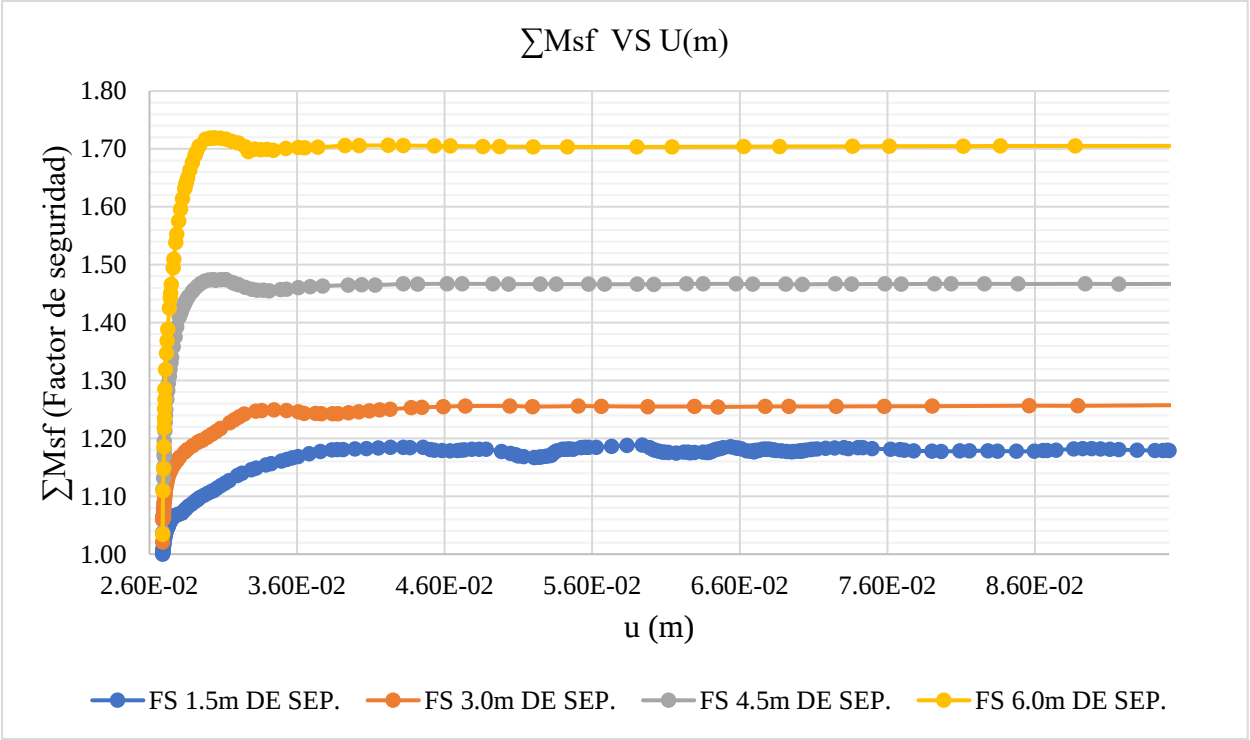
A partir de una separación de 4.5 m, el comportamiento comienza a cambiar de forma significativa. El F.S. se eleva a 1.473, se observa una transición hacia un mecanismo de comportamiento independiente.

La condición más favorable se alcanzó con la separación de 6.0 m, donde se registró un F.S. de 1.710 con un incremento del 43.94% respecto a la condición más crítica estudiada (1.50m), indicando una estabilidad alta del sistema sin evidencia de colapso potencial. Si bien los incrementos máximos de desplazamientos se localizan en la parte posterior del muro superior (M3), este comportamiento es esperable, ya que se trata de la zona menos confinada del talud, y donde el empuje actúa de manera más directa sin restricciones superiores ni posteriores. Sin embargo, este valor máximo no representa una superficie de falla como tal, sino una zona de deformación localizada y controlada. Lo más relevante se identifica en la franja de desplazamientos intermedios (zona celeste) visible detrás de cada muro, que aparece de manera constante en todas las simulaciones. Aunque su magnitud no es la mayor, su presencia continua y aislada por cada nivel revela el verdadero comportamiento del sistema.

Una vez descrito el fenómeno se ve que para una separación de 6.0 m, no existe una superficie de falla global, sino un conjunto de respuestas localizadas y que resultan eficientes para la estabilidad global del talud. En separaciones menores, esa franja celeste tiende a conectarse, lo que sugiere interacción estructural; en cambio, en separaciones óptimas, su aislamiento confirma la independencia del sistema.

En conjunto, el análisis del factor de seguridad no solo valida las observaciones previas, sino que respalda con claridad la elección de los 6.0 m como la separación óptima, en tanto garantizan un equilibrio adecuado entre independencia estructural y estabilidad mecánica.

Gráfica 53
Resultados de Factor de seguridad para las distintas separaciones



Nota. Fuente: Elaboración propia. Adaptado del software PLAXIS 2D

Tabla 69
Incremento porcentual del F.S para las diferentes separaciones

Separación	Factor de seguridad ΣMsf	Incremento Porcentual
1.50m	1.188	
3.00m	1.258	5.89%
4.50m	1.473	23.99%
6.00m	1.710	43.94%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.3. Análisis de desplazamientos generados mediante fases constructivas.

Para la configuración de separación mínima (1.5 m), los resultados muestran que en las tres fases constructivas el patrón de desplazamiento es claramente acumulativo y conectado. A medida que se construyen los muros, las zonas de deformación se superponen, especialmente en la base del talud. Esto sugiere un comportamiento en conjunto, donde el empuje del terreno no es absorbido de manera individual por cada muro, sino que se transfiere parcialmente entre ellos. La deformación total en la última fase evidencia una propagación continua desde el muro inferior hasta el superior, lo que refleja un mecanismo de falla generalizada que compromete al conjunto. Esta respuesta es coherente con los bajos valores de F.S. registrados para esta separación.

Con una separación de 3.0 m, se observa una mejora parcial en cuanto a las deformaciones sobre todo en la fase 3, pero de igual forma se hace evidente el patrón acumulativo y falla generalizada.

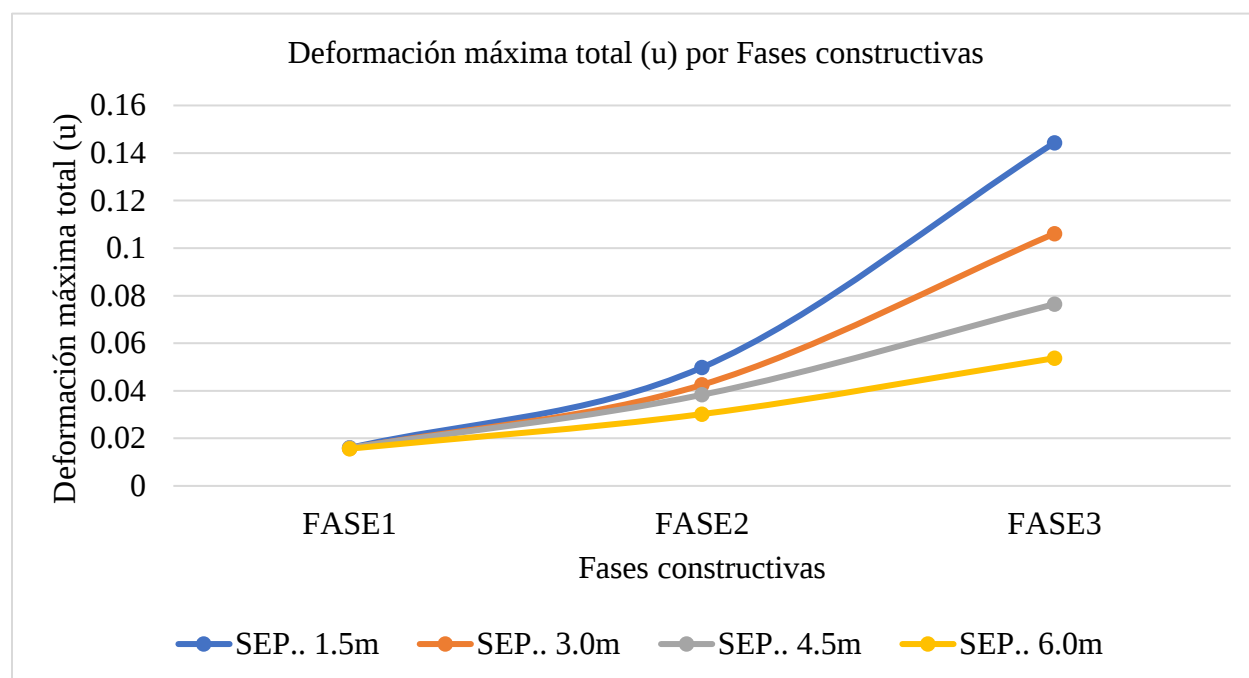
En el caso de 4.5 m, el patrón de deformación cambia de forma más evidente. Las zonas deformadas por fase aparecen más contenidas y diferenciadas. Sin embargo, es importante señalar que existe una acumulación vertical de desplazamientos en los muros inferiores, no porque haya transferencia estructural directa, sino porque el sistema, al ser escalonado, hereda las deformaciones previas del talud en cada nueva fase.

Finalmente, para la separación de 6.0 m, el comportamiento sigue esta misma lógica, pero con mayor eficiencia. Las deformaciones en cada fase son claramente localizadas. No obstante, la acumulación total de desplazamientos hacia el muro inferior persiste, por lo antes explicado.

En resumen, cuando los muros escalonados se ubican con poca distancia entre sí, tienden a trabajar en conjunto, generando acumulación de deformaciones, especialmente cuando el muro siguiente se apoya directamente sobre el relleno del anterior. Aunque este efecto persiste en configuraciones con mayor separación, puede ser reducido drásticamente, o incluso eliminado, si se aplican buenas prácticas constructivas como cortes sectorizados del talud y mejora del terreno de fundación.

Gráfica 54

Resultados de Deformación por fases constructivas para las distintas separaciones



Nota. Fuente: Elaboración propia.

5.1.1.4. Análisis de desplazamientos bajo carga aplicada.

Los resultados obtenidos en cuanto a los desplazamientos en la corona del talud debido a la carga confirman las tendencias observadas en análisis previos, separaciones cortas existe una mayor deformación en la corona del talud producto del desplazamiento completo del sistema, esto se refleja en desplazamientos significativos a cargas bajas. A medida que aumenta la separación entre los muros, se observa un cambio notable en el comportamiento del sistema: la

capacidad para resistir cargas mejora, y los desplazamientos se reducen, lo que indica una reacción más eficiente y localizada en el muro colindante a la carga.

La comparación entre la configuración crítica (1.5 m) y la óptima (6.0 m) cuantifica este beneficio:

Incremento de Capacidad de Carga: El sistema con 6.0 m de separación alcanzó una capacidad de carga última de 300 kN/m/m, lo que representa un impresionante aumento del 200% en comparación con los 100 kN/m/m que soportó el sistema con 1.5 m de separación.

Reducción de Desplazamientos: Bajo una misma carga de servicio de 100 kN/m/m, la configuración de 6.0 m registró un desplazamiento de solo 0.042 m, lo que significa una reducción del 48.15% frente a los 0.081 m observados en el sistema de 1.5 m

Tabla 70

Incremento de capacidad de carga para distintas separaciones en el modelo prototipo.

Separación	Carga Máxima (kN/m/m)	Incremento Porcentual
1.50m	100.0	
3.00m	140.0	40.00%
4.50m	220.0	120.00%
6.00m	300.0	200.00%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 71

Reducción de desplazamientos por aplicación de carga en la corona del talud en el modelo prototipo.

Carga kN/m/m	Deformación total (m)		% de Reducción
	SEP. 1.5m	SEP. 6.0m	
0	0	0	-
20	0.014	0.008	42.86%
60	0.046	0.024	47.83%
100	0.081	0.042	48.15%

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Respecto al análisis de puntos de control a lo largo del talud estabilizado se tiene:

1.5 m de separación: Los desplazamientos en la corona del talud son acumulativos y se superponen en las gráficas, lo que indica un comportamiento solidario entre los muros, afectando el sistema de manera general. Esto refleja un mecanismo de falla global donde los muros trabajan conjuntamente, lo que genera grandes desplazamientos incluso con carga baja.

3.0 m de separación: Los desplazamientos ya no se superponen tanto, mostrando una separación en las gráficas, si bien los desplazamientos son menores aún se hace evidente una falla en conjunto.

4.5 m de separación: La distancia entre las gráficas aumenta, indicando que cada muro responde de manera más independiente. Los desplazamientos se concentran en el muro cercano a la carga, y las deformaciones en los muros inferiores son muy pequeñas.

6.0 m de separación: Los desplazamientos están prácticamente concentrados en el muro superior, con desplazamientos insignificantes en los muros inferiores, se requiere una carga mucho mayor, pero incluso entonces los desplazamientos seguirán siendo mínimos.

Analizando los puntos de control, se puede saber el comportamiento de los muros para diferentes separaciones. Considerando ello, se tiene el siguiente resumen:

Tabla 72

Resultados del modelo prototipo ante carga para las distintas separaciones.

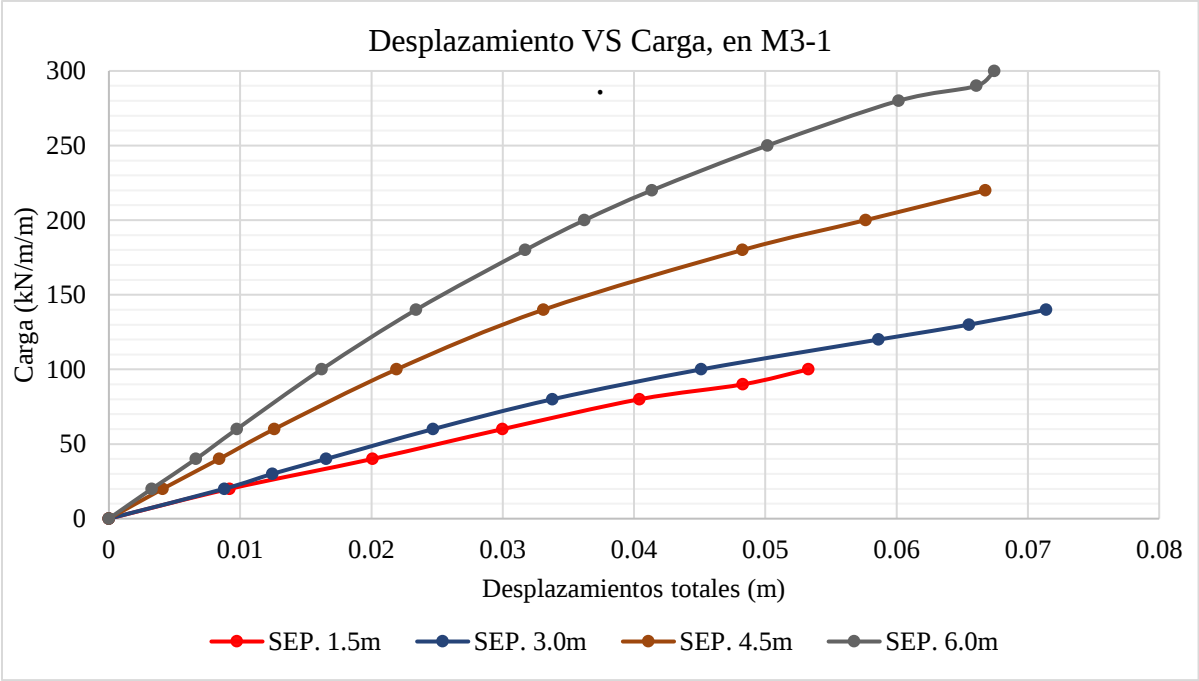
Sep.	Forma de falla	Comportamiento	Interpretación de gráficas	Reacción de muros	
1.5m	Falla generalizada	Desplazamientos acumulativos y conectados	Puntos entre muros M2 y M3 superpuestos y M1 con gran desplazamiento	M-3	Volteo hacia la zona de relleno
				M-2	Volteo
				M-1	Volteo
3.0m	Falla generalizada	Desplazamientos acumulativos y conectados	No existe superposición notoria pero los desplazamientos son cercanos entre si	M-3	Deslizamiento
				M-2	Volteo
				M-1	Volteo
4.50m	Falla segmentada	Desplazamiento concentrado en el muro superior	Separación notoria entre gráficos, incidencia de efectos sobre el M3.	M-3	Deslizamiento
				M-2	Volteo
				M-1	Volteo

6.00m	Falla localizada	Desplazamiento concentrado en el muro superior	Mayor separación, movimientos concentrados en M-3	M-3 M-2 M-1	Deslizamiento Volteo Volteo
-------	------------------	--	---	-------------------	-----------------------------------

Nota. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan gráficas comparativas de los puntos analizados.

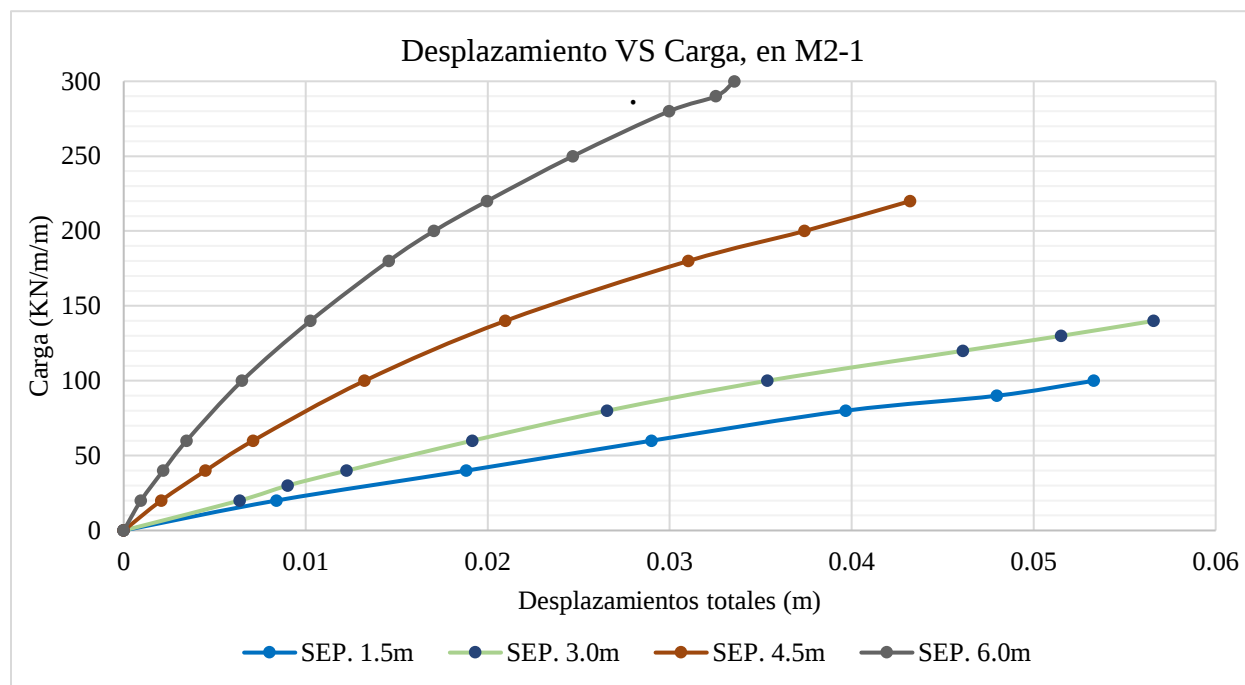
Gráfica 55
Comparativa de desplazamientos en el vector M3-1 para las distintas separaciones



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 56

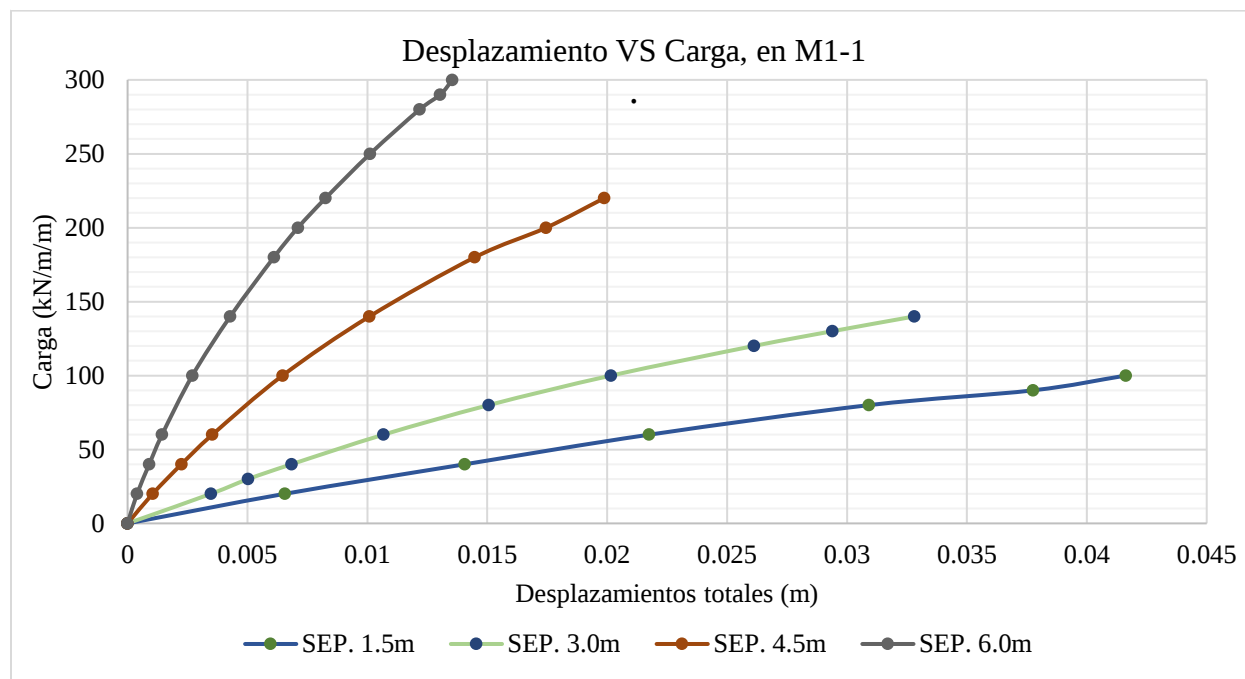
Comparativa de desplazamientos en el vector M2-1 para las distintas separaciones



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Gráfica 57

Comparativa de desplazamientos en el vector M1-1 para las distintas separaciones



Nota. Fuente: Elaboración propia.

Tabla 73

Reducción de desplazamientos en puntos de control analizados entre 1.50 y 6.0m de separación entre muros.

CARGA (kN/m/m)	DESPLAZAMIENTOS (mm)		REDUCCIÓN DE DESPLAZAMIENTOS	MUROS
	1.5m M3-1	6.0m M3-1		
0	0.00000	0.00000		
20	0.00919	0.00327	64.47%	
40	0.02008	0.00663	66.98%	
60	0.02999	0.00974	67.51%	
100	0.05327	0.01620	69.60%	
CARGA	M3-2	M3-2		M3
0	0.00000	0.00000		
20	0.00887	0.00286	67.79%	
40	0.01959	0.00582	70.29%	
60	0.03005	0.00874	70.92%	
100	0.05497	0.01490	72.90%	
CARGA	M2-1	M2-1		
0	0.00000	0.00000		
20	0.00839	0.00095	88.67%	
40	0.01884	0.00217	88.48%	
60	0.02901	0.00346	88.08%	
100	0.05332	0.00651	87.80%	
CARGA	M2-2	M2-2		M2
0	0.00000	0.00000		
20	0.00728	0.00095	86.91%	
40	0.01577	0.00211	86.65%	
60	0.02441	0.00330	86.49%	
100	0.04615	0.00600	87.00%	
CARGA	M1-1	M1-1		
0	0.00000	0.00000		
20	0.00655	0.00040	93.94%	
40	0.01407	0.00090	93.57%	
60	0.02175	0.00144	93.39%	
100	0.04163	0.00270	93.51%	
CARGA	M1-2	M1-2		M1
0	0.00000	0.00000		
20	0.00412	0.00034	91.67%	
40	0.00875	0.00077	91.24%	
60	0.01366	0.00120	91.18%	
100	0.02674	0.00222	91.71%	

Nota. Fuente: Elaboración propia

El análisis de desplazamientos en los puntos de control a lo largo del talud ofrece la prueba más clara de la transición de un comportamiento acoplado a uno independiente.

En la configuración crítica de **1.5 m de separación**, se confirma un comportamiento solidario. La carga aplicada en la corona genera desplazamientos significativos que se propagan a través de todo el sistema, incluyendo los muros inferiores. Esto evidencia un mecanismo de falla global, donde el sistema completo se deforma como una única unidad.

En contraste, la configuración óptima de 6.0 m de separación demuestra un comportamiento radicalmente distinto y mucho más eficiente. El efecto de la carga se concentra casi exclusivamente en el muro superior (M3), aislando al resto del sistema. La comparación directa bajo una carga de 100 kN/m es contundente:

- El muro superior (M3) reduce sus desplazamientos en aproximadamente un 70%.
- El muro intermedio (M2) muestra una reducción aún mayor, de casi un 88%.
- El muro inferior (M1) queda prácticamente aislado de la carga, con una impresionante reducción de desplazamientos superior al 93%.

Esta drástica disminución de la deformación en los muros inferiores es una clara evidencia de que se ha alcanzado la independencia estructural. Con una separación de 6.0 m, la carga es contenida localmente por el muro más cercano, garantizando que no se comprometa la estabilidad del resto del sistema.

5.1.2. Respecto al modelo a escala reducida.

5.1.2.1. Respecto al modelo FÍSICO a escala reducida.

A partir de los resultados obtenidos en la gráfica de desplazamiento vertical en la corona del talud por acción del equipo universal de compresión, se confirma el comportamiento esperado del modelo a escala bajo las distintas separaciones entre los muros. La curva muestra claramente cómo la deformación del sistema varía en función de la carga aplicada considerando diferentes separaciones entre muros.

En separaciones cortas (1.5 m), se producen mayores deformaciones, generando una falla global que se propaga desde el muro inferior hacia arriba, creando un efecto dominó.

En separaciones intermedias (3.0 m y 4.5 m), se aprecia una reducción en la deformación, con un comportamiento intermedio entre falla global y localizada.

Para una separación amplia (6.0 m), la deformación se limita principalmente al muro cercano a la carga, mostrando claramente una falla localizada y mínima afectación en los muros inferiores. Esta eficiencia se traduce **aumento de 165.62% en la capacidad de carga**, pasando de soportar 550.0 kg en el caso más crítico a 1461.0 kg en el óptimo, además se evidencia una **reducción de la deformación de hasta al 67%** en comparación con el modelo de 1.5 m a una carga equiparable. Estos resultados confirman experimentalmente que aumentar la separación mejora significativamente la estabilidad global.

Tabla 74

Incremento de capacidad de carga para diferentes separaciones en el modelo a escala reducida.

Separación	Carga Máxima (Kg)	Incremento Porcentual
1.50m	550.0	
3.00m	871.8	58.50%
4.50m	1186.1	115.64%
6.00m	1461.0	165.62%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 75

Reducción de desplazamientos por aplicación de carga en la corona del talud entre 1.50 y 6.0 metros de separación para modelo a escala reducida.

Carga kN/m/m	Deformación Vertical (mm)		% de Reducción
	SEP. 1.5m	SEP. 6.0m	
0	0	0	
99.79	0.9630	0.4622	52.00%
200.03	2.0874	1.1379	45.49%
299.82	3.4511	1.7856	48.26%
400.06	5.2954	2.4384	53.95%
500.16	7.7771	3.1420	59.60%
550.04	11.0012	3.5890	67.38%

Nota. Fuente: Elaboración propia

Estos resultados confirman que aumentar la separación mejora significativamente la estabilidad global y localiza la deformación cerca de la zona cargada.

En resumen, los resultados del modelo a escala confirman que, a medida que aumenta la separación entre los muros, se incrementa la capacidad de carga del sistema y se reducen las deformaciones, lo que resalta la importancia de una adecuada separación para optimizar el comportamiento mecánico del talud estabilizado con muros escalonados de concreto armado.

El **comportamiento producto del desplazamiento en el talud** y el sistema escalonado, muestra una clara evidencia de respuestas horizontales, especialmente en muros inferiores y en posiciones cercanas a los muros, para la separación de 1.50m se hace evidente este efecto, pero como la falla es generalizada gobiernan los desplazamientos inclinados. Esta interacción es aún más evidente al analizar los desplazamientos durante la falla forzada.

A medida que la separación entre los muros aumenta, las respuestas horizontales se hacen más marcadas. Los desplazamientos horizontales, particularmente cerca de los muros, adquieren mayor relevancia, lo que genera fallas por deslizamiento y volteo, reflejando un cambio hacia un comportamiento más estructurado y localizado del sistema

Tabla 76*Resultados del modelo a escala ante carga para las distintas separaciones.*

Sep.	Forma de falla	Comportamiento	Forma de desplazamiento	Reacción de muros	
1.5m	Falla generalizada	Desplazamientos acumulativos y conectados	Los desplazamientos a lo largo de todo el talud estabilizado son constantes	M-3	Volteo hacia la zona de relleno
				M-2	Desplazamiento+ Volteo
				M-1	Volteo
3.0m	Falla generalizada	Desplazamientos acumulativos y conectados	Se ve cómo reduce la incidencia de desplazamientos entre muros	M-3	Deslizamiento
				M-2	Desplazamiento+ Volteo
				M-1	Volteo
4.50m	Falla segmentada	Desplazamiento concentrado en el muro superior	Reduce aún más esta incidencia, concentrado el movimiento en el muro superior	M-3	Deslizamiento
				M-2	Desplazamiento+ Volteo
				M-1	Volteo
6.00m	Falla localizada	Desplazamiento concentrado en el muro superior	Con desplazamientos insignificantes en el muro inferior, concentrado el movimiento en el muro superior	M-3	Deslizamiento
				M-2	Deslizamiento
				M-1	Volteo ligero

Nota. Fuente: Elaboración propia

5.1.2.1. Respecto al modelo numérico a escala reducida.

Durante las pruebas físicas y las simulaciones numéricas, se aplicaron cargas incrementales en la corona del talud utilizando una placa rígida, lo que permitió mantener una distribución uniforme en las deformaciones a lo largo del sistema. El objetivo principal del modelo numérico en PLAXIS 3D fue replicar el comportamiento carga-deformación y el mecanismo de falla observados experimentalmente.

Los factores de seguridad al fallo obtenidos a partir de los modelos numéricos a escala en Plaxis 3D fluctuaron entre 1.063 y 1.095. Este resultado, más que una limitación, es una confirmación de la metodología de análisis del software. Al emplear el método de Reducción de Resistencia (SRM), PLAXIS reporta por definición el último estado convergente antes de que el

modelo entre en falla numérica. Por lo tanto, un factor de seguridad marginalmente superior a 1.0 indica que el sistema ha alcanzado una condición crítica, justo en el umbral de la inestabilidad, lo cual es coherente con un ensayo llevado hasta el colapso.

Reconociendo la alta sensibilidad del modelo a escala, la clave para lograr esta correlación fue un proceso de calibración centrado en tres aspectos fundamentales.

Rol Protagonístico del parámetro “C”: El ensayo triaxial arrojó una cohesión de $c = 1.2$ kPa. Aunque este valor es despreciable a escala real, se vuelve el parámetro dominante en el modelo a escala debido a los bajos esfuerzos de confinamiento, según indica la ecuación de Morh Coulomb, ($\tau = c + \sigma'_n \tan \varphi$), donde la resistencia por fricción depende del confinamiento, teniendo así una incidencia menor. La inclusión de esta cohesión fue esencial para replicar la capacidad de carga del modelo físico.

Sensibilidad de la Malla: La densidad de la malla influye directamente en los resultados de deformación. Se optó por una malla de densidad "Media" como parte de la calibración, ya que fue la que mejor ajustó los desplazamientos numéricos a los medidos experimentalmente.

Interfaces Suelo-Estructura: Se modeló el contacto entre el suelo y los muros con elementos de interfaz y un factor de reducción $R_{inter} = 0.7$. Esto fue crucial para simular un mecanismo de falla realista al permitir el deslizamiento, evitando la suposición incorrecta de una adherencia perfecta.

En resumen, la modelización numérica exitosa de un ensayo a escala depende menos de la configuración por defecto y más de un entendimiento profundo de la sensibilidad del modelo. La calibración de parámetros como la cohesión, la malla y las interfaces es indispensable para obtener resultados que representen fielmente el comportamiento físico.

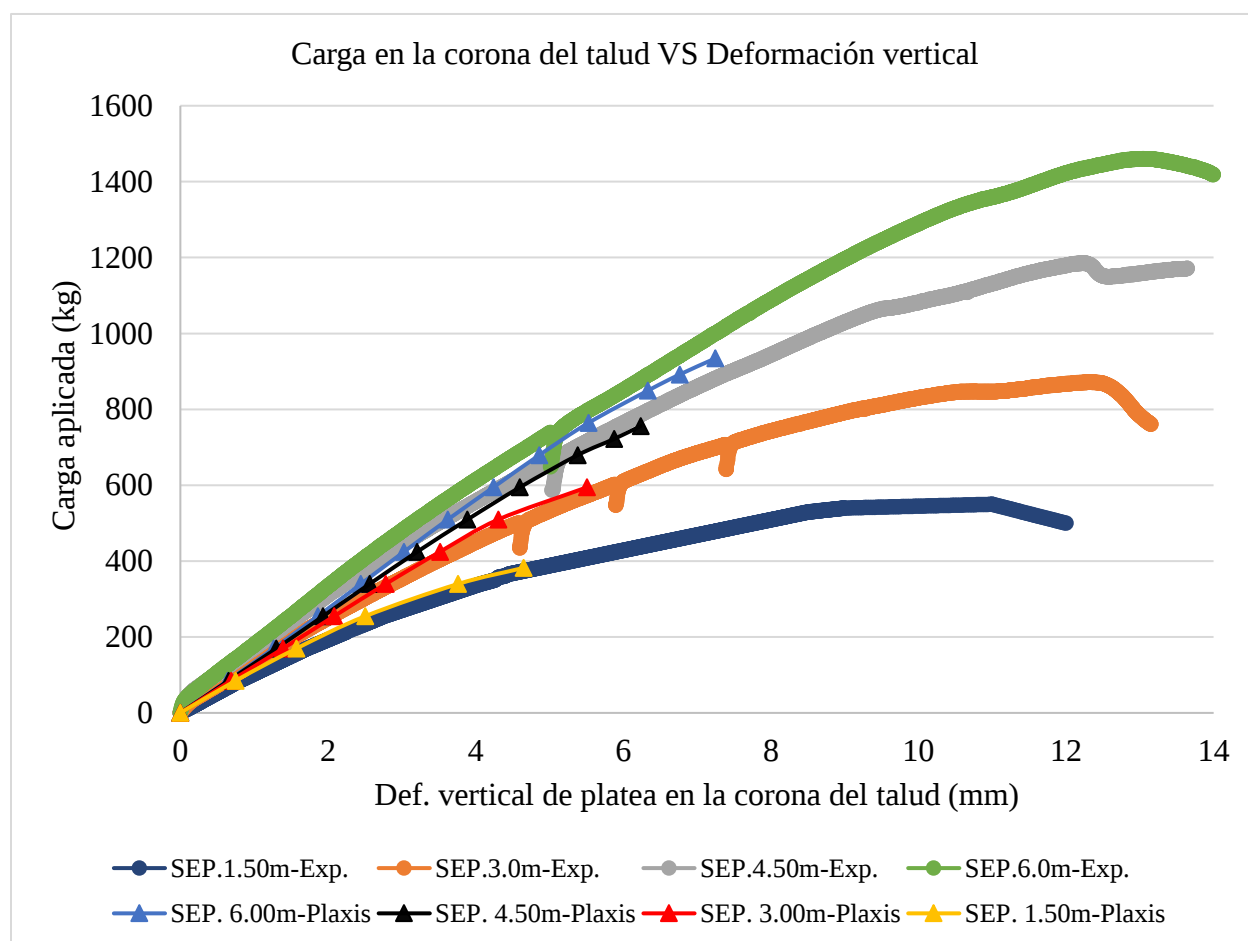
Las simulaciones demostraron que, para separaciones menores, se generan desplazamientos en conjunto, mientras que, para separaciones mayores, los desplazamientos son mínimos y concentrados en el muro superior.

Por otra parte, se hace evidente la predominancia de desplazamiento horizontales cerca a los muros, confirmando la coherencia con los resultados experimentales obtenidos.

5.1.2.1. Comparación entre el modelo físico y numérico a escala reducida.

Gráfica 58

Comparación de desplazamientos verticales entre modelo FÍSICO y NUMÉRICO a escala reducida.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Los resultados obtenidos en los desplazamientos verticales en la corona del talud, tanto del modelo físico como de las simulaciones numéricas en Plaxis 3D a escala reducida, muestran

una tendencia similar en ambos casos. Si bien no se logra exactitud en los valores, la curva de desplazamientos bajo la carga aplicada en ambos modelos exhibe un comportamiento coherente. Esto demuestra que el modelo a escala cumple con su propósito, ya que refleja el comportamiento observado en el modelo numérico a escala y prototipo, validando el enfoque y los resultados obtenidos. La similitud de comportamiento entre ambos modelos refuerza la fiabilidad del modelo físico y su capacidad para visualizar y analizar los efectos del comportamiento del sistema ante cargas incrementales.

En relación al comportamiento del sistema bajo carga, ambos modelos describen los mismos efectos dependiendo del grado de separación entre muros, ambas muestras el efecto dominante de los desplazamientos horizontales cerca a los muros y también el comportamiento de falla para cada muro es el mismo.

5.2. Limitaciones del estudio.

5.2.1. Respecto a las condiciones de estudio.

Se utilizó un material único y homogéneo para la conformación del talud. Para el modelo prototipo se estudió una condición parcialmente saturada y para el modelo a escala en condición seca. Si bien esta simplificación está alineada con el objetivo principal de la investigación, que es explicar un fenómeno geotécnico específico, es importante destacar que en la realidad los taludes están compuestos por estratos y están sujetos a condiciones hidrológicas variables, lo que genera interacciones mas complejas.

En cuanto a la geometría del muro, es importante aclarar la naturaleza de la limitación. Si bien el estudio partió de una configuración de muro específica para analizar las variables de estudio, su altura se varió sistemáticamente (4, 6 y 8 metros) con el fin de proponer una regla de diseño generalizable. Por lo tanto, la limitación no radica en el uso de una dimensión única, sino

en que la proporcionalidad entre los componentes del muro (altura, zapata, corona, etc.) se mantuvo constante en todos los casos, siguiendo un único criterio de pre-dimensionamiento.

5.2.2. Respecto al modelo físico a escala reducida.

Entorno experimental: Un modelo a escala reducida tiene como principal objetivo replicar el comportamiento geotécnico. Sin embargo, la escala impone ciertas restricciones en cuanto a la replicabilidad exacta de las condiciones reales. Tuvimos que adaptar el entorno experimental y la escala de estudio a las medidas del equipo universal de compresión para garantizar un control adecuado de las deformaciones y así poder compararlas con los resultados obtenidos del modelo numérico en PLAXIS 3D.

El equipo universal de compresión, utilizado para ejercer la carga sobre el talud, fue esencial para obtener datos precisos sobre las deformaciones. No obstante, la forma en que este equipo elevaba la plataforma de apoyo para ejercer carga, dificultó la implementación de tecnologías de medición avanzada, como la correlación de imágenes digitales (DIC), porque solo mostrarían desplazamientos verticales. Debido a esta limitación, se optó por realizar mediciones directas *in situ* utilizando vernier, reglas y el software AutoCAD para corroborar las mediciones obtenidas, garantizando así un control adecuado de los desplazamientos.

Simplificaciones necesarias de estudio: Se recrearon únicamente condiciones estáticas, escalando la geometría y densidad, dejando de lado efectos dinámicos. Además, se utilizó material homogéneo y completamente seco para evitar los efectos de presiones intersticiales, lo cual es una simplificación válida para el tipo de ensayo. Sin embargo, estas simplificaciones limitan la precisión de la comparación con el comportamiento de un sistema real, ya que los materiales reales presentan una mayor complejidad en su respuesta.

5.2.3. Respecto al modelo numérico a escala reducida.

Una limitación intrínseca del software es su incapacidad para calcular factores de seguridad inferiores a 1.0 mediante el Método de Reducción de Resistencia (SRM). El programa reporta el último estado de equilibrio convergente antes de la falla numérica, indicando una condición crítica o de falla inminente. Como consecuencia, aunque las curvas carga-deformación muestran una tendencia correcta, no pueden capturar estados de fluencia o fallas inminentes como en el modelo físico a escala. Esto impide una visualización exacta del colapso total. No obstante, permiten identificar con claridad el inicio de la inestabilidad del sistema.

Respecto a las condiciones de contorno, el modelo numérico no simuló la fricción en las condiciones de contorno, es decir, la interacción entre el suelo y las paredes de vidrio del contenedor físico. Aunque las fronteras de PLAXIS son infinitamente rígidas, simulando el marco de ensayo, por defecto son perfectamente lisas. En la realidad, existe una fricción (aunque baja) entre el vidrio y el material.

Si bien esta interacción podría modelarse con elementos de interfaz en los límites del modelo, esto añadiría una capa de complejidad y calibración adicional. Se consideró que este efecto era secundario, ya que se logró una calibración satisfactoria de los resultados experimentales, considerando el valor de cohesión y ajustando la malla y el parámetro Ritner.

Existen técnicas avanzadas de interfaz en modo “*Custom*” que permiten asignar propiedades de resistencia y rigidez específicas, independientes del suelo. Este método se usa para simular elementos como geosintéticos o planos de falla preexistentes. Sin embargo, para este estudio se utilizó el método estándar, ya que el objetivo era analizar la falla global del sistema y no una superficie de debilidad ya definida.

CONCLUSIONES

El estudio ha demostrado que la separación entre los muros escalonados tiene una influencia significativa en el comportamiento mecánico del talud. A medida que la distancia entre los muros aumenta, el sistema tiende a comportarse de manera más independiente, con una mejora en la estabilidad general del talud. Para el caso de estudio con muros de 4.0 metros de altura en suelo areno-limoso, se determinó que la separación óptima para garantizar la independencia estructural es de 6.0 metros, punto en el cual los esfuerzos internos se estabilizan y el sistema alcanza su máximo rendimiento.

La separación entre los muros escalonados de concreto armado, tiene un impacto directo y cuantificable en el **factor de seguridad global** (F.S.) del talud. Al pasar de 1.5 m a 6.0 m, el Factor de Seguridad se incrementó en un 43.94%, lo que se traduce en una mejora significativa en la estabilidad del sistema.

Los **desplazamientos** generados por aplicación de carga se ven fuertemente influenciados por la separación entre muros. Para una carga de servicio de 100 kN/m, el desplazamiento en la corona del talud se redujo en un 48.15% al pasar de la separación de 1.5 m a la de 6.0 m. Este fenómeno se explica por el cambio en el mecanismo de respuesta; mientras en separaciones cortas la deformación es global, la separación óptima la localiza. La prueba definitiva de esta independencia estructural es que el muro inferior (M1) experimentó una reducción de desplazamientos superior al 93%, demostrando que queda prácticamente aislado del efecto de la carga.

Respecto a la **capacidad de carga**, se observa un incremento significativo conforme aumenta la distancia entre los muros. La configuración óptima de 6.0 m demostró ser capaz de soportar una carga máxima de 300 kN/m/m, lo que representa un aumento del 200% en

comparación con los 100 kN/m/m de capacidad del sistema con 1.5 m. Este incremento drástico en la resistencia se debe a que la independencia estructural permite que la carga sea contenida de manera eficiente por el muro superior, sin comprometer la integridad del sistema en su conjunto.

Todo lo mencionado fue demostrado experimentalmente, evidenciando las formas de falla para las diferentes separaciones bajo la aplicación de carga, lo que valida los resultados obtenidos para el factor de seguridad. Además, se observó un comportamiento consistente en relación con los desplazamientos bajo carga, confirmando la relación entre los resultados experimentales y los modelos numéricos.

Adicionalmente, el análisis extendido a otras geometrías sugiere la existencia de una potencial regla de diseño generalizable, donde la separación óptima (S) es aproximadamente 1.5 veces la altura del muro (H). Si bien este es un hallazgo de gran valor, se presenta como una sólida hipótesis que requiere de futuras investigaciones para su validación en una gama más amplia de condiciones geotécnicas.

RECOMENDACIONES

Respecto a las implicancias prácticas.

Se ha descrito con éxito el efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, definiendo 6.0m como la distancia óptima de separación para el caso de estudio, extendiendo el hallazgo en una regla de diseño preliminar de $S \approx 1.5H$. Sin embargo, se sabe que cada proyecto tiene características diferentes, tanto en topografía, como tipo de suelo, siendo estos datos únicamente referenciales para su aplicabilidad en proyectos reales. Se recomienda hacer evaluaciones personalizadas para cada proyecto en función a sus condiciones específicas.

En ocasiones, no se tendrá el espacio suficiente para lograr estabilizar el sistema con separaciones entre muros. En tal caso, y vistos los efectos descritos en la presente investigación, se recomienda diseñar los muros inferiores, considerando los sobreesfuerzos generados por la interacción entre estos y el terreno circundante. A continuación, se describen algunas técnicas a tomar en cuenta, previa evaluación particular de cada proyecto.

Reforzar el terreno de fundación, Reduce desplazamientos acumulativos debido a las fases constructivas, como se vio, este efecto es maximiza cuando el muro posterior se cimienta sobre el relleno del anterior.

Realizar cortes sectorizados, esta es una de las principales causas por la cual se opta por este sistema de estabilización, se recomienda realizar los cortes previo análisis del estado actual del talud.

Respecto al diseño de muros, se recomienda tomar en cuenta el uso de contrafuertes para absorción de esfuerzos (en muros inferiores) y uñas en los muros para evitar fallas por deslizamiento.

Respecto al modelo físico a escala reducida.

Previsión de la zona de experimentación: Para aumentar la flexibilidad en la elección de la escala, se recomienda prever la zona de experimentación con marcos de ensayo o prensas de carga acordes a la escala que se desee ensayar, Es importante destacar que el uso de una escala mayor proporciona una representación más precisa y realista del comportamiento estudiado.

El uso de materiales homogéneos: Es indispensable utilizar un material homogéneo para obtener resultados consistentes, tal como se hizo en esta investigación. La uniformidad del material de ensayo garantiza que los resultados sean comparables y minimiza las variabilidades que podrían surgir de materiales no homogéneos.

Marco rígido y sellado de las esquinas: Para evitar la absorción de esfuerzos durante las pruebas, se recomienda utilizar un marco completamente rígido con perfiles estructurales robustos. Además, se debe sellar adecuadamente las esquinas del modelo para prevenir filtraciones de material, lo cual podría afectar la estabilidad del sistema y alterar los resultados experimentales.

Espacio libre entre la cara del vidrio y la estructura: En el caso de analizar el comportamiento de estructuras dentro del modelo, es recomendable dejar un espacio libre entre la cara del vidrio y la estructura, esto evitará posibles efectos de fricción que pueden afectar de forma considerable a los resultados del modelo, esto abrirá paso a otro problema, que son las filtraciones de material por la separación hecha, se recomienda utilizar alerones o almohadillas de esponja.

Uso de máquinas centrífugas para escalar la gravedad: La modelización a escala podría mejorarse significativamente mediante el uso de máquinas centrífugas, las cuales

permiten escalar la gravedad y observar efectos reales en los modelos a escala. Esta técnica podría ser utilizada en futuras investigaciones para analizar no solo los muros escalonados, sino también otros tipos de condiciones geotécnicas, proporcionando resultados más representativos de la realidad.

Recomendaciones para futuras líneas de investigación.

Profundizar el análisis: Debido a la falta de bibliografía sobre este sistema de estabilización, existe la necesidad de desarrollar guías de diseño y normativas más específicas, tanto a nivel internacional como nacional, que aborden explícitamente esta tipología de muros de concreto armado. Aunque esta investigación proporciona una descripción detallada del comportamiento de este sistema, se requiere la realización de estudios adicionales para validar y generalizar la regla de diseño $S \approx 1.5H$ en diferentes tipos de suelo, así como en diversas geometrías de muro, considerando tanto cargas estáticas como dinámicas. Estos estudios permitirían una mejor comprensión de su desempeño en condiciones más variadas y complejas.

Análisis del efecto de la filtración en el sistema de muros escalonados: Sería interesante analizar cómo la filtración de agua afecta el comportamiento del sistema para diferentes separaciones entre muros. Este análisis debe incluir un diseño de drenaje integral para los muros escalonados, considerando la evacuación eficiente del agua de cada nivel o terraza intermedia, así como del sistema en su conjunto. En este sentido, se debe tener en cuenta que la saturación de los rellenos intermedios podría incrementar los empujes sobre los muros inferiores y reducir la resistencia al corte del suelo, comprometiendo así la estabilidad de múltiples niveles e incluso la estabilidad global del sistema.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barrera, J. (2014). *Modelo Experimental en Taludes Escalonados* [Tesis de Maestría]. Universidad Autónoma de Querétaro.
- Bentley, S. (2024a). *PLAXIS 2D 2024.2 Material Models Manual 2D*.
- Bentley, S. (2024b). *PLAXIS 2D 2024.2 Reference Manual 2D*.
- Bishop, A., & Henkel, D. (1962). *The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test* (2da ed.). Edward Arnold (Publishers) Ltd.
- Blas, J. (2023). *Caracterización geotécnica para determinar el modelo de estabilización de talud a escala reducida, barrio Los Olivos, Independencia, Huaraz, Ancash, Perú – 2021* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio UNMSM: <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/321443cb-fba1-4a33-b916-bcde1f037695>
- Block, A. (2018). *AB Engineering Manual*.
- Bowles, J. (1986). *Engineering Properties Of Soils and their Measurement* (3rd ed). McGraw-Hill Book Company. <https://archive.org/details/engineeringpropedO00bow!l>
- Cahuana, J., & Yanqui, C. (2019). Determinación experimental del empuje activo contra muros de contención que sufren traslación y rotación respecto al tope. *Artículo de Investigación*. Repositorio UNSA: <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29172.71043>
- Camacho, J., Molina, F., & Reyes, J. (2014). Preparación de Especímenes de Arena para Ensayos Triaxiales mediante un método Controlado de Compactación. *Revista Científica General José María Córdova*, 12(14), 185–196.
- Chirinos, R. (2017). *Diseño geotécnico de 1 km de túnel para la línea 2 de la red básica del metro de Lima y Callao* [Tesis de Grado, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio PUCP: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/9913>

- Das, B. (2012). *Fundamentos de ingeniería de cimentaciones Séptima edición* (S. Cervantes & O. Ramírez, Eds.). Learning Editores.
- Escobar, V., & Vásconez, D. (2023). *Elaboración de un Manual para el uso del “Equipo de Ensayo Triaxial” (ELE)* [Tesis de Grado]. Universidad Politécnica Salesiana.
- Gomez, Diego. (2011). *Iniciación de la modelación física en centrifuga geotécnica de un muro de contención con geoceldas*. [Tesis de grado, La Universidad de los Andes]. Repositorio U.de los Andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/0f0004f8-2208-4165-9e0a-2c937db527c0>
- Huallpa, D. (2019). *Identificación y evaluación de factores geotécnicos que causan la inestabilidad de ladera en la quebrada de Qolcohuaycco, urbanización Santa Rosa, distrito de san Sebastián-Cusco*. [Tesis de grado, Universidad Andina del Cusco]. Repositorio UAC: <https://hdl.handle.net/20.500.12557/3284>
- Ibañez, J. (2003). *Modelagem constitutiva para solos com ênfase em solos não saturados* [Dissertação de Mestrado]. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio).
- INE. (2018). *Resultados Definitivos, Cusco*.
- Mamani, J., & Rivera, J. (2018). *Análisis y modelamiento en muros de Contención de concreto armado, mediante el Uso del programa Plaxis 2d en la carretera Hv-101 km. 28 + 950 Salcabamba – Huancavelica- Perú* [Tesis de Grado, Universidad de San Martin de Porres.]. Repositorio USMP: <https://hdl.handle.net/20.500.12727/5298>
- Muñoz, D., & Merma, G. (2023). *Evaluación de la Vulnerabilidad y Análisis de Estabilidad del Talud en el Tramo Km 45+620 al Km 45+920 de la Carretera Cusco – Paruro, Región Cusco* [Tesis de Grado]. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco.

Potts, A., & Zdravkovid, L. (1999). *Finite element analysis in geotechnical engineering, Theory* (1st ed., Vol. 1). Thomas Telford Ltd.

Ravindran, S., & Gratchev, I. (2022). Effect of Water Content on Apparent Cohesion of Soils from Landslide Sites. *Geotechnics*, 2(2), 385–394.

<https://doi.org/10.3390/geotechnics2020017>

Rojas, L. (2024). *Elementos Finitos Aplicados a la Ingeniería Geotécnica*.

Romero, J., Pacheco, L., & Bechara, E. (2007). *Análisis de un muro de gravedad a escala reducida* [Tesis de Grado, Universidad de la Salle]. Ciencia Unisalle:

https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1250&context=ing_civil

Sampieri, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (Sexta edición). McGraw-Hill / Interamericana Editores, S.A. de C.V.

Suarez, J. (1998). *Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en Zonas Tropicales* (Ingeniería de Suelos Ltda, Ed.).

Torres, A. (2008). Principios de estudios de fenómenos geotécnicos complejos a través de modelos. *Artículo Científico*.

<https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1083&context=ep>

Wils, L., Haegeman, W., & Van Impe, P. O. (2015). *Triaxial compression tests on a crushable sand in dry and wet conditions*.

ANEXOS.

ANEXO A. Matriz de Consistencia.

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL		
P.G: ¿De qué manera la separación entre los muros escalonados de concreto armado afecta en el comportamiento mecánico del talud en suelo areno-limoso, Cusco, 2024?	OG: Determinar la influencia de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud en suelo areno-limoso, a fin de establecer una distancia óptima entre muros donde se comporten independientemente, Cusco, 2024.	La distancia de separación entre muros escalonados de concreto armado influye significativamente en el comportamiento mecánico de un talud en suelo areno-limoso, postulándose que existe una separación óptima en la cual los muros alcanzan un comportamiento independiente, maximizando así la estabilidad del conjunto, Cusco, 2024	VARIABLE 1: SEPARACIÓN ENTRE MUROS ESCALONADOS DE CONCRETO ARMADO Dimensiones: 1. Distancia de separación.	TIPO DE INVESTIGACIÓN: Cuantitativa y aplicada NIVEL DE INVESTIGACIÓN: Explicativo DISEÑO DE INVESTIGACIÓN Investigación experimental TÉCNICA DE SELECCIÓN DE MUESTRAS: No probabilística
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVO ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECÍFICOS		
PE1: ¿Cómo influye la separación entre los muros escalonados de concreto armado en el factor de seguridad global del talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024?	OE1: Determinar cómo la distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado influye en el factor de seguridad global del talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024	A medida que aumenta la distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado, el factor de seguridad global del talud en suelo areno-limoso mejora significativamente, Cusco, 2024.	VARIABLE 2: COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL TALUD. Dimensiones: 1. Estabilidad. 2. Desplazamientos. 3. Capacidad de Carga.	INSTRUMENTOS: 1. Software de modelamiento numérico (Plaxis 2D y 3D) 2. Equipo universal. 3. Vectores de desplazamientos, ficha de recolección de datos.

PE2: ¿Qué efecto tiene la separación entre muros escalonados de concreto armado sobre los desplazamientos generados por sobrecarga en el talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024?	OE2: Determinar cómo la distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado influye en los desplazamientos generados por sobrecarga en talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024	La distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado tiene un efecto directo en la reducción de los desplazamientos del talud en suelo areno-limoso, tal como se observa en los modelos físico y numérico, Cusco, 2024.		
PE3: ¿Qué efecto tiene la separación entre muros escalonados de concreto armado en la resistencia ante carga generada en la corona del talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024?	OE3: Determinar cómo la distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado influye en la capacidad ante carga generado en la corona del talud en suelo areno-limoso, Cusco 2024	La distancia de separación entre los muros escalonados de concreto armado tiene un efecto directo en el aumento en la capacidad de carga de talud en suelo areno-limoso, tal como se observa en los modelos físico y numérico, Cusco, 2024		

ANEXO B. Matriz de instrumentos

DIMENSIONES	INDICADORES	ITEM	TÉCNICA	INSTRUMENTO
Estabilidad	Factor de Seguridad Global ESTÁTICO	Adimensional	Modelación Numérica	PLAXIS 2D
Desplazamientos	Desplazamientos	m	Modelación Numérica	PLAXIS 2D
		m	Modelación física a escala (observación)	Vectores de desplazamientos (Ficha de recolección de datos)
Capacidad de carga	Sobrecarga (M. numérico)	kN/m/m	Modelación Numérica	PLAXIS 2D
	Carga puntual (M. escala)	Kg	Modelación física a escala (observación)	Equipo UNIVERSAL

ANEXO C. Análisis granulométrico de material S1



UNSAAC - CEFIC - LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO -NTP 339.128



Título de Tesis: "Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Tesistas: Oscar Jose Dueñas Tito 191671

Informe N°: Numero 1

Jorge Luis Dueñas Tito 171766

Calicata/Cantera: C-1 (Talud expuesto)

Fecha: 31/01/2025

Muestra N°: S1

Profundidad: Estrato 1

Horno:

Balanza: Presicion 0+00g

Metodo A ☐ Tamizado simple (T.M. <3/4" - aprox. 0.01g)

Metodo A ☒ Tamizado Simple (T.M < N°4 - aprox. 0.001 g)

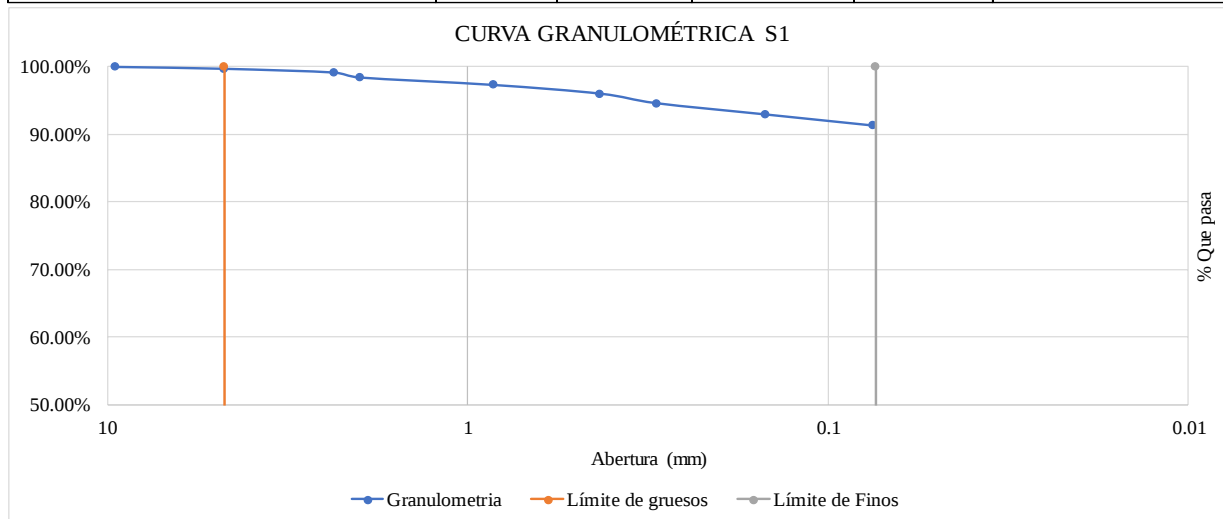
Metodo A ☐ Tamizado Compuesto (T.M.>=3/4" - aprox. 0.01 g))

Parte gruesa

1. SECADO (M)	Fecha	Hora	Masa
Masa humedad	28/01/2025	12:50:00	2995.0
Secado de 24 horas	29/01/2025	12:45:00	2885.0

2. LAVADO	Fecha	Hora	Masa
Masa seca (Inicio)	30/01/2025	09:30:00	2885.00
Secado de 24 horas	31/01/1900	10:13:00	266.21

TAMIZ	DIÁMETRO EN (MM)	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO CORREGIDO (gr)	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	% PASA ACUMULADO
3/8'	9.5	0	0	0.00%	0.00%	100.00%
#4	4.75	7.99	8.01	0.28%	0.28%	99.72%
#8	2.36	15.97	16.00	0.55%	0.83%	99.17%
#10	2	21.3	21.34	0.74%	1.57%	98.43%
#20	0.85	31.95	32.02	1.11%	2.68%	97.32%
#40	0.43	37.27	37.35	1.29%	3.98%	96.02%
#50	0.3	40.95	41.03	1.42%	5.40%	94.60%
#100	0.15	47.92	48.02	1.66%	7.06%	92.94%
#200	0.075	47.9	48.00	1.66%	8.73%	91.27%
CHAROLA		9.04	2633.23	91.27%	100.00%	
LAVADO		2618.79				
MATERIAL ENSAYADO		260.29				
PESO TOTAL ENSAYADO		2879.08		ERROR	0.21%	



ANEXO D. Análisis granulométrico de material S2



UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO -NTP 339.128



"Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Título de Tesis:

Tesistas: Oscar Jose Dueñas Tito 191671

Jorge Luis Dueñas Tito 171766

Calicata/Cantera: C-1 (Talud expuesto)

Muestra N°: S2

Horno: _____

Metodo A ☐ Tamizado simple (T.M. <3/4" - aprox. 0.01g)

Metodo A ☒ Tamizado Compuesto (T.M. >=3/4" - aprox. 0.01 g)

Total de muestra

Informe N°: Numero 1

Fecha: 31/01/2025

Profundidad: Estrato 2

Balanza: Presicion 0+00g

Metodo A ☐ Tamizado Simple (T.M < N°4 - aprox. 0.001 g)

1. SECADO (M)	Fecha	Hora	Masa
Masa humedad	28/01/2025	12:50	4730
Secado 24 horas	29/01/2025	12:45	4705

Muestra parte gruesa

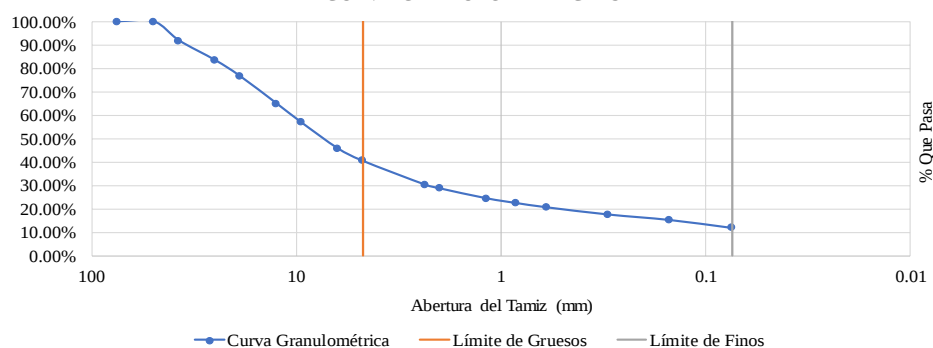
2. LAVADO	Fecha	Hora	Masa
Masa seca (Inicio)	30/01/2025	09:30:00	2830
Secado 24 horas	31/01/1900	10:13:00	2810

Muestra parte fina

2. LAVADO	Fecha	Hora	Masa
Masa seca (Inicio)	30/01/2025	09:30:00	1875
Secado 24 horas	31/01/1900	10:13:00	1336.5

TAMIZ	DIÁMETRO EN (MM)	PESO RETENIDO PARTE GRUESA(gr)	PESO RETENIDO PARTE FINA(gr)	PESO RETENIDO CORREGIDO (gr)	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	% PASA ACUMULADO
3"	75.00	0.00		0.00	0.00%	0.00%	100.00%
2"	50.00	0.00		0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1 1/2"	37.50	384.74		385.16	8.19%	8.19%	91.81%
1"	25.00	391.93		392.36	8.34%	16.53%	83.47%
3/4"	19.00	312.13		312.47	6.64%	23.17%	76.83%
1/2"	12.50	557.22		557.83	11.86%	35.02%	64.98%
3/8"	9.50	373.34		373.75	7.94%	42.97%	57.03%
1/4"	6.30	520.86		521.43	11.08%	54.05%	45.95%
#4	4.75	239.63	12.30	252.21	5.36%	59.41%	40.59%
#8	2.36	30.01	445.67	476.20	10.12%	69.53%	30.47%
#10	2.00		75.05	75.13	1.60%	71.13%	28.87%
#16	1.18		199.92	200.14	4.25%	75.38%	24.62%
#20	0.85		93.33	93.43	1.99%	77.37%	22.63%
#30	0.60		87.02	87.12	1.85%	79.22%	20.78%
#50	0.30		144.53	144.69	3.08%	82.29%	17.71%
#100	0.15		110.35	110.47	2.35%	84.64%	15.36%
#200	0.075		156.80	156.97	3.34%	87.98%	12.02%
CHAROLA			6.50	565.62	12.02%	100.00%	
LAVADO			558.50				
MATERIAL ENSAYADO		2809.86	1331.47				
PESO TOTAL ENSAYADO		4699.83		ERROR	0.11%		

CURVA GRANULOMÉTRICA S2



D10	0.07
D30	2.26
D60	10.67

CU	146.12
Cc	6.54

ANEXO E. Análisis granulométrico de material S3



UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO -NTP 339.128



Título de Tesis: "Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Tesistas: Oscar Jose Dueñas Tito 191671
Jorge Luis Dueñas Tito 161677

Informe N°: Numero 1

Calicata/Cantera: C-1 (Talud expuesto)

Fecha: 31/01/2025

Muestra N°: S3

Profundidad: Tercer estrato

Horno: _____

Balanza: Presicion 0+00g

Metodo A ☐ Tamizado simple (T.M. <3/4" - aprox. 0.01g)

Metodo A ☒ Tamizado Simple (T.M < N°4 - aprox. 0.001 g)

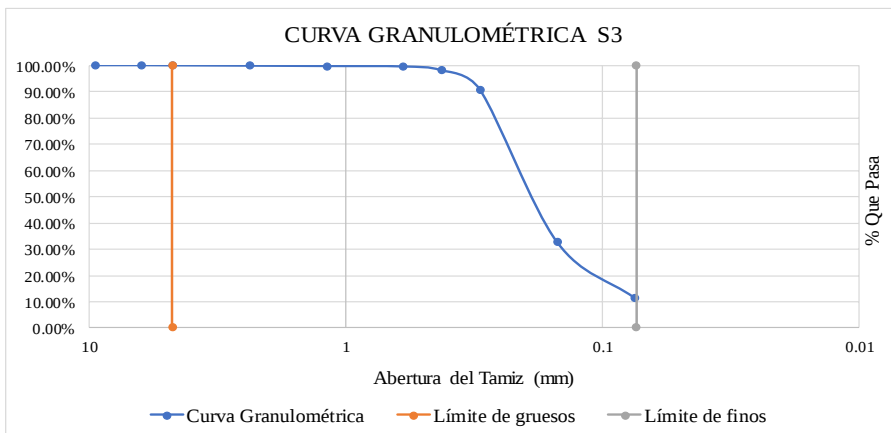
Metodo A ☐ Tamizado Compuesto (T.M.>=3/4" - aprox. 0.01 g))

Material a ensayar:

1. SECADO (M)	Fecha	Hora	Masa
Masa humedad	4/02/2025	11:20:00	1500 gr
Secado "De 12 a 16"	5/05/2025	09:00:00	1320.11

2. LAVADO	Fecha	Hora	Masa
Masa seca (Inicio)	5/02/2025	09:52:00	1320.11
Secado "De 12 a 16 Horas"	4/02/2025	11:41:00	1188.99

TAMIZ	DIÁMETRO EN (MM)	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO CORREGID O (gr)	%RETENID O	%RETENIDO ACUMULADO	% PASA ACUMULADO
1"	25.00	0.00	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
3/4'	19.00	0.00	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
3/8'	9.50	0.00	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
1/4'	6.30	0.00	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
#4	4.75	0.84	0.84	0.06%	0.06%	99.94%
#8	2.36	1.78	1.78	0.14%	0.20%	99.80%
#16	1.18	1.84	1.84	0.14%	0.34%	99.66%
#30	0.60	2.12	2.13	0.16%	0.50%	99.50%
#40	0.43	18.56	18.61	1.41%	1.91%	98.09%
#50	0.30	96.57	96.81	7.33%	9.24%	90.76%
#100	0.15	764.12	766.02	58.03%	67.27%	32.73%
#200	0.08	279.08	279.78	21.19%	88.46%	11.54%
CHAROLA		20.80	152.30	11.54%	100.00%	
LAVADO		131.12		100.00%		
MATERIAL ENSAYADO		1185.71				
PESO TOTAL ENSAYADO		1316.83	ERROR	0.25%		



D10	0.07
D30	0.14373546
D60	0.23913412

CU	3.41620171
Cc	1.23420778

ANEXO F. Análisis granulométrico de material S4



UNSAAC - CEFIC - LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO -NTP 339.128



"Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Título de Tesis:

Tesistas: Oscar Jose Dueñas Tito 191671
Jorge Luis Dueñas Tito 161677

Informe N°: Numero 1

Calicata/Cantera: C-1 (Talud expuesto)

Fecha: 31/01/2025

Muestra N°: S4

Profundidad: Cuarto Estrato

Horno: _____

Balanza: Presicion 0+00g

Metodo A ☐ Tamizado simple (T.M. <3/4" - aprox. 0.01g)

Metodo A ☒ Tamizado Simple (T.M < N°4 - aprox. 0.001 g)

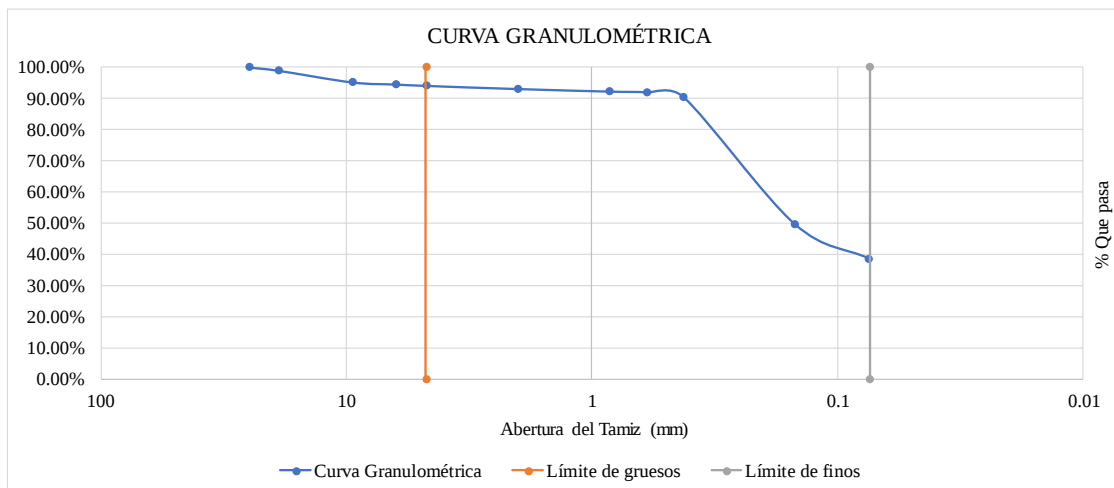
Metodo A ☐ Tamizado Compuesto (T.M.>=3/4" - aprox. 0.01 g)

Material a ensayar:

1. SECADO (M)	Fecha	Hora	Masa
Masa humedad	4/02/2025	11:20:00	4005
Secado "De 12 a 16 Ho	5/05/2025	09:00:00	3895

2. LAVADO	Fecha	Hora	Masa
Masa seca (Inicio)	5/02/2025	09:52:00	3310.00
Secado "De 12 a 16 Ho	4/02/2025	11:41:00	2105.60

TAMIZ	DIÁMETRO EN (MM)	PESO RETENIDO (gr)	PESO RETENIDO CORREGIDO (gr)	%RETENIDO	%RETENIDO ACUMULADO	% PASA ACUMULADO
1"	25	0	0.00	0.00%	0.00%	100.00%
3/4"	19	33.89	33.93	1.03%	1.03%	98.97%
3/8"	9.5	124.6	124.76	3.77%	4.79%	95.21%
1/4"	6.3	22.81	22.84	0.69%	5.48%	94.52%
#4	4.75	14.31	14.33	0.43%	5.92%	94.08%
#10	2	33.87	33.91	1.02%	6.94%	93.06%
#20	0.85	26.97	27.00	0.82%	7.76%	92.24%
#30	0.6	8.4	8.41	0.25%	8.01%	91.99%
#40	0.425	50.43	50.49	1.53%	9.54%	90.46%
#100	0.15	1350.58	1352.27	40.85%	50.39%	49.61%
#200	0.075	364.58	365.04	11.03%	61.42%	38.58%
CHAROLA		71.03	1277.02	38.58%	100.00%	
LAVADO		1204.40		0.00%		
MATERIAL ENSAYADO		2101.47				
PESO TOTAL ENSAYADO		3305.87	ERROR	0.12%		



ANEXO G. Límites de Consistencia material S1



UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA -NTP 339.129

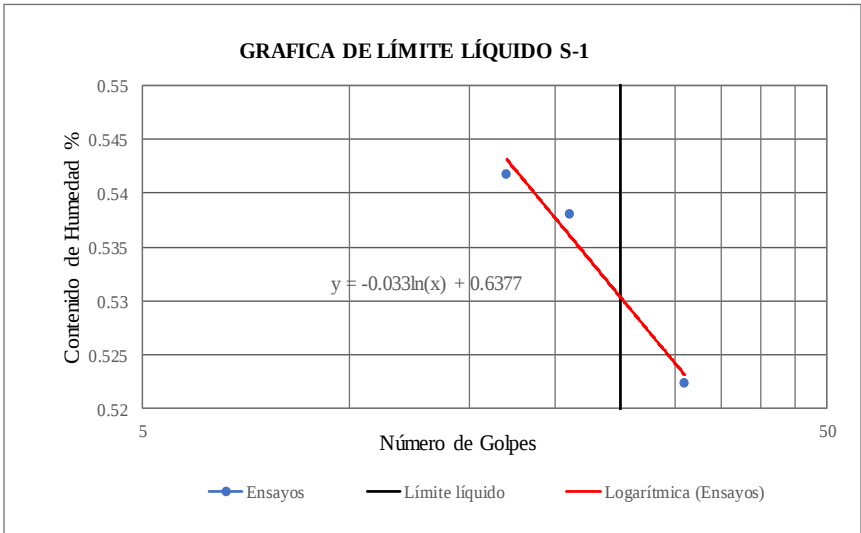


Título de Tesis: "Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Tesistas:	Oscar Jose Dueñas Tito	191671	Informe N°:	Numero 1
	Jorge Luis Dueñas Tito	161677	Calicata.	Estrato 1
Fecha:			Muestra:	S1

LÍMITE LÍQUIDO			
DESCRIPCIÓN	CAPSULAS		
	1	2	3
Descripción de Capsula.	C-8	C-9	C-5
Peso de la cápsula	21.2	21.15	21.77
Peso cápsula. + suelo húmedo	36.31	38.9	34.01
Peso cápsula + suelo seco	31	32.69	29.81
RANGO DE GOLPES	15-25	20-30	25-35
Número de golpes	17	21	31
Peso suelo seco	9.8	11.54	8.04
Peso agua	5.31	6.21	4.2
% humedad	54.18%	53.81%	52.24%

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de cápsula	C-1	C-7	C-6
Peso de la cápsula	21.87	21.59	22.63
Peso cápsula. + suelo húmedo	23.65	23.33	24.35
Peso cápsula + suelo seco	23.27	22.95	23.97
Peso suelo seco	1.4	1.36	1.34
Peso agua	0.38	0.38	0.38
% humedad	27.14%	27.94%	28.36%



Límite líquido	53%
Límite Plástico	28%
IP	25%

ANEXO H. Límites de Consistencia material S2



UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA -NTP 339.129



"Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

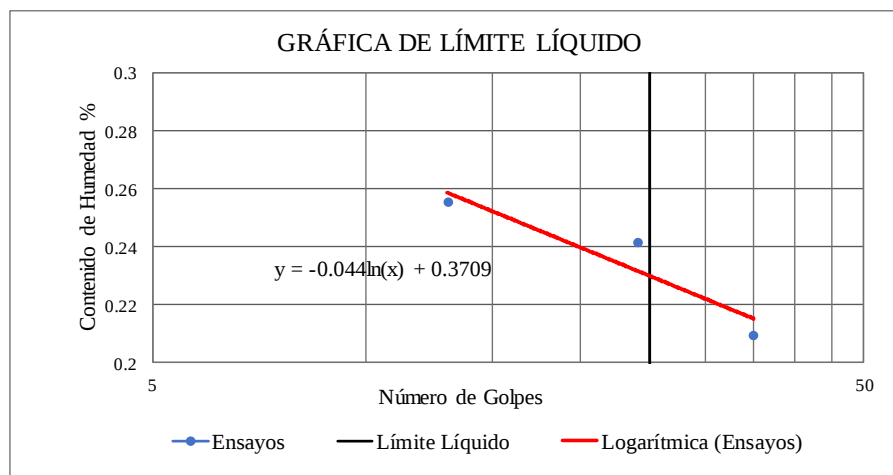
Título de Tesis:

Tesistas: Oscar Jose Dueñas Tito 191671
Jorge Luis Dueñas Tito 161677
 Fecha: _____

Informe N°: Numero 1
 Calicata: Estrato 2
 Muestra: S2

LÍMITE LÍQUIDO			
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de Capsula.	LD3	ML1	ML8
Peso de la cápsula	23.54	25.62	24.5
Peso cápsula. + suelo húmedo	44.21	45.02	45.06
Peso cápsula + suelo seco	40.01	41.25	41.5
RANGO DE GOLPES	15-25	20-30	25-35
Número de golpes	13	24	35
Peso suelo seco	16.47	15.63	17
Peso agua	4.2	3.77	3.56
% humedad	25.50%	24.12%	20.94%

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de cápsula			N.P.
Peso de la cápsula			
Peso cápsula. + suelo húmedo			
Peso cápsula + suelo seco			
Peso suelo seco			
Peso agua			
% humedad			



Límite líquido	23%
Límite Plástico	N.P
IP	N.P

ANEXO I. Límites de Consistencia material S3


UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA -NTP 339.129

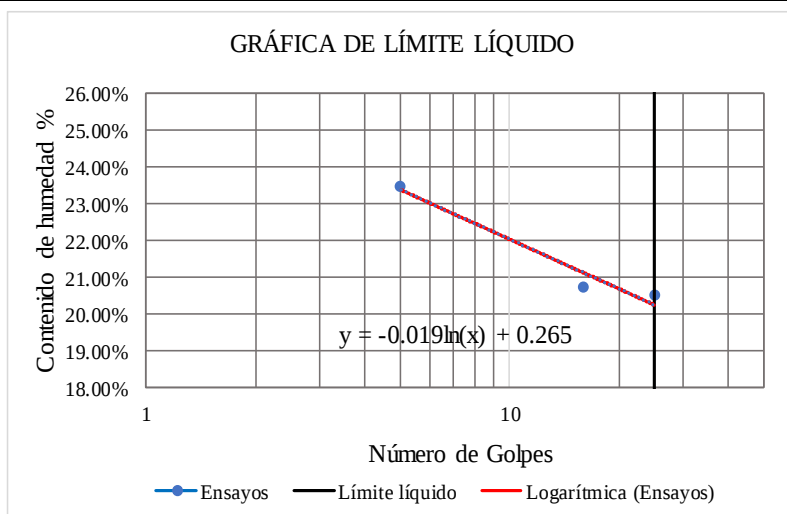

Título de Tesis: "Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Tesistas: Oscar Jose Dueñas Ttito 191671 Informe N°: Numero 1
Jorge Luis Dueñas Ttito 161677 Calicata. _____

Fecha: _____ Muestra: _____

LÍMITE LÍQUIDO				
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS			
	1	2	3	4
Descripción de Capsula.		LB2	H1L	T1
Peso de la cápsula		21.61	21.15	21.67
Peso cápsula. + suelo húmedo		33.24	35	28.77
Peso cápsula + suelo seco		31.26	32.62	27.42
RANGO DE GOLPES	25-35	20-30	15-25	
Número de golpes		25	16	5
Peso suelo seco		9.65	11.47	5.75
Peso agua		1.98	2.38	1.35
% humedad		20.52%	20.75%	23.48%

LÍMITE PLÁSTICO					
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS				
	1	2	3		
Descripción de cápsula	L1d	LB1	H-2L		
Peso de la cápsula	22.32	22.73	21.75		
Peso cápsula. + suelo húmedo	40.43	33.48	36.03		
Peso cápsula + suelo seco	37.59	31.96	33.97		
Peso suelo seco	15.27	9.23	12.22		
Peso agua	2.84	1.52	2.06		
% humedad	18.60%	16.47%	16.86%		



Límite líquido	20%
Límite Plástico	N.P
IP	N.P

ANEXO J. Límites de Consistencia material S4


UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
ENSAYO DE LÍMITES DE CONSISTENCIA -NTP 339.129


Título de Tesis:

"Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Tesisistas:

 Oscar Jose Dueñas Tito 191671
 Jorge Luis Dueñas Tito 161677

Informe N°:

Numero 1

Calicata:

Cuarto estrato

Fecha:

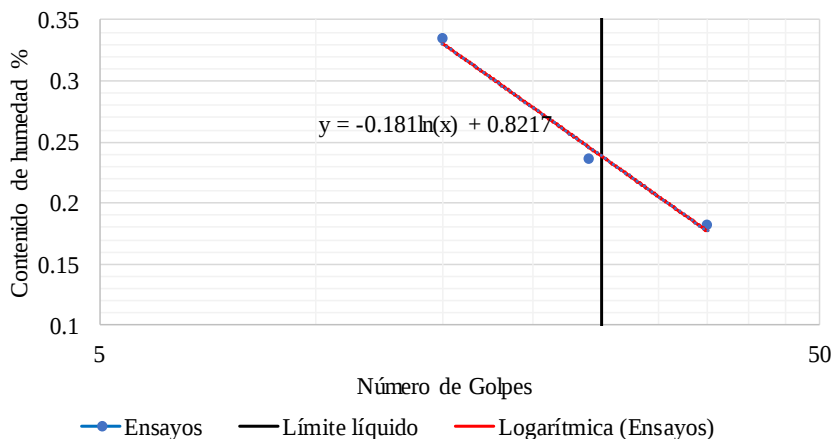
Muestra:

S4

LÍMITE LÍQUIDO			
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de Capsula.	M7	M8	M9
Peso de la cápsula	39.5	37.7	37.24
Peso cápsula. + suelo húmedo	57	52.9	53.26
Peso cápsula + suelo seco	54.3	50	49.24
RANGO DE GOLPES	25-35	20-30	15-25
Número de golpes	35	24	15
Peso suelo seco	14.8	12.3	12
Peso agua	2.7	2.9	4.02
% humedad	18.24%	23.58%	33.50%

LÍMITE PLÁSTICO			
DESCRIPCIÓN	CÁPSULAS		
	1	2	3
Descripción de cápsula	L1d	LB1	
Peso de la cápsula	40	38.2	
Peso cápsula. + suelo húmedo	47.8	48	
Peso cápsula + suelo seco	46.7	46.5	
Peso suelo seco	6.7	8.3	
Peso agua	1.1	1.5	
% humedad	16.42%	18.07%	

GRÁFICA DE LÍMITE LÍQUIDO



Límite líquido	24%
Límite Plástico	17%
IP	7%

ANEXO K. Contenido de Humedad S1 Y S2


UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL - NTP 339.127


Título de Tesis: "Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Tesistas: Oscar Jose Dueñas Tito 191671 Informe N°: Numero 1
Jorge Luis Dueñas Tito 171766
 Calicata/Cantera: C-1 (Talud expuesto) Fecha: 31/01/2025
Muestra N°: S1 **Profundidad:** Primer estrato
 Horno: _____ Balanza: Presición 0+00g

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL NTP 339.127

Prueba N°	1	2	-	-
Tara N°	C-7 o3	C-5	-	-
Masa + Suelo Húmedo (g)	112.17	105.54	-	-
Masa + Suelo Seco (g)	106.02	99.54	-	-
Masa del Agua (g)	6.15	6	-	-
Masa de Tara (g)	21.46	21.77	-	-
Masa de Suelo Seco (cm3)	84.56	77.77	-	-
Contenido de humedad (%)	7.27%	7.72%	-	-
Contenido de humedad (%)	7.49%		-	-

Muestra N°: S2 **Profundidad:** Segundo estrato estrato

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL NTP 339.127

Prueba N°	1	2	-	-
Tara N°	C-9	Ld-4	-	-
Masa + Suelo Húmedo (g)	137.15	151.21	-	-
Masa + Suelo Seco (g)	136.36	150.31	-	-
Masa del Agua (g)	0.79	0.9	-	-
Masa de Tara (g)	21.15	21.6	-	-
Masa de Suelo Seco (cm3)	115.21	128.71	-	-
Contenido de humedad (%)	0.69%	0.70%	-	-
Contenido de humedad (%)	0.69%		-	-

ANEXO L *Contenido de Humedad S3 Y S4*
UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL - NTP 339.127


Título de Tesis: "Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Tesistas: Oscar Jose Dueñas Tito 191671 Informe N°: Numero 1
Jorge Luis Dueñas Tito 161677
 Calicata/Cantera: C-1 (Talud expuesto) Fecha: 31/01/2025
 Muestra N°: S3 Profundidad: Tercer estrato
 Horno: _____ Balanza: Presición 0+00g

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL NTP 339.127

Prueba N°	1	2	-	-
Tara N°	C-1	C-8	-	-
Masa + Suelo Húmedo (g)	142.5	148.7	-	-
Masa + Suelo Seco (g)	129.8	134.8	-	-
Masa del Agua (g)	12.7	13.9	-	-
Masa de Tara (g)	21.87	21.2	-	-
Masa de Suelo Seco (cm3)	107.93	113.60	-	-
Contenido de humedad (%)	11.77%	12.24%	-	-
Contenido de humedad (%)	12.00%		-	-

Muestra N°: S4 Profundidad: Cuarto estrato

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL NTP 339.127

Prueba N°	1	2	-	-
Tara N°	m1	m3	-	-
Masa + Suelo Húmedo (g)	172.2	185.2	-	-
Masa + Suelo Seco (g)	162.5	174.5	-	-
Masa del Agua (g)	9.7	10.7	-	-
Masa de Tara (g)	25.2	24.3	-	-
Masa de Suelo Seco (cm3)	137.30	150.20	-	-
Contenido de humedad (%)	7.06%	7.12%	-	-
Contenido de humedad (%)	7.09%		-	-

ANEXO M. Clasificación S1 Y S2.



UNSAAC - CEFIC - LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS) NTP 339.134
SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (AASHTO) ASTM M-145

**Muestra. S1**

Datos para la clasificación.

DE GRANULOMETRÍA

% de finos=	91.27%
% de gruesos=	8.73%
Total=	100.00%
% de Grava=	0.28%
% de Arena=	8.45%
Total=	8.73%

FRACCIÓN GRUESA

% de Grava=	3.18%
% de Arena=	96.82%
Total=	100.00%

COEFICIENTES

Cu=	-
Cc=	-

DATOS PARA CLASIFICACIÓN

% pasa N° 40 =	96.02%
% pasa N° 200 =	91.27%

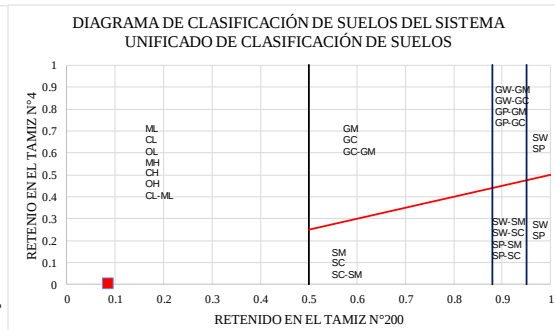
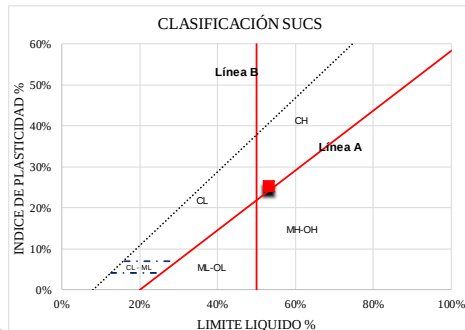
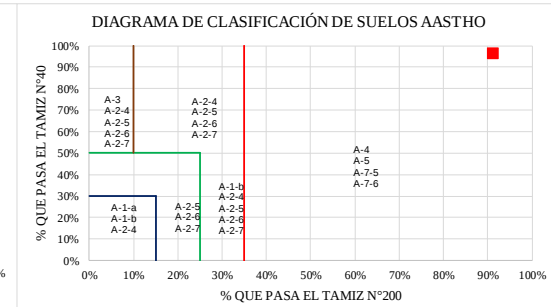
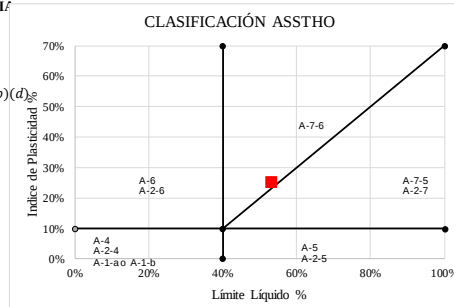
DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

LL=	53%
LP=	28%
IP=	25%

$$= 0.2(a) + 0.005(a)(c) + 0.01(b)(d)$$

INDICE DE GRUPO

a=	40
b=	40
c=	13.1
d=	15.3
IG=	16.8

**CLASIFICACIÓN SUCS :****CH- ARCILLA DE ALTA PLASTICIDAD CON ARENA****CLASIFICACIÓN AASHTO: A-7-6 (17) SUELO ARCILLOSO DE MALA CALIDAD**

Considerando características tipológicas

Muestra. S2**DE GRANULOMETRÍA**

% de finos=	12.02%
% de gruesos=	87.98%
Total=	100.00%
% de Grava=	59.41%
% de Arena=	28.57%
Total=	87.98%

FRACCIÓN GRUESA

% de Grava=	67.53%
% de Arena=	32.47%
Total=	100.00%

COEFICIENTES

Cu=	146.1181829
Cc=	6.537525432

DATOS PARA CLASIFICACIÓN

% pasa N° 40 =	20.78%
% pasa N° 200 =	12.02%

DE LÍMITES DE CONSISTENCIA

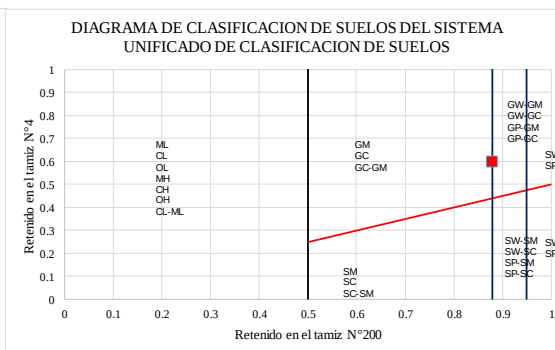
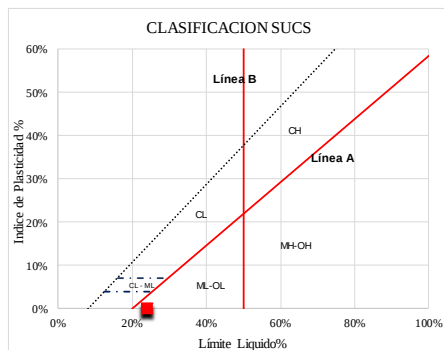
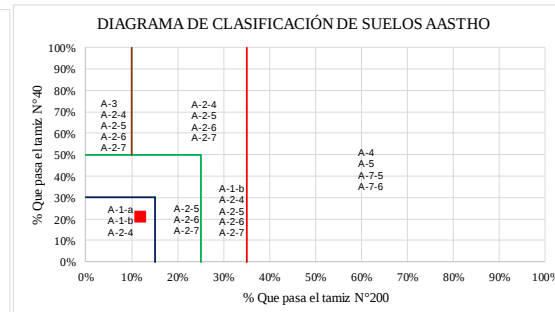
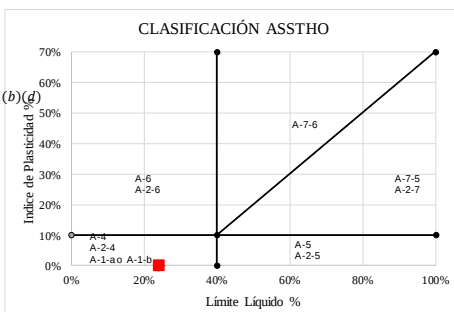
LL=	24%
LP=	NP
IP=	NP

INDICE DE GRUPO

$$IG= 0$$

$$g) = 0.2(a) + 0.005(a)(c) + 0.01(b)(d)$$

a=	0
b=	0
c=	0
d=	0

**CLASIFICACIÓN SUCS****GP-GM****GRAVA PROBEMENTE GRADADA CON LIMO Y ARENA****CLASIFICACIÓN AASHTO A-1-a (0) GRAVA CON FRAGMENTOS DE PIEDRA Y ARENA**

Considerando características tipológicas

ANEXO N. Clasificación S3 Y S4



UNSAAC - CEFIC - LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (SUCS) NTP 339.134 SISTEMA UNIFICADO DE CLASIFICACIÓN DE SUELOS (AASHTO) ASTM M-145



Muestra. S3

Datos para la clasificación.

DE GRANULOMETRIA

% de finos=	11.54%
% de gruesos=	88.46%
Total=	100.00%
% de Grava=	0.06%
% de Arena=	88.40%
Total=	88.46%

FRACCION GRUESA

% de Grava=	0.07%
% de Arena=	99.93%
Total=	100.00%

COEFICIENTES

Cu=	3.416201707
Cc=	1.234207778

DATOS PARA CLASIFICACION

% pasa N° 40 =	98.09%
% pasa N° 200 =	11.54%

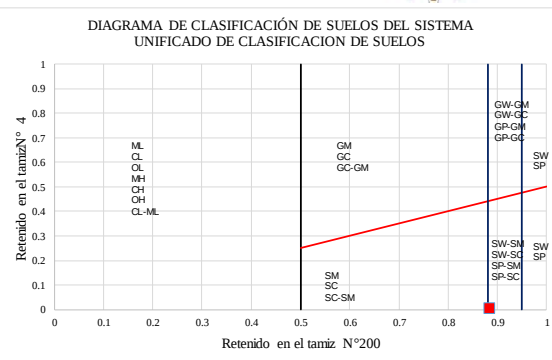
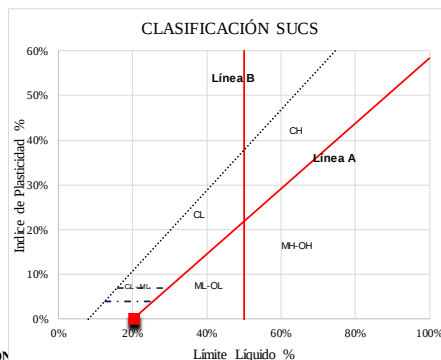
DE LIMITES DE CONSISTENCIA

LL=	20%
LP=	NP
IP=	NP

$$(IG) = 0.2(a) + 0.005(a)(c) + 0.$$

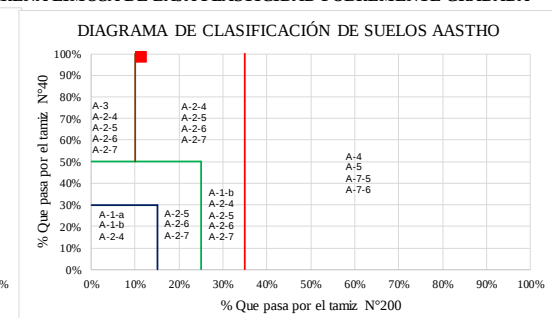
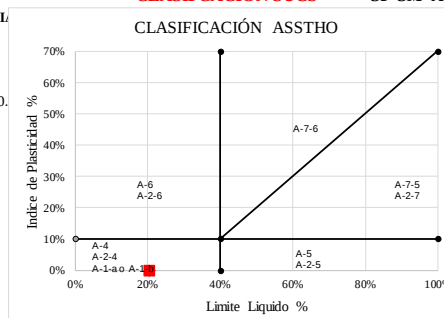
INDICE DE GRUPO

a=	0
b=	0
c=	0.0
d=	0.0
IG=	0.0



CLASIFICACIÓN SUCS

SP-SM ARENA LIMOSA DE BAJA PLASTICIDAD POBREMENTE GRADADA



CLASIFICACION AASHTO

A-2-4 (0) ARENA CON LIMO

Muestra. S4

DE GRANULOMETRIA

% de finos=	38.58%
% de gruesos=	61.42%
Total=	100.00%
% de Grava=	5.92%
% de Arena=	55.50%
Total=	61.42%

FRACCION GRUESA

% de Grava=	9.63%
% de Arena=	90.37%
Total=	100.00%

COEFICIENTES

Cu=	-
Cc=	-

DATOS PARA CLASIFICACION

% pasa N° 40 =	90.46%
% pasa N° 200 =	38.58%

DE LIMITES DE CONSISTENCIA

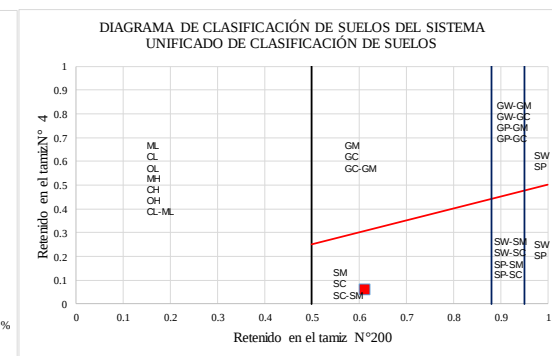
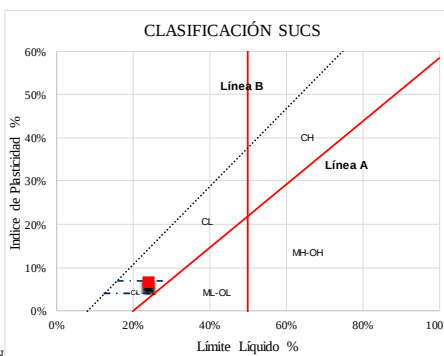
LL=	24%
LP=	17%
IP=	7%

INDICE DE GRUPO

$$IG = 0.716153388$$

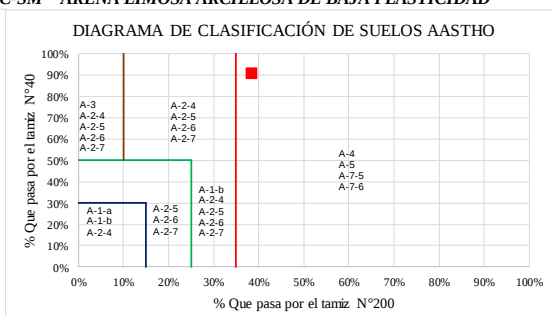
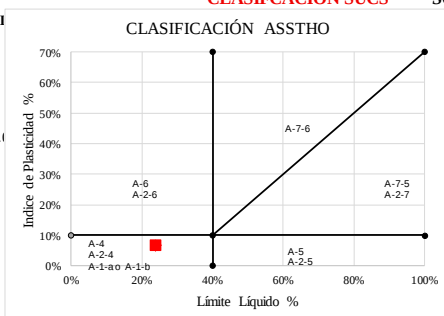
$$(IG) = 0.2(a) + 0.005(a)(c) + 0.$$

a=	3.5808
b=	23.5808
c=	0
d=	0



CLASIFICACIÓN SUCS

SC-SM ARENA LIMOSA ARCILLOSA DE BAJA PLASTICIDAD



CLASIFICACIÓN AASHTO

A-4 (0) ARENA LIMO ARCILLOSA

ANEXO O. Ensayo de Proctor Modificado.



UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS
PROCTOR MODIFICADO - NTP 339.141 o MTC E 115



Título de Tesis: "Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Tesistas: Oscar Jose Dueñas Tito 191671 Calicata. Tercer estrato
Jorge Luis Dueñas Tito 171766 Muestra N°: S3

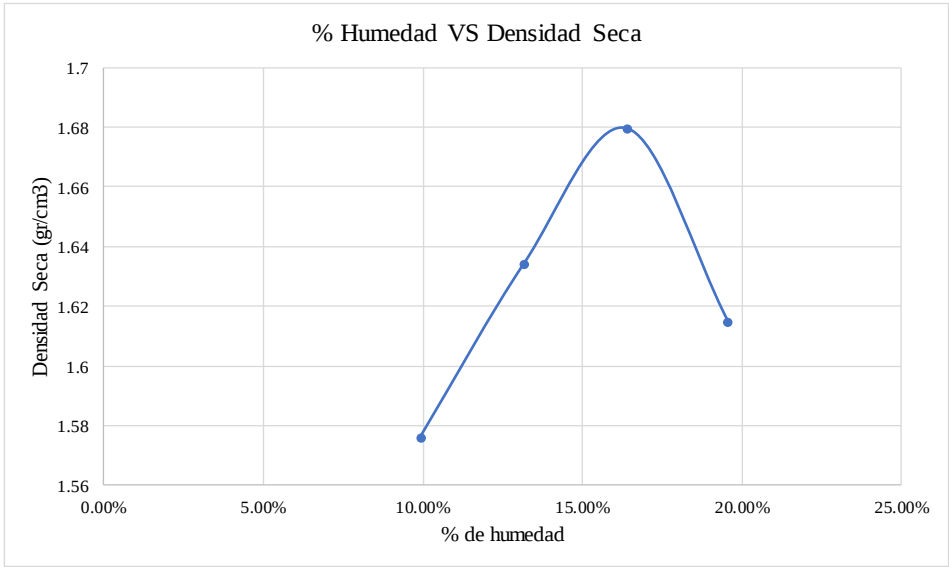
Horno: _____ Masa a ensayar 3300 gr

Compactación

Prueba N°	N°1	N°2	N°3	N°4
N° de Capas	5	5	5	5
N° de golpes por Capa	25	25	25	25
Masa del Molde+Suelo compactado (g)	5868.98	5980.68	6080.93	6057.88
Masa del Molde (g)	4218.56	4218.56	4218.56	4218.56
Masa suelo Compactado (g)	1650.42	1762.12	1862.37	1839.32
Volumen del Molde (cm3)	952.61	952.61	952.61	952.61
Densidad Húmeda (g/cm3)	1.73	1.85	1.96	1.93
Densidad Seca (g/cm3)	1.58	1.63	1.68	1.61

Humedad

Prueba N°	1		2		3		4	
Tara N°	A-3	M-9	G-5	M-2 P5iii	O1-A1	A-10	9-	A-2
Masa + Suelo Húmedo (g)	158.92	141.58	171.32	176.91	154.66	162.41	175.36	165.93
Masa + Suelo Seco (g)	149.79	133.66	158.1	163.19	141.01	146.82	156.09	148.16
Masa del Agua (g)	9.13	7.92	13.22	13.72	13.65	15.59	19.27	17.77
Masa de Tara (g)	56.32	55.13	57.86	59.05	57.73	51.78	57.79	57.18
Masa de Suelo Seco (cm3)	93.47	78.53	100.24	104.14	83.28	95.04	98.3	90.98
Contenido de humedad (%)	9.8%	10.1%	13.2%	13.2%	16.4%	16.4%	19.6%	19.5%
Promedio/Contenido de Humedad (%)	9.9%		13.2%		16.4%		19.6%	



ANEXO P. Ensayo de Densidad Mínima y Máxima.



UNSAAC - CEFIC -LABORATORIO N° - MECÁNICA DE SUELOS DENSIDAD MÍNIMA Y MÁXIMA - NLT-204 y NLT-205



Título de Tesis:

"Evaluación del efecto de la separación entre muros escalonados de concreto armado en el comportamiento mecánico del talud, Cusco-2024"

Tesistas:

Oscar Jose Dueñas Tito 191671
Jorge Luis Dueñas Tito 171766

Calicata.

Tercer estrato

Muestra N°:

S3

Horno:

Masa a ensayar

Densidad Mínima

Prueba N°	N°1	N°2	N°3	
N° de Capas	5	5	5	
N° de golpes por Capa	-	-	-	
Masa del Molde+Suelo compactado (g)	5457.98	5453.88	5455.33	
Masa del Molde (g)	4199.31	4199.31	4199.31	
Masa suelo Compactado (g)	1258.67	1254.57	1256.02	
Volumen del Molde (cm3)	924.23	924.23	924.23	
Densidad Mínima (g/cm3)	1.362	1.357	1.359	
Promedio	1.36			

Densidad Máxima

Prueba N°	N°1	N°2	N°3	N°4
N° de Capas	5	5	5	5
N° de golpes por Capa	25	25	25	25
Masa del Molde+Suelo compactado (g)	5766.46	5763.8	5765.26	5770.5
Masa del Molde (g)	4199.31	4199.31	4199.31	4199.31
Masa suelo Compactado (g)	1567.15	1564.49	1565.95	1571.19
Volumen del Molde (cm3)	924.23	924.23	924.23	924.23
Densidad Húmeda (g/cm3)	1.70	1.69	1.69	1.70
Promedio	1.70			

Densidad prueba	1.65
DR	88%

$$Dr = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

$$Dr = \frac{\gamma_{d\max}}{\gamma_d} \left(\frac{\gamma_d - \gamma_{d\min}}{\gamma_{d\max} - \gamma_{d\min}} \right)$$

ANEXO Q. Datos primitivos de Ensayo triaxial a humedad óptima, $\sigma_3=50\text{kPa}$

DATOS PRIMITIVOS

FECHA: 18/02/2025

PRUEBA NÚMERO 1: TRIAXIAL UU

Remoldeo: # de capas **6**

de golpes **25**

Prop. Suelo.

Peso total obtenido= 2174.98 g
 Peso del molde= 1113.13 g
 Peso del papel= 5 g
 Volumen del molde= 538.78 cm³
Densidad de ensayo= 1.962 g/cm³

Prop. Ensayo

Confinamiento σ_3 = 50 kPa
 Velocidad = 0.42 mm/min

Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga
1	0	0
	10	20
	20	33
	40	55
	60	76
	80	92
2	100	105
	120	115
	140	125
	160	130
	180	135
3	200	138
	220	142
	240	144
	260	147
	280	148.5
4	300	150
	320	151.1
	340	151.15
	360	151.15
	380	151.15
5	400	151.18
	420	152
	440	152.3
	460	153
	480	153.5
6	500	154.5
	520	155.2
	540	156
	560	156.8
	580	157.5

Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga
7	600	157.5
	620	158
	640	158.6
	660	159
	680	159.5
8	700	160
	720	160.1
	740	160.3
	760	160.7
	780	160.9
9	800	160.2
	820	159
	840	158
	860	157
	880	155
10	900	154
	920	152.8
	940	152
	960	152
	980	152.2
11	1000	152.2
	1020	152.1
	1040	152
	1060	152
	1080	152
12	1100	152.1
	1120	152.4

ANEXO R. Datos primitivos de Ensayo triaxial a humedad óptima, $\sigma_3=100\text{kPa}$

DATOS PRIMITIVOS		
PRUEBA NÚMERO 1: TRIAXIAL UU		FECHA: 19/02/2025
Remoldeo:	# de capas 6	# de golpes 25

Prop. Suelo.

Peso total obtenido= 2171.41 g
 Peso del molde= 1113.13 g
 Peso del papel= 5 g
 Volumen del molde= 538.78 cm³
 Densidad de ensayo= 1.955 g/cm³

Prop. Ensayo

Confinamiento σ_3 = 100 kPa
 Velocidad = 0.42 mm/min

Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga
1	0	0.0
	10	25.0
	20	50.0
	40	93.0
	60	125.0
	80	150.0
2	100	170.0
	120	190.0
	140	205.0
	160	220.0
	180	235.0
3	200	253.0
	220	265.0
	240	276.0
	260	283.0
	280	289.0
4	300	294.5
	320	298.5
	340	303.0
	360	308.0
	380	311.0
5	400	314.0
	420	317.0
	440	320.2
	460	323.0
	480	325.0
6	500	327.0
	520	330.0
	540	332.0
	560	334.0
	580	335.8

Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga
7	600	337.2
	620	339.0
	640	340.2
	660	341.6
	680	342.8
8	700	342.8
	720	342.9
	740	343.0
	760	342.3
	780	342.0
9	800	341.5
	820	341.5
	840	341.5
	860	342.0
	880	342.3
10	900	342.8
	920	343.0
	940	343.1
	960	343.8
	980	344.0
11	1000	344.2
	1020	344.2
	1040	344.8
	1060	345.0
	1080	345.1
12	1100	345.0
	1120	345.0
	1140	344.5
	1160	344.0
	1180	343.0
13	1200	341.5
	1220	340.0
	1240	338.0
	1260	336.0
	1280	334.0
	1300	332.0

ANEXO S. Datos primitivos de Ensayo triaxial a humedad óptima, $\sigma_3=200\text{kPa}$

DATOS PRIMITIVOS		
PRUEBA NÚMERO 1: TRIAXIAL UU		FECHA: 20/02/2025
Remoldeo:	# de capas 6	# de golpes 25

Prop. Suelo.

Peso total obtenido= 2177 g
 Peso del molde= 1113.13 g
 Peso del papel= 5 g
 Volumen del molde= 538.78 cm³
 Densidad de ensayo= 1.965 g/cm³

Prop. Ensayo

Confinamiento σ_3 = 200 kPa
 Velocidad = 0.42 mm/min

Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga	Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga	Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga
1	0	0.0	6	500	603.5	12	1100	680.0
	5	19.0		520	608.0		1120	680.2
	10	42.0		540	611.8		1140	680.5
	15	60.0		560	618.8		1160	681.0
	20	79.0		580	623.0		1180	681.8
	30	111.0	7	600	626.5	13	1200	682.8
	40	142.0		620	629.5		1220	684.5
	50	172.0		640	633.1		1240	685.3
	60	200.0		660	637.0		1260	687.1
	70	226.0		680	641.0		1280	688.0
2	80	250.0	8	700	645.0	14	1300	688.3
	100	291.0		720	648.0		1320	689.0
	120	325.0		740	651.7		1340	689.0
	140	357.0		760	655.0		1360	689.0
	160	385.0		780	659.0		1380	688.0
3	180	410.0	9	800	662.9	15	1400	686.8
	200	431.0		820	655.5		1420	685.0
	220	449.0		840	669.5		1440	682.8
	240	466.0		860	670.0		1460	680.5
	260	482.0		880	672.3		1480	677.5
4	280	497.0	10	900	673.6	16	1500	675.0
	300	511.0		920	675.0		1520	671.5
	320	522.0		940	675.6		1540	668.0
	340	533.5		960	676.3			
	360	552.0		980	676.7			
5	380	556.0	11	1000	677.3			
	400	566.0		1020	678.0			
	420	575.0		1040	678.7			
	440	583.0		1060	679.0			
	460	590.5		1080	679.7			
	480	596.0						

ANEXO T. Datos de esfuerzos bajo deformación unitaria y dirección de esfuerzos p y q en ensayo a Humedad Óptima.

σ_3	50	kPa				σ_3	100	kPa				σ_3	200	kPa			
50 kPa						100 kPa						200 kPa					
e	kPa σ_d	kPa σ_1	kPa σ_3	kPa p	kPa q	e	kPa σ_d	kPa σ_1	kPa σ_3	kPa p	kPa q	e	kPa σ_d	kPa σ_1	kPa σ_3	kPa p	kPa q
0.00%	3.17	53.17	50.00	51.58	1.58	0.00%	3.17	103.17	100.00	101.58	1.58	0.00%	3.17	203.17	200.00	201.58	1.58
0.07%	23.73	73.73	50.00	61.87	11.87	0.07%	28.88	128.88	100.00	114.44	14.44	0.04%	22.71	222.71	200.00	211.36	11.36
0.14%	37.08	87.08	50.00	68.54	18.54	0.14%	54.55	154.55	100.00	127.27	27.27	0.07%	46.36	246.36	200.00	223.18	23.18
0.29%	59.60	109.60	50.00	79.80	29.80	0.29%	98.60	198.60	100.00	149.30	49.30	0.11%	64.85	264.85	200.00	232.42	32.42
0.43%	81.04	131.04	50.00	90.52	40.52	0.43%	131.25	231.25	100.00	165.63	65.63	0.14%	84.35	284.35	200.00	242.18	42.18
0.57%	97.29	147.29	50.00	98.65	48.65	0.57%	156.65	256.65	100.00	178.32	78.32	0.21%	117.16	317.16	200.00	258.58	58.58
0.71%	110.44	160.44	50.00	105.22	55.22	0.71%	176.86	276.86	100.00	188.43	88.43	0.29%	148.89	348.89	200.00	274.44	74.44
0.86%	120.48	170.48	50.00	110.24	60.24	0.86%	197.01	297.01	100.00	198.51	98.51	0.36%	179.55	379.55	200.00	289.77	89.77
1.00%	130.50	180.50	50.00	115.25	65.25	1.00%	212.01	312.01	100.00	206.01	106.01	0.43%	208.11	408.11	200.00	304.06	104.06
1.14%	135.40	185.40	50.00	117.70	67.70	1.14%	226.97	326.97	100.00	213.49	113.49	0.50%	234.59	434.59	200.00	317.30	117.30
1.29%	140.28	190.28	50.00	120.14	70.14	1.29%	241.88	341.88	100.00	220.94	120.94	0.57%	258.98	458.98	200.00	329.49	129.49
1.43%	143.12	193.12	50.00	121.56	71.56	1.43%	259.79	359.79	100.00	229.90	129.90	0.71%	300.51	500.51	200.00	350.25	150.25
1.57%	146.97	196.97	50.00	123.48	73.48	1.57%	271.57	371.57	100.00	235.79	135.79	0.86%	334.77	534.77	200.00	367.38	167.38
1.71%	148.78	198.78	50.00	124.39	74.39	1.71%	282.31	382.31	100.00	241.15	141.15	1.00%	366.89	566.89	200.00	383.45	183.45
1.86%	151.59	201.59	50.00	125.80	75.80	1.86%	288.97	388.97	100.00	244.48	144.48	1.14%	394.85	594.85	200.00	397.43	197.43
2.00%	152.88	202.88	50.00	126.44	76.44	2.00%	294.60	394.60	100.00	247.30	147.30	1.29%	419.68	619.68	200.00	409.84	209.84
2.14%	154.17	204.17	50.00	127.09	77.09	2.14%	299.71	399.71	100.00	249.85	149.85	1.43%	440.38	640.38	200.00	420.19	220.19
2.29%	155.05	205.05	50.00	127.53	77.53	2.29%	303.29	403.29	100.00	251.65	151.65	1.57%	457.97	657.97	200.00	428.99	228.99
2.43%	154.88	204.88	50.00	127.44	77.44	2.43%	307.37	407.37	100.00	253.68	153.68	1.71%	474.51	674.51	200.00	437.25	237.25
2.57%	154.65	204.65	50.00	127.33	77.33	2.57%	311.93	411.93	100.00	255.97	155.97	1.86%	489.98	689.98	200.00	444.99	244.99
2.71%	154.42	204.42	50.00	127.21	77.21	2.71%	314.48	414.48	100.00	257.24	157.24	2.00%	504.39	704.39	200.00	452.20	252.20
2.86%	154.23	204.23	50.00	127.11	77.11	2.86%	317.02	417.02	100.00	258.51	158.51	2.14%	517.76	717.76	200.00	458.88	258.88
3.00%	154.82	204.82	50.00	127.41	77.41	3.00%	319.55	419.55	100.00	259.77	159.77	2.29%	528.07	728.07	200.00	464.03	264.03
3.14%	154.89	204.89	50.00	127.44	77.44	3.14%	322.26	422.26	100.00	261.13	161.13	2.43%	538.84	738.84	200.00	469.42	269.42
3.29%	155.36	205.36	50.00	127.68	77.68	3.29%	324.58	424.58	100.00	262.29	162.29	2.57%	556.60	756.60	200.00	478.30	278.30
3.43%	155.63	205.63	50.00	127.81	77.81	3.43%	326.09	426.09	100.00	263.04	163.04	2.71%	559.79	759.79	200.00	479.90	279.90
3.57%	156.39	206.39	50.00	128.19	78.19	3.57%	327.59	427.59	100.00	263.79	163.79	2.86%	568.97	768.97	200.00	484.48	284.48

3.71%	156.85	206.85	50.00	128.42	78.42	3.71%	330.08	430.08	100.00	265.04	165.04	3.00%	577.12	777.12	200.00	488.56	288.56
3.86%	157.41	207.41	50.00	128.70	78.70	3.86%	331.56	431.56	100.00	265.78	165.78	3.14%	584.24	784.24	200.00	492.12	292.12
4.00%	157.97	207.97	50.00	128.98	78.98	4.00%	333.05	433.05	100.00	266.52	166.52	3.29%	590.85	790.85	200.00	495.42	295.42
4.14%	158.42	208.42	50.00	129.21	79.21	4.14%	334.33	434.33	100.00	267.16	167.16	3.43%	595.44	795.44	200.00	497.72	297.72
4.29%	158.18	208.18	50.00	129.09	79.09	4.29%	335.21	435.21	100.00	267.60	167.60	3.57%	602.00	802.00	200.00	501.00	301.00
4.43%	158.44	208.44	50.00	129.22	79.22	4.43%	336.48	436.48	100.00	268.24	168.24	3.71%	605.57	805.57	200.00	502.79	302.79
4.57%	158.79	208.79	50.00	129.40	79.40	4.57%	337.16	437.16	100.00	268.58	168.58	3.86%	608.43	808.43	200.00	504.22	304.22
4.71%	158.95	208.95	50.00	129.47	79.47	4.71%	338.02	438.02	100.00	269.01	169.01	4.00%	614.45	814.45	200.00	507.22	307.22
4.86%	159.20	209.20	50.00	129.60	79.60	4.86%	338.69	438.69	100.00	269.35	169.35	4.14%	617.67	817.67	200.00	508.84	308.84
5.00%	159.45	209.45	50.00	129.72	79.72	5.00%	338.18	438.18	100.00	269.09	169.09	4.29%	620.20	820.20	200.00	510.10	310.10
5.14%	159.31	209.31	50.00	129.65	79.65	5.14%	337.77	437.77	100.00	268.89	168.89	4.43%	622.23	822.23	200.00	511.11	311.11
5.29%	159.26	209.26	50.00	129.63	79.63	5.29%	337.36	437.36	100.00	268.68	168.68	4.57%	624.83	824.83	200.00	512.42	312.42
5.43%	159.41	209.41	50.00	129.71	79.71	5.43%	336.17	436.17	100.00	268.09	168.09	4.71%	627.72	827.72	200.00	513.86	313.86
5.57%	159.36	209.36	50.00	129.68	79.68	5.57%	335.37	435.37	100.00	267.69	167.69	4.86%	630.70	830.70	200.00	515.35	315.35
5.71%	158.44	208.44	50.00	129.22	79.22	5.71%	334.38	434.38	100.00	267.19	167.19	5.00%	633.66	833.66	200.00	516.83	316.83
5.86%	157.04	207.04	50.00	128.52	78.52	5.86%	333.87	433.87	100.00	266.94	166.94	5.14%	635.64	835.64	200.00	517.82	317.82
6.00%	155.84	205.84	50.00	127.92	77.92	6.00%	333.37	433.37	100.00	266.68	166.68	5.29%	638.29	838.29	200.00	519.14	319.14
6.14%	154.63	204.63	50.00	127.32	77.32	6.14%	333.34	433.34	100.00	266.67	166.67	5.43%	640.54	840.54	200.00	520.27	320.27
6.29%	152.47	202.47	50.00	126.23	76.23	6.29%	333.12	433.12	100.00	266.56	166.56	5.57%	643.46	843.46	200.00	521.73	321.73
6.43%	151.27	201.27	50.00	125.64	75.64	6.43%	333.10	433.10	100.00	266.55	166.55	5.71%	646.27	846.27	200.00	523.13	323.13
6.57%	149.89	199.89	50.00	124.94	74.94	6.57%	332.78	432.78	100.00	266.39	166.39	5.86%	638.12	838.12	200.00	519.06	319.06
6.71%	148.89	198.89	50.00	124.45	74.45	6.71%	332.37	432.37	100.00	266.18	166.18	6.00%	650.70	850.70	200.00	525.35	325.35
6.86%	148.66	198.66	50.00	124.33	74.33	6.86%	332.53	432.53	100.00	266.27	166.27	6.14%	650.19	850.19	200.00	525.09	325.09
7.00%	148.63	198.63	50.00	124.31	74.31	7.00%	332.21	432.21	100.00	266.11	166.11	6.29%	651.42	851.42	200.00	525.71	325.71
7.14%	148.40	198.40	50.00	124.20	74.20	7.14%	331.89	431.89	100.00	265.95	165.95	6.43%	651.68	851.68	200.00	525.84	325.84
7.29%	148.07	198.07	50.00	124.04	74.04	7.29%	331.38	431.38	100.00	265.69	165.69	6.57%	652.03	852.03	200.00	526.01	326.01
7.43%	147.75	197.75	50.00	123.88	73.88	7.43%	331.44	431.44	100.00	265.72	165.72	6.71%	651.61	851.61	200.00	525.80	325.80
7.57%	147.52	197.52	50.00	123.76	73.76	7.57%	331.12	431.12	100.00	265.56	165.56	6.86%	651.28	851.28	200.00	525.64	325.64
7.71%	147.29	197.29	50.00	123.65	73.65	7.71%	330.71	430.71	100.00	265.35	165.35	7.00%	650.66	850.66	200.00	525.33	325.33

ANEXO U. Datos para la estimación lineal y obtención de "a" y "b" M. Hiperbólico.

σ_3	b	a
50	0.0058974	0.0000191
100	0.0025801	0.0000189
200	0.0012907	0.0000141

	50	100	200
e	e/ σ_d (50kPa)	e/ σ_d (100kPa)	e/ σ_d (200kPa)
0.00%	0.000000	0.000000	0.000000
0.07%	0.000030	0.000025	0.000015
0.14%	0.000039	0.000026	0.000017
0.29%	0.000048	0.000029	0.000019
0.43%	0.000053	0.000033	0.000021
0.57%	0.000059	0.000036	0.000022
0.71%	0.000065	0.000040	0.000024
0.86%	0.000071	0.000044	0.000026
1.00%	0.000077	0.000047	0.000027
1.14%	0.000084	0.000050	0.000029
1.29%	0.000092	0.000053	0.000031
1.43%	0.000100	0.000055	0.000032
1.57%	0.000107	0.000058	0.000034
1.71%	0.000115	0.000061	0.000036
1.86%	0.000123	0.000064	0.000038
2.00%	0.000131	0.000068	0.000040
2.14%	0.000139	0.000071	0.000041
2.29%	0.000147	0.000075	0.000043
2.43%	0.000157	0.000079	0.000045
2.57%	0.000166	0.000082	0.000046
2.71%	0.000176	0.000086	0.000048
2.86%	0.000185	0.000090	0.000050
3.00%	0.000194	0.000094	0.000052
3.14%	0.000203	0.000098	0.000054
3.29%	0.000211	0.000101	0.000056
3.43%	0.000220	0.000105	0.000058
3.57%	0.000228	0.000109	0.000059
3.71%	0.000237	0.000113	0.000061
3.86%	0.000245	0.000116	0.000063
4.00%	0.000253	0.000120	0.000065
4.14%	0.000262	0.000124	0.000067
4.29%	0.000271	0.000128	0.000069
4.43%	0.000280	0.000132	0.000071
4.57%	0.000288	0.000136	0.000073
4.71%	0.000297	0.000139	0.000075
4.86%	0.000305	0.000143	0.000077
5.00%	0.000314	0.000148	0.000079
5.14%	0.000323	0.000152	0.000081
5.29%	0.000332	0.000157	0.000083
5.43%	0.000341	0.000161	0.000085
5.57%	0.000350	0.000166	0.000087
5.71%	0.000361	0.000171	0.000088
5.86%	0.000373	0.000175	0.000092
6.00%	0.000385	0.000180	0.000092

ANEXO V. Datos de calibración para modelo de HARDENING SOIL

Hardening50		Hardening100		Hardening200		HardREF 100	
e	σ_d	e	σ_d	e	σ_d	e	σ_d
0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00
0.07%	23.09	0.07%	35.08	0.07%	52.87	0.07%	35.08
0.14%	41.05	0.14%	64.09	0.14%	98.69	0.14%	64.09
0.29%	67.19	0.29%	109.25	0.29%	174.15	0.29%	109.25
0.43%	85.29	0.43%	142.79	0.43%	233.72	0.43%	142.79
0.57%	98.57	0.57%	168.68	0.57%	281.94	0.57%	168.68
0.71%	108.73	0.71%	189.27	0.71%	321.77	0.71%	189.27
0.86%	116.75	0.86%	206.04	0.86%	355.22	0.86%	206.04
1.00%	123.24	1.00%	219.96	1.00%	383.72	1.00%	219.96
1.14%	128.60	1.14%	231.70	1.14%	408.28	1.14%	231.70
1.29%	133.11	1.29%	241.73	1.29%	429.68	1.29%	241.73
1.43%	136.95	1.43%	250.41	1.43%	448.48	1.43%	250.41
1.57%	140.26	1.57%	257.99	1.57%	465.13	1.57%	257.99
1.71%	143.14	1.71%	264.66	1.71%	479.98	1.71%	264.66
1.86%	145.67	1.86%	270.58	1.86%	493.30	1.86%	270.58
2.00%	147.92	2.00%	275.87	2.00%	505.33	2.00%	275.87
2.14%	149.92	2.14%	280.63	2.14%	516.24	2.14%	280.63
2.29%	151.71	2.29%	284.93	2.29%	526.18	2.29%	284.93
2.43%	153.33	2.43%	288.83	2.43%	535.27	2.43%	288.83
2.57%	154.80	2.57%	292.39	2.57%	543.62	2.57%	292.39
2.71%	156.14	2.71%	295.65	2.71%	551.31	2.71%	295.65
2.86%	157.37	2.86%	298.65	2.86%	558.43	2.86%	298.65
3.00%	158.50	3.00%	301.41	3.00%	565.02	3.00%	301.41
3.14%	159.53	3.14%	303.97	3.14%	571.16	3.14%	303.97
3.29%	160.49	3.29%	306.35	3.29%	576.88	3.29%	306.35
3.43%	161.38	3.43%	308.55	3.43%	582.22	3.43%	308.55
3.57%	162.21	3.57%	310.61	3.57%	587.22	3.57%	310.61
3.71%	162.98	3.71%	312.54	3.71%	591.92	3.71%	312.54
3.86%	163.70	3.86%	314.35	3.86%	596.33	3.86%	314.35
4.00%	164.37	4.00%	316.04	4.00%	600.49	4.00%	316.04
4.14%	165.01	4.14%	317.64	4.14%	604.42	4.14%	317.64
4.29%	165.60	4.29%	319.14	4.29%	608.13	4.29%	319.14
4.43%	166.16	4.43%	320.56	4.43%	611.64	4.43%	320.56
4.57%	166.69	4.57%	321.90	4.57%	614.97	4.57%	321.90
4.71%	167.19	4.71%	323.17	4.71%	618.13	4.71%	323.17
4.86%	167.67	4.86%	324.38	4.86%	621.13	4.86%	324.38
5.00%	168.11	5.00%	325.52	5.00%	623.99	5.00%	325.52
5.14%	168.54	5.14%	326.61	5.14%	626.72	5.14%	326.61
5.29%	168.95	5.29%	327.65	5.29%	629.32	5.29%	327.65
5.43%	169.33	5.43%	328.63	5.43%	631.80	5.43%	328.63
5.57%	169.70	5.57%	329.58	5.57%	634.17	5.57%	329.58
5.71%	170.05	5.71%	330.48	5.71%	636.45	5.71%	330.48
5.86%	170.38	5.86%	331.34	5.86%	638.62	5.86%	331.34
6.00%	170.70	6.00%	332.16	6.00%	640.71	6.00%	332.16

ANEXO W. Datos de calibración para modelo de Hardening Soil, PLAXIS (SOIL TEST)

Calibración HS 50kPa			Calibración HS 100kPa			Calibración HS 200kPa		
e	ed	e	e	ed	e	e	ed	e
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
-6.00E-04	1.86E+01	6.00E-04	-6.00E-04	2.72E+01	6.00E-04	-6.00E-04	3.94E+01	6.00E-04
-1.20E-03	3.36E+01	1.20E-03	-1.20E-03	5.04E+01	1.20E-03	-1.20E-03	7.45E+01	1.20E-03
-1.80E-03	4.62E+01	1.80E-03	-1.80E-03	7.06E+01	1.80E-03	-1.80E-03	1.06E+02	1.80E-03
-2.40E-03	5.69E+01	2.40E-03	-2.40E-03	8.85E+01	2.40E-03	-2.40E-03	1.35E+02	2.40E-03
-3.00E-03	6.60E+01	3.00E-03	-3.00E-03	1.04E+02	3.00E-03	-3.00E-03	1.61E+02	3.00E-03
-3.60E-03	7.40E+01	3.60E-03	-3.60E-03	1.19E+02	3.60E-03	-3.60E-03	1.85E+02	3.60E-03
-4.20E-03	8.11E+01	4.20E-03	-4.20E-03	1.31E+02	4.20E-03	-4.20E-03	2.07E+02	4.20E-03
-4.80E-03	8.73E+01	4.80E-03	-4.80E-03	1.43E+02	4.80E-03	-4.80E-03	2.28E+02	4.80E-03
-5.40E-03	9.28E+01	5.40E-03	-5.40E-03	1.54E+02	5.40E-03	-5.40E-03	2.47E+02	5.40E-03
-6.00E-03	9.77E+01	6.00E-03	-6.00E-03	1.63E+02	6.00E-03	-6.00E-03	2.65E+02	6.00E-03
-6.60E-03	1.02E+02	6.60E-03	-6.60E-03	1.72E+02	6.60E-03	-6.60E-03	2.81E+02	6.60E-03
-7.20E-03	1.06E+02	7.20E-03	-7.20E-03	1.80E+02	7.20E-03	-7.20E-03	2.97E+02	7.20E-03
-7.80E-03	1.10E+02	7.80E-03	-7.80E-03	1.88E+02	7.80E-03	-7.80E-03	3.11E+02	7.80E-03
-8.40E-03	1.13E+02	8.40E-03	-8.40E-03	1.95E+02	8.40E-03	-8.40E-03	3.25E+02	8.40E-03
-9.00E-03	1.16E+02	9.00E-03	-9.00E-03	2.01E+02	9.00E-03	-9.00E-03	3.37E+02	9.00E-03
-9.60E-03	1.19E+02	9.60E-03	-9.60E-03	2.07E+02	9.60E-03	-9.60E-03	3.49E+02	9.60E-03
-1.02E-02	1.22E+02	1.02E-02	-1.02E-02	2.13E+02	1.02E-02	-1.02E-02	3.61E+02	1.02E-02
-1.08E-02	1.24E+02	1.08E-02	-1.08E-02	2.18E+02	1.08E-02	-1.08E-02	3.71E+02	1.08E-02
-1.14E-02	1.26E+02	1.14E-02	-1.14E-02	2.23E+02	1.14E-02	-1.14E-02	3.82E+02	1.14E-02
-1.20E-02	1.29E+02	1.20E-02	-1.20E-02	2.27E+02	1.20E-02	-1.20E-02	3.91E+02	1.20E-02
-1.26E-02	1.31E+02	1.26E-02	-1.26E-02	2.32E+02	1.26E-02	-1.26E-02	4.00E+02	1.26E-02
-1.32E-02	1.32E+02	1.32E-02	-1.32E-02	2.36E+02	1.32E-02	-1.32E-02	4.09E+02	1.32E-02
-1.38E-02	1.34E+02	1.38E-02	-1.38E-02	2.40E+02	1.38E-02	-1.38E-02	4.17E+02	1.38E-02
-1.44E-02	1.36E+02	1.44E-02	-1.44E-02	2.43E+02	1.44E-02	-1.44E-02	4.25E+02	1.44E-02
-1.50E-02	1.37E+02	1.50E-02	-1.50E-02	2.47E+02	1.50E-02	-1.50E-02	4.32E+02	1.50E-02
-1.56E-02	1.39E+02	1.56E-02	-1.56E-02	2.50E+02	1.56E-02	-1.56E-02	4.40E+02	1.56E-02
-1.62E-02	1.40E+02	1.62E-02	-1.62E-02	2.53E+02	1.62E-02	-1.62E-02	4.46E+02	1.62E-02
-1.68E-02	1.41E+02	1.68E-02	-1.68E-02	2.56E+02	1.68E-02	-1.68E-02	4.53E+02	1.68E-02
-1.74E-02	1.43E+02	1.74E-02	-1.74E-02	2.59E+02	1.74E-02	-1.74E-02	4.59E+02	1.74E-02
-1.80E-02	1.44E+02	1.80E-02	-1.80E-02	2.62E+02	1.80E-02	-1.80E-02	4.65E+02	1.80E-02
-1.86E-02	1.45E+02	1.86E-02	-1.86E-02	2.65E+02	1.86E-02	-1.86E-02	4.71E+02	1.86E-02
-1.92E-02	1.46E+02	1.92E-02	-1.92E-02	2.67E+02	1.92E-02	-1.92E-02	4.77E+02	1.92E-02
-1.98E-02	1.47E+02	1.98E-02	-1.98E-02	2.69E+02	1.98E-02	-1.98E-02	4.82E+02	1.98E-02
-2.04E-02	1.48E+02	2.04E-02	-2.04E-02	2.72E+02	2.04E-02	-2.04E-02	4.87E+02	2.04E-02
-2.10E-02	1.49E+02	2.10E-02	-2.10E-02	2.74E+02	2.10E-02	-2.10E-02	4.92E+02	2.10E-02
-2.16E-02	1.50E+02	2.16E-02	-2.16E-02	2.76E+02	2.16E-02	-2.16E-02	4.97E+02	2.16E-02
-2.22E-02	1.50E+02	2.22E-02	-2.22E-02	2.78E+02	2.22E-02	-2.22E-02	5.01E+02	2.22E-02
-2.28E-02	1.51E+02	2.28E-02	-2.28E-02	2.80E+02	2.28E-02	-2.28E-02	5.06E+02	2.28E-02
-2.34E-02	1.52E+02	2.34E-02	-2.34E-02	2.82E+02	2.34E-02	-2.34E-02	5.10E+02	2.34E-02

-2.40E-02	1.53E+02	2.40E-02	-2.40E-02	2.84E+02	2.40E-02	-2.40E-02	5.14E+02	2.40E-02
-2.46E-02	1.53E+02	2.46E-02	-2.46E-02	2.85E+02	2.46E-02	-2.46E-02	5.18E+02	2.46E-02
-2.52E-02	1.54E+02	2.52E-02	-2.52E-02	2.87E+02	2.52E-02	-2.52E-02	5.22E+02	2.52E-02
-2.58E-02	1.54E+02	2.58E-02	-2.58E-02	2.88E+02	2.58E-02	-2.58E-02	5.26E+02	2.58E-02
-2.64E-02	1.55E+02	2.64E-02	-2.64E-02	2.90E+02	2.64E-02	-2.64E-02	5.30E+02	2.64E-02
-2.70E-02	1.56E+02	2.70E-02	-2.70E-02	2.91E+02	2.70E-02	-2.70E-02	5.33E+02	2.70E-02
-2.76E-02	1.56E+02	2.76E-02	-2.76E-02	2.93E+02	2.76E-02	-2.76E-02	5.37E+02	2.76E-02
-2.82E-02	1.57E+02	2.82E-02	-2.82E-02	2.94E+02	2.82E-02	-2.82E-02	5.40E+02	2.82E-02
-2.88E-02	1.57E+02	2.88E-02	-2.88E-02	2.96E+02	2.88E-02	-2.88E-02	5.43E+02	2.88E-02
-2.94E-02	1.58E+02	2.94E-02	-2.94E-02	2.97E+02	2.94E-02	-2.94E-02	5.46E+02	2.94E-02
-3.00E-02	1.58E+02	3.00E-02	-3.00E-02	2.98E+02	3.00E-02	-3.00E-02	5.49E+02	3.00E-02
-3.06E-02	1.59E+02	3.06E-02	-3.06E-02	2.99E+02	3.06E-02	-3.06E-02	5.52E+02	3.06E-02
-3.12E-02	1.59E+02	3.12E-02	-3.12E-02	3.00E+02	3.12E-02	-3.12E-02	5.55E+02	3.12E-02
-3.18E-02	1.59E+02	3.18E-02	-3.18E-02	3.01E+02	3.18E-02	-3.18E-02	5.58E+02	3.18E-02
-3.24E-02	1.60E+02	3.24E-02	-3.24E-02	3.03E+02	3.24E-02	-3.24E-02	5.61E+02	3.24E-02
-3.30E-02	1.60E+02	3.30E-02	-3.30E-02	3.04E+02	3.30E-02	-3.30E-02	5.63E+02	3.30E-02
-3.36E-02	1.61E+02	3.36E-02	-3.36E-02	3.05E+02	3.36E-02	-3.36E-02	5.66E+02	3.36E-02
-3.42E-02	1.61E+02	3.42E-02	-3.42E-02	3.06E+02	3.42E-02	-3.42E-02	5.68E+02	3.42E-02
-3.48E-02	1.61E+02	3.48E-02	-3.48E-02	3.06E+02	3.48E-02	-3.48E-02	5.71E+02	3.48E-02
-3.54E-02	1.62E+02	3.54E-02	-3.54E-02	3.07E+02	3.54E-02	-3.54E-02	5.73E+02	3.54E-02
-3.60E-02	1.62E+02	3.60E-02	-3.60E-02	3.08E+02	3.60E-02	-3.60E-02	5.75E+02	3.60E-02
-3.66E-02	1.62E+02	3.66E-02	-3.66E-02	3.09E+02	3.66E-02	-3.66E-02	5.77E+02	3.66E-02
-3.72E-02	1.63E+02	3.72E-02	-3.72E-02	3.10E+02	3.72E-02	-3.72E-02	5.80E+02	3.72E-02
-3.78E-02	1.63E+02	3.78E-02	-3.78E-02	3.11E+02	3.78E-02	-3.78E-02	5.82E+02	3.78E-02
-3.84E-02	1.63E+02	3.84E-02	-3.84E-02	3.12E+02	3.84E-02	-3.84E-02	5.84E+02	3.84E-02
-3.90E-02	1.64E+02	3.90E-02	-3.90E-02	3.12E+02	3.90E-02	-3.90E-02	5.86E+02	3.90E-02
-3.96E-02	1.64E+02	3.96E-02	-3.96E-02	3.13E+02	3.96E-02	-3.96E-02	5.88E+02	3.96E-02
-4.02E-02	1.64E+02	4.02E-02	-4.02E-02	3.14E+02	4.02E-02	-4.02E-02	5.89E+02	4.02E-02
-4.08E-02	1.64E+02	4.08E-02	-4.08E-02	3.15E+02	4.08E-02	-4.08E-02	5.91E+02	4.08E-02
-4.14E-02	1.64E+02	4.14E-02	-4.14E-02	3.15E+02	4.14E-02	-4.14E-02	5.93E+02	4.14E-02
-4.20E-02	1.64E+02	4.20E-02	-4.20E-02	3.16E+02	4.20E-02	-4.20E-02	5.95E+02	4.20E-02
-4.26E-02	1.64E+02	4.26E-02	-4.26E-02	3.17E+02	4.26E-02	-4.26E-02	5.97E+02	4.26E-02
-4.32E-02	1.64E+02	4.32E-02	-4.32E-02	3.17E+02	4.32E-02	-4.32E-02	5.98E+02	4.32E-02
-4.38E-02	1.64E+02	4.38E-02	-4.38E-02	3.18E+02	4.38E-02	-4.38E-02	6.00E+02	4.38E-02
-4.44E-02	1.64E+02	4.44E-02	-4.44E-02	3.18E+02	4.44E-02	-4.44E-02	6.01E+02	4.44E-02
-4.50E-02	1.64E+02	4.50E-02	-4.50E-02	3.19E+02	4.50E-02	-4.50E-02	6.03E+02	4.50E-02
-4.56E-02	1.64E+02	4.56E-02	-4.56E-02	3.20E+02	4.56E-02	-4.56E-02	6.05E+02	4.56E-02
-4.62E-02	1.64E+02	4.62E-02	-4.62E-02	3.20E+02	4.62E-02	-4.62E-02	6.06E+02	4.62E-02
-4.68E-02	1.64E+02	4.68E-02	-4.68E-02	3.21E+02	4.68E-02	-4.68E-02	6.07E+02	4.68E-02
-4.74E-02	1.64E+02	4.74E-02	-4.74E-02	3.21E+02	4.74E-02	-4.74E-02	6.09E+02	4.74E-02
-4.80E-02	1.64E+02	4.80E-02	-4.80E-02	3.22E+02	4.80E-02	-4.80E-02	6.10E+02	4.80E-02
-4.86E-02	1.64E+02	4.86E-02	-4.86E-02	3.22E+02	4.86E-02	-4.86E-02	6.12E+02	4.86E-02
-4.92E-02	1.64E+02	4.92E-02	-4.92E-02	3.23E+02	4.92E-02	-4.92E-02	6.13E+02	4.92E-02
-4.98E-02	1.64E+02	4.98E-02	-4.98E-02	3.23E+02	4.98E-02	-4.98E-02	6.14E+02	4.98E-02

-5.04E-02	1.64E+02	5.04E-02	-5.04E-02	3.24E+02	5.04E-02	-5.04E-02	6.16E+02	5.04E-02
-5.10E-02	1.64E+02	5.10E-02	-5.10E-02	3.24E+02	5.10E-02	-5.10E-02	6.17E+02	5.10E-02
-5.16E-02	1.64E+02	5.16E-02	-5.16E-02	3.25E+02	5.16E-02	-5.16E-02	6.18E+02	5.16E-02
-5.22E-02	1.64E+02	5.22E-02	-5.22E-02	3.25E+02	5.22E-02	-5.22E-02	6.19E+02	5.22E-02
-5.28E-02	1.64E+02	5.28E-02	-5.28E-02	3.26E+02	5.28E-02	-5.28E-02	6.20E+02	5.28E-02
-5.34E-02	1.64E+02	5.34E-02	-5.34E-02	3.26E+02	5.34E-02	-5.34E-02	6.22E+02	5.34E-02
-5.40E-02	1.64E+02	5.40E-02	-5.40E-02	3.26E+02	5.40E-02	-5.40E-02	6.23E+02	5.40E-02
-5.46E-02	1.64E+02	5.46E-02	-5.46E-02	3.27E+02	5.46E-02	-5.46E-02	6.24E+02	5.46E-02
-5.52E-02	1.64E+02	5.52E-02	-5.52E-02	3.27E+02	5.52E-02	-5.52E-02	6.25E+02	5.52E-02
-5.58E-02	1.64E+02	5.58E-02	-5.58E-02	3.28E+02	5.58E-02	-5.58E-02	6.26E+02	5.58E-02
-5.64E-02	1.64E+02	5.64E-02	-5.64E-02	3.28E+02	5.64E-02	-5.64E-02	6.27E+02	5.64E-02
-5.70E-02	1.64E+02	5.70E-02	-5.70E-02	3.28E+02	5.70E-02	-5.70E-02	6.28E+02	5.70E-02
-5.76E-02	1.64E+02	5.76E-02	-5.76E-02	3.28E+02	5.76E-02	-5.76E-02	6.29E+02	5.76E-02
-5.82E-02	1.64E+02	5.82E-02	-5.82E-02	3.28E+02	5.82E-02	-5.82E-02	6.30E+02	5.82E-02
-5.88E-02	1.64E+02	5.88E-02	-5.88E-02	3.28E+02	5.88E-02	-5.88E-02	6.31E+02	5.88E-02
-5.94E-02	1.64E+02	5.94E-02	-5.94E-02	3.28E+02	5.94E-02	-5.94E-02	6.32E+02	5.94E-02
-6.00E-02	1.64E+02	6.00E-02	-6.00E-02	3.28E+02	6.00E-02	-6.00E-02	6.33E+02	6.00E-02

ANEXO X. Datos primitivos de Ensayo triaxial en SECO, $\sigma_3=50\text{kPa}$

DATOS PRIMITIVOS			
PRUEBA N°1: TRIAXIAL EN SECO			FECHA: 17/03/2025
Remoldeo:	# de capas	5	# de golpes 10

Prop. Suelo.

Peso total
 obtenido= 1999.5 g
 Peso del molde= 1113.13 g
 Volumen del
 molde= 538.7831401 cm³
 Densidad de
 ensayo= 1.65 g/cm³

Prop. Ensayo

Confinamiento σ_3 = 50 kPa
 Velocidad = 0.35 mm/min

Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga
1	0	0
	10	20.5
	20	35
	40	63.5
	60	89
	80	112.5
2	100	133.5
	120	151.5
	140	166.5
	160	178.5
	180	192.5
3	200	204
	220	208
	240	221.5
	260	228.5
	280	235.5
4	300	241.5
	320	246.2
	340	250.7
	360	254.5
	380	258
5	400	262.5
	420	264.5
	440	266.5
	460	269.2
	480	270
6	500	271.5
	520	272.5
	540	273
	560	274
	580	273.6

Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga
7	600	273.3
	620	272.6
	640	271.7
	660	271
	680	269.7
	700	268.5
8	720	267
	740	265.3
	760	264.5
	780	263.5
	800	262
9	820	261
	840	259.5
	860	258.5
	880	257.5
	900	256.2
10	920	255.5

ANEXO Y. Datos primitivos de Ensayo triaxial en SECO, $\sigma_3=100\text{kPa}$

DATOS PRIMITIVOS			
PRUEBA N°1: TRIAXIAL EN SECO			FECHA: 20/03/2025
Remoldeo:	# de capas	5	# de golpes 10

Prop. Suelo.

Peso total obtenido= 2001.2 g
 Peso del molde= 1113.13 g
 Volumen del molde= 538.7831401 cm³
 Densidad de ensayo= 1.65 g/cm³

Prop. Ensayo

Confinamiento σ_3 = 100 kPa
 Velocidad = 0.35 mm/min

Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga	Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga
1	0	0.0	7	580	473.5
	10	29.5		600	476.5
	20	53.0		620	478.5
	30	76.0		640	481.5
	40	97.0		660	482.5
	60	137.0		680	483.7
2	80	176.5	8	700	484.5
	100	210.0		720	484.5
	120	238.5		740	484.5
	140	263.5		760	485.5
	160	286.5		780	486.5
3	180	306.0	9	800	487.5
	200	324.5		820	488.5
	220	340.5		840	489.0
	240	354.5		860	489.5
	260	367.5		880	489.7
4	280	379.5	10	900	489.5
	300	390.5		920	488.5
	320	399.5		940	488.0
	340	408.5		960	487.5
	360	415.5		980	486.5
5	380	422.5	11	1000	486.0
	400	430.5			
	420	436.5			
	440	441.5			
	460	447.0			
6	480	451.5			
	500	456.0			
	520	460.0			
	540	464.5			
	560	468.1			

ANEXO Z. Datos primitivos de Ensayo triaxial en SECO, $\sigma_3=200\text{kPa}$

DATOS PRIMITIVOS					
PRUEBA N°1: TRIAXIAL EN SECO				FECHA:	20/03/2025
Remoldeo:	# de capas	5		# de golpes	10
Prop. Suelo.			Prop. Ensayo		
Peso total obtenido=	2003.3	g	Confinamiento σ_3 =	200	kPa
Peso del molde=	1113.13	g	Velocidad =	0.35	mm/min
Volumen del molde=	538.78314	cm ³			
Densidad de ensayo=	1.65	g/cm ³			
Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga	Ciclos	Dial de deformación	Dial de carga
1	0	0.0	7	600	922.5
	10	40.0		620	927.5
	20	80.0		640	941.5
	40	140.0		660	949.5
	60	202.3		680	956.5
	80	264.7	8	700	964.5
2	100	319.9		720	970.5
	120	369.1		740	976.0
	140	413.2		760	982.5
	160	453.0		780	988.0
	180	489.1	9	800	993.0
3	200	522.0		820	997.3
	220	550.0		840	1001.6
	240	580.0		860	1005.5
	260	610.0		880	1008.2
	280	639.5	10	900	1010.0
4	300	671.5		920	1011.5
	320	700.5		940	1012.0
	340	726.0		960	1011.5
	360	749.5		980	1012.5
	380	771.5	11	1000	1013.0
5	400	792.5		1020	1013.5
	420	809.5		1040	1014.0
	440	826.5		1060	1014.7
	460	841.5		1080	1015.0
	480	855.5	12	1100	1014.5
6	500	867.5		1120	1014.2
	520	878.5		1140	1013.5
	540	890.0		1160	1012.0
	560	901.5		1180	1011.0
	580	912.0	13	1200	1008.3
				1220	1006.0

ANEXO AA. Datos de esfuerzos bajo deformación unitaria y dirección de esfuerzos p y q en ensayo EN SECO.

σ_3	50	kPa				σ_3	100	kPa				σ_3	200	kPa			
50 kPa						100 kPa						200 kPa					
	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa		kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
e	σ_d	σ_1	σ_3	p	q	e	σ_d	σ_1	σ_3	p	q	e	σ_d	σ_1	σ_3	p	q
0.00%	3.17	53.17	50.00	51.58	1.58	0.00%	3.17	103.17	100.00	101.58	1.58	0.00%	3.17	203.17	200.00	201.58	1.58
0.07%	24.25	74.25	50.00	62.12	12.12	0.07%	33.50	133.50	100.00	116.75	16.75	0.07%	44.30	244.30	200.00	222.15	22.15
0.14%	39.13	89.13	50.00	69.57	19.57	0.14%	57.63	157.63	100.00	128.82	28.82	0.14%	85.38	285.38	200.00	242.69	42.69
0.29%	68.33	118.33	50.00	84.16	34.16	0.29%	102.71	202.71	100.00	151.35	51.35	0.29%	146.84	346.84	200.00	273.42	73.42
0.43%	94.36	144.36	50.00	97.18	47.18	0.43%	143.55	243.55	100.00	171.78	71.78	0.43%	210.51	410.51	200.00	305.25	105.25
0.57%	118.27	168.27	50.00	109.14	59.14	0.57%	183.77	283.77	100.00	191.88	91.88	0.57%	274.02	474.02	200.00	337.01	137.01
0.71%	139.56	189.56	50.00	119.78	69.78	0.71%	217.74	317.74	100.00	208.87	108.87	0.71%	330.03	530.03	200.00	365.01	165.01
0.86%	157.73	207.73	50.00	128.86	78.86	0.86%	246.50	346.50	100.00	223.25	123.25	0.86%	379.76	579.76	200.00	389.88	189.88
1.00%	172.79	222.79	50.00	136.39	86.39	1.00%	271.62	371.62	100.00	235.81	135.81	1.00%	424.18	624.18	200.00	412.09	212.09
1.14%	184.75	234.75	50.00	142.37	92.37	1.14%	294.63	394.63	100.00	247.32	147.32	1.14%	464.07	664.07	200.00	432.04	232.04
1.29%	198.70	248.70	50.00	149.35	99.35	1.29%	314.02	414.02	100.00	257.01	157.01	1.29%	500.07	700.07	200.00	450.04	250.04
1.43%	210.08	260.08	50.00	155.04	105.04	1.43%	332.33	432.33	100.00	266.17	166.17	1.43%	532.70	732.70	200.00	466.35	266.35
1.57%	213.83	263.83	50.00	156.91	106.91	1.57%	348.06	448.06	100.00	274.03	174.03	1.57%	560.29	760.29	200.00	480.15	280.15
1.71%	227.18	277.18	50.00	163.59	113.59	1.71%	361.72	461.72	100.00	280.86	180.86	1.71%	589.83	789.83	200.00	494.91	294.91
1.86%	233.92	283.92	50.00	166.96	116.96	1.86%	374.32	474.32	100.00	287.16	187.16	1.86%	619.27	819.27	200.00	509.64	309.64
2.00%	240.64	290.64	50.00	170.32	120.32	2.00%	385.88	485.88	100.00	292.94	192.94	2.00%	648.13	848.13	200.00	524.06	324.06
2.14%	246.33	296.33	50.00	173.16	123.16	2.14%	396.40	496.40	100.00	298.20	198.20	2.14%	679.41	879.41	200.00	539.70	339.70
2.29%	250.70	300.70	50.00	175.35	125.35	2.29%	404.87	504.87	100.00	302.43	202.43	2.29%	707.58	907.58	200.00	553.79	353.79
2.43%	254.85	304.85	50.00	177.42	127.42	2.43%	413.31	513.31	100.00	306.66	206.66	2.43%	732.16	932.16	200.00	566.08	366.08
2.57%	258.29	308.29	50.00	179.14	129.14	2.57%	419.73	519.73	100.00	309.86	209.86	2.57%	754.65	954.65	200.00	577.32	377.32
2.71%	261.41	311.41	50.00	180.71	130.71	2.71%	426.12	526.12	100.00	313.06	213.06	2.71%	775.57	975.57	200.00	587.79	387.79

2.86%	265.53	315.53	50.00	182.76	132.76	2.86%	433.50	533.50	100.00	316.75	216.75	2.86%	795.43	995.43	200.00	597.71	397.71
3.00%	267.13	317.13	50.00	183.57	133.57	3.00%	438.85	538.85	100.00	319.42	219.42	3.00%	811.23	1011.23	200.00	605.62	405.62
3.14%	268.73	318.73	50.00	184.37	134.37	3.14%	443.19	543.19	100.00	321.59	221.59	3.14%	826.98	1026.98	200.00	613.49	413.49
3.29%	271.02	321.02	50.00	185.51	135.51	3.29%	448.01	548.01	100.00	324.00	224.00	3.29%	840.69	1040.69	200.00	620.35	420.35
3.43%	271.42	321.42	50.00	185.71	135.71	3.43%	451.82	551.82	100.00	325.91	225.91	3.43%	853.37	1053.37	200.00	626.68	426.68
3.57%	272.51	322.51	50.00	186.25	136.25	3.57%	455.62	555.62	100.00	327.81	227.81	3.57%	864.01	1064.01	200.00	632.01	432.01
3.71%	273.09	323.09	50.00	186.55	136.55	3.71%	458.90	558.90	100.00	329.45	229.45	3.71%	873.63	1073.63	200.00	636.82	436.82
3.86%	273.18	323.18	50.00	186.59	136.59	3.86%	462.68	562.68	100.00	331.34	231.34	3.86%	883.72	1083.72	200.00	641.86	441.86
4.00%	273.77	323.77	50.00	186.88	136.88	4.00%	465.55	565.55	100.00	332.77	232.77	4.00%	893.77	1093.77	200.00	646.88	446.88
4.14%	272.96	322.96	50.00	186.48	136.48	4.14%	470.18	570.18	100.00	335.09	235.09	4.14%	902.80	1102.80	200.00	651.40	451.40
4.29%	272.26	322.26	50.00	186.13	136.13	4.29%	472.44	572.44	100.00	336.22	236.22	4.29%	911.79	1111.79	200.00	655.90	455.90
4.43%	271.17	321.17	50.00	185.58	135.58	4.43%	473.70	573.70	100.00	336.85	236.85	4.43%	915.35	1115.35	200.00	657.68	457.68
4.57%	269.88	319.88	50.00	184.94	134.94	4.57%	475.94	575.94	100.00	337.97	237.97	4.57%	927.73	1127.73	200.00	663.87	463.87
4.71%	268.79	318.79	50.00	184.39	134.39	4.71%	476.20	576.20	100.00	338.10	238.10	4.71%	934.19	1134.19	200.00	667.10	467.10
4.86%	267.11	317.11	50.00	183.55	133.55	4.86%	476.67	576.67	100.00	338.33	238.33	4.86%	939.65	1139.65	200.00	669.82	469.82
5.00%	265.54	315.54	50.00	182.77	132.77	5.00%	476.73	576.73	100.00	338.37	238.37	5.00%	946.06	1146.06	200.00	673.03	473.03
5.14%	263.67	313.67	50.00	181.84	131.84	5.14%	476.01	576.01	100.00	338.01	238.01	5.14%	950.49	1150.49	200.00	675.25	475.25
5.29%	261.62	311.62	50.00	180.81	130.81	5.29%	475.30	575.30	100.00	337.65	237.65	5.29%	954.42	1154.42	200.00	677.21	477.21
5.43%	260.44	310.44	50.00	180.22	130.22	5.43%	475.55	575.55	100.00	337.78	237.78	5.43%	959.31	1159.31	200.00	679.65	479.65
5.57%	259.08	309.08	50.00	179.54	129.54	5.57%	475.81	575.81	100.00	337.90	237.90	5.57%	963.21	1163.21	200.00	681.60	481.60
5.71%	257.23	307.23	50.00	178.62	128.62	5.71%	476.06	576.06	100.00	338.03	238.03	5.71%	966.60	1166.60	200.00	683.30	483.30
5.86%	255.87	305.87	50.00	177.94	127.94	5.86%	476.31	576.31	100.00	338.15	238.15	5.86%	969.30	1169.30	200.00	684.65	484.65
6.00%	254.03	304.03	50.00	177.02	127.02	6.00%	476.07	576.07	100.00	338.03	238.03	6.00%	971.99	1171.99	200.00	686.00	486.00

ANEXO BB. Datos para la estimación lineal y obtención de "a" y "b" M. Hiperbólico.

σ_3	b	a
50	0.0033055	0.0000213
100	0.0017120	0.0000190
200	0.0007369	0.0000159

	50	100	200
e	e/ σ_d	e/ σ_d	e/ σ_d
0.00%	0.000000	0.000000	0.000000
0.07%	0.000029	0.000021	0.000016
0.14%	0.000037	0.000025	0.000017
0.29%	0.000042	0.000028	0.000019
0.43%	0.000045	0.000030	0.000020
0.57%	0.000048	0.000031	0.000021
0.71%	0.000051	0.000033	0.000022
0.86%	0.000054	0.000035	0.000023
1.00%	0.000058	0.000037	0.000024
1.14%	0.000062	0.000039	0.000025
1.29%	0.000065	0.000041	0.000026
1.43%	0.000068	0.000043	0.000027
1.57%	0.000073	0.000045	0.000028
1.71%	0.000075	0.000047	0.000029
1.86%	0.000079	0.000050	0.000030
2.00%	0.000083	0.000052	0.000031
2.14%	0.000087	0.000054	0.000032
2.29%	0.000091	0.000056	0.000032
2.43%	0.000095	0.000059	0.000033
2.57%	0.000100	0.000061	0.000034
2.71%	0.000104	0.000064	0.000035
2.86%	0.000108	0.000066	0.000036
3.00%	0.000112	0.000068	0.000037
3.14%	0.000117	0.000071	0.000038
3.29%	0.000121	0.000073	0.000039
3.43%	0.000126	0.000076	0.000040
3.57%	0.000131	0.000078	0.000041
3.71%	0.000136	0.000081	0.000043
3.86%	0.000141	0.000083	0.000044
4.00%	0.000146	0.000086	0.000045
4.14%	0.000152	0.000088	0.000046
4.29%	0.000157	0.000091	0.000047
4.43%	0.000163	0.000093	0.000048
4.57%	0.000169	0.000096	0.000049
4.71%	0.000175	0.000099	0.000050
4.86%	0.000182	0.000102	0.000052
5.00%	0.000188	0.000105	0.000053
5.14%	0.000195	0.000108	0.000054
5.29%	0.000202	0.000111	0.000055
5.43%	0.000208	0.000114	0.000057
5.57%	0.000215	0.000117	0.000058
5.71%	0.000222	0.000120	0.000059
5.86%	0.000229	0.000123	0.000060
6.00%	0.000236	0.000126	0.000062

ANEXO CC. Datos de calibración para modelo de HARDENING SOIL

Hardening50		Hardening100		Hardening200		HardREF 100	
e	σ_d	e	σ_d	e	σ_d	e	σ_d
0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00	0.00%	0.00
0.07%	29.17	0.07%	38.08	0.07%	49.14	0.07%	38.08
0.14%	53.37	0.14%	71.75	0.14%	94.50	0.14%	71.75
0.29%	91.20	0.29%	128.58	0.29%	175.52	0.29%	128.58
0.43%	119.40	0.43%	174.72	0.43%	245.74	0.43%	174.72
0.57%	141.24	0.57%	212.91	0.57%	307.19	0.57%	212.91
0.71%	158.65	0.71%	245.06	0.71%	361.42	0.71%	245.06
0.86%	172.86	0.86%	272.48	0.86%	409.63	0.86%	272.48
1.00%	184.67	1.00%	296.15	1.00%	452.77	1.00%	296.15
1.14%	194.65	1.14%	316.79	1.14%	491.60	1.14%	316.79
1.29%	203.18	1.29%	334.95	1.29%	526.74	1.29%	334.95
1.43%	210.57	1.43%	351.05	1.43%	558.68	1.43%	351.05
1.57%	217.03	1.57%	365.42	1.57%	587.84	1.57%	365.42
1.71%	222.72	1.71%	378.32	1.71%	614.58	1.71%	378.32
1.86%	227.77	1.86%	389.98	1.86%	639.18	1.86%	389.98
2.00%	232.29	2.00%	400.55	2.00%	661.89	2.00%	400.55
2.14%	236.35	2.14%	410.19	2.14%	682.91	2.14%	410.19
2.29%	240.02	2.29%	419.02	2.29%	702.44	2.29%	419.02
2.43%	243.36	2.43%	427.12	2.43%	720.62	2.43%	427.12
2.57%	246.41	2.57%	434.60	2.57%	737.59	2.57%	434.60
2.71%	249.20	2.71%	441.51	2.71%	753.46	2.71%	441.51
2.86%	251.76	2.86%	447.92	2.86%	768.34	2.86%	447.92
3.00%	254.13	3.00%	453.89	3.00%	782.32	3.00%	453.89
3.14%	256.32	3.14%	459.45	3.14%	795.48	3.14%	459.45
3.29%	258.36	3.29%	464.65	3.29%	807.89	3.29%	464.65
3.43%	260.25	3.43%	469.52	3.43%	819.61	3.43%	469.52
3.57%	262.02	3.57%	474.09	3.57%	830.69	3.57%	474.09
3.71%	263.67	3.71%	478.39	3.71%	841.19	3.71%	478.39
3.86%	265.21	3.86%	482.44	3.86%	851.16	3.86%	482.44
4.00%	266.67	4.00%	486.26	4.00%	860.62	4.00%	486.26
4.14%	268.04	4.14%	489.88	4.14%	869.63	4.14%	489.88
4.29%	269.33	4.29%	493.30	4.29%	878.20	4.29%	493.30
4.43%	270.54	4.43%	496.54	4.43%	886.38	4.43%	496.54
4.57%	271.70	4.57%	499.63	4.57%	894.19	4.57%	499.63
4.71%	272.79	4.71%	502.56	4.71%	901.64	4.71%	502.56
4.86%	273.82	4.86%	505.34	4.86%	908.78	4.86%	505.34
5.00%	274.80	5.00%	508.00	5.00%	915.61	5.00%	508.00
5.14%	275.74	5.14%	510.54	5.14%	922.15	5.14%	510.54
5.29%	276.63	5.29%	512.96	5.29%	928.43	5.29%	512.96
5.43%	277.48	5.43%	515.28	5.43%	934.46	5.43%	515.28
5.57%	278.29	5.57%	517.49	5.57%	940.25	5.57%	517.49
5.71%	279.06	5.71%	519.62	5.71%	945.82	5.71%	519.62
5.86%	279.80	5.86%	521.65	5.86%	951.18	5.86%	521.65
6.00%	280.51	6.00%	523.61	6.00%	956.34	6.00%	523.61

ANEXO DD. Datos de calibración para modelo de Hardening Soil, PLAXIS (SOIL TEST)

Calibración HS 50kPa			Calibración HS 100kPa			Calibración HS 200kPa		
e	ed	e	e	ed	e	e	ed	e
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
-6.00E-04	1.98E+01	6.00E-04	-6.00E-04	2.84E+01	6.00E-04	-6.00E-04	4.06E+01	6.00E-04
-1.20E-03	3.71E+01	1.20E-03	-1.20E-03	5.41E+01	1.20E-03	-1.20E-03	7.84E+01	1.20E-03
-1.80E-03	5.23E+01	1.80E-03	-1.80E-03	7.75E+01	1.80E-03	-1.80E-03	1.14E+02	1.80E-03
-2.40E-03	6.58E+01	2.40E-03	-2.40E-03	9.89E+01	2.40E-03	-2.40E-03	1.47E+02	2.40E-03
-3.00E-03	7.78E+01	3.00E-03	-3.00E-03	1.19E+02	3.00E-03	-3.00E-03	1.78E+02	3.00E-03
-3.60E-03	8.85E+01	3.60E-03	-3.60E-03	1.37E+02	3.60E-03	-3.60E-03	2.07E+02	3.60E-03
-4.20E-03	9.82E+01	4.20E-03	-4.20E-03	1.53E+02	4.20E-03	-4.20E-03	2.34E+02	4.20E-03
-4.80E-03	1.07E+02	4.80E-03	-4.80E-03	1.69E+02	4.80E-03	-4.80E-03	2.60E+02	4.80E-03
-5.40E-03	1.15E+02	5.40E-03	-5.40E-03	1.83E+02	5.40E-03	-5.40E-03	2.85E+02	5.40E-03
-6.00E-03	1.22E+02	6.00E-03	-6.00E-03	1.96E+02	6.00E-03	-6.00E-03	3.08E+02	6.00E-03
-6.60E-03	1.29E+02	6.60E-03	-6.60E-03	2.08E+02	6.60E-03	-6.60E-03	3.29E+02	6.60E-03
-7.20E-03	1.35E+02	7.20E-03	-7.20E-03	2.20E+02	7.20E-03	-7.20E-03	3.50E+02	7.20E-03
-7.80E-03	1.41E+02	7.80E-03	-7.80E-03	2.31E+02	7.80E-03	-7.80E-03	3.69E+02	7.80E-03
-8.40E-03	1.46E+02	8.40E-03	-8.40E-03	2.41E+02	8.40E-03	-8.40E-03	3.88E+02	8.40E-03
-9.00E-03	1.51E+02	9.00E-03	-9.00E-03	2.50E+02	9.00E-03	-9.00E-03	4.06E+02	9.00E-03
-9.60E-03	1.56E+02	9.60E-03	-9.60E-03	2.59E+02	9.60E-03	-9.60E-03	4.22E+02	9.60E-03
-1.02E-02	1.60E+02	1.02E-02	-1.02E-02	2.68E+02	1.02E-02	-1.02E-02	4.38E+02	1.02E-02
-1.08E-02	1.64E+02	1.08E-02	-1.08E-02	2.76E+02	1.08E-02	-1.08E-02	4.54E+02	1.08E-02
-1.14E-02	1.68E+02	1.14E-02	-1.14E-02	2.83E+02	1.14E-02	-1.14E-02	4.68E+02	1.14E-02
-1.20E-02	1.72E+02	1.20E-02	-1.20E-02	2.91E+02	1.20E-02	-1.20E-02	4.82E+02	1.20E-02
-1.26E-02	1.75E+02	1.26E-02	-1.26E-02	2.98E+02	1.26E-02	-1.26E-02	4.95E+02	1.26E-02
-1.32E-02	1.78E+02	1.32E-02	-1.32E-02	3.05E+02	1.32E-02	-1.32E-02	5.08E+02	1.32E-02
-1.38E-02	1.81E+02	1.38E-02	-1.38E-02	3.11E+02	1.38E-02	-1.38E-02	5.21E+02	1.38E-02
-1.44E-02	1.84E+02	1.44E-02	-1.44E-02	3.17E+02	1.44E-02	-1.44E-02	5.33E+02	1.44E-02
-1.50E-02	1.87E+02	1.50E-02	-1.50E-02	3.23E+02	1.50E-02	-1.50E-02	5.44E+02	1.50E-02
-1.56E-02	1.90E+02	1.56E-02	-1.56E-02	3.28E+02	1.56E-02	-1.56E-02	5.55E+02	1.56E-02
-1.62E-02	1.92E+02	1.62E-02	-1.62E-02	3.34E+02	1.62E-02	-1.62E-02	5.66E+02	1.62E-02
-1.68E-02	1.95E+02	1.68E-02	-1.68E-02	3.39E+02	1.68E-02	-1.68E-02	5.76E+02	1.68E-02
-1.74E-02	1.97E+02	1.74E-02	-1.74E-02	3.44E+02	1.74E-02	-1.74E-02	5.86E+02	1.74E-02
-1.80E-02	1.99E+02	1.80E-02	-1.80E-02	3.49E+02	1.80E-02	-1.80E-02	5.96E+02	1.80E-02
-1.86E-02	2.01E+02	1.86E-02	-1.86E-02	3.53E+02	1.86E-02	-1.86E-02	6.05E+02	1.86E-02
-1.92E-02	2.03E+02	1.92E-02	-1.92E-02	3.57E+02	1.92E-02	-1.92E-02	6.14E+02	1.92E-02
-1.98E-02	2.05E+02	1.98E-02	-1.98E-02	3.62E+02	1.98E-02	-1.98E-02	6.23E+02	1.98E-02
-2.04E-02	2.06E+02	2.04E-02	-2.04E-02	3.66E+02	2.04E-02	-2.04E-02	6.32E+02	2.04E-02
-2.10E-02	2.08E+02	2.10E-02	-2.10E-02	3.69E+02	2.10E-02	-2.10E-02	6.40E+02	2.10E-02
-2.16E-02	2.10E+02	2.16E-02	-2.16E-02	3.73E+02	2.16E-02	-2.16E-02	6.48E+02	2.16E-02
-2.22E-02	2.11E+02	2.22E-02	-2.22E-02	3.77E+02	2.22E-02	-2.22E-02	6.56E+02	2.22E-02
-2.28E-02	2.13E+02	2.28E-02	-2.28E-02	3.80E+02	2.28E-02	-2.28E-02	6.63E+02	2.28E-02
-2.34E-02	2.14E+02	2.34E-02	-2.34E-02	3.83E+02	2.34E-02	-2.34E-02	6.71E+02	2.34E-02
-2.40E-02	2.15E+02	2.40E-02	-2.40E-02	3.87E+02	2.40E-02	-2.40E-02	6.78E+02	2.40E-02
-2.46E-02	2.17E+02	2.46E-02	-2.46E-02	3.90E+02	2.46E-02	-2.46E-02	6.85E+02	2.46E-02
-2.52E-02	2.18E+02	2.52E-02	-2.52E-02	3.93E+02	2.52E-02	-2.52E-02	6.91E+02	2.52E-02
-2.58E-02	2.19E+02	2.58E-02	-2.58E-02	3.96E+02	2.58E-02	-2.58E-02	6.98E+02	2.58E-02
-2.64E-02	2.20E+02	2.64E-02	-2.64E-02	3.98E+02	2.64E-02	-2.64E-02	7.04E+02	2.64E-02

-2.70E-02	2.21E+02	2.70E-02	-2.70E-02	4.01E+02	2.70E-02	-2.70E-02	7.10E+02	2.70E-02
-2.76E-02	2.22E+02	2.76E-02	-2.76E-02	4.04E+02	2.76E-02	-2.76E-02	7.16E+02	2.76E-02
-2.82E-02	2.23E+02	2.82E-02	-2.82E-02	4.06E+02	2.82E-02	-2.82E-02	7.22E+02	2.82E-02
-2.88E-02	2.24E+02	2.88E-02	-2.88E-02	4.09E+02	2.88E-02	-2.88E-02	7.27E+02	2.88E-02
-2.94E-02	2.25E+02	2.94E-02	-2.94E-02	4.11E+02	2.94E-02	-2.94E-02	7.33E+02	2.94E-02
-3.00E-02	2.26E+02	3.00E-02	-3.00E-02	4.13E+02	3.00E-02	-3.00E-02	7.38E+02	3.00E-02
-3.06E-02	2.27E+02	3.06E-02	-3.06E-02	4.15E+02	3.06E-02	-3.06E-02	7.43E+02	3.06E-02
-3.12E-02	2.28E+02	3.12E-02	-3.12E-02	4.17E+02	3.12E-02	-3.12E-02	7.48E+02	3.12E-02
-3.18E-02	2.29E+02	3.18E-02	-3.18E-02	4.20E+02	3.18E-02	-3.18E-02	7.53E+02	3.18E-02
-3.24E-02	2.30E+02	3.24E-02	-3.24E-02	4.22E+02	3.24E-02	-3.24E-02	7.58E+02	3.24E-02
-3.30E-02	2.30E+02	3.30E-02	-3.30E-02	4.23E+02	3.30E-02	-3.30E-02	7.63E+02	3.30E-02
-3.36E-02	2.31E+02	3.36E-02	-3.36E-02	4.25E+02	3.36E-02	-3.36E-02	7.67E+02	3.36E-02
-3.42E-02	2.32E+02	3.42E-02	-3.42E-02	4.27E+02	3.42E-02	-3.42E-02	7.71E+02	3.42E-02
-3.48E-02	2.33E+02	3.48E-02	-3.48E-02	4.29E+02	3.48E-02	-3.48E-02	7.76E+02	3.48E-02
-3.54E-02	2.33E+02	3.54E-02	-3.54E-02	4.31E+02	3.54E-02	-3.54E-02	7.80E+02	3.54E-02
-3.60E-02	2.34E+02	3.60E-02	-3.60E-02	4.32E+02	3.60E-02	-3.60E-02	7.84E+02	3.60E-02
-3.66E-02	2.34E+02	3.66E-02	-3.66E-02	4.34E+02	3.66E-02	-3.66E-02	7.88E+02	3.66E-02
-3.72E-02	2.35E+02	3.72E-02	-3.72E-02	4.36E+02	3.72E-02	-3.72E-02	7.92E+02	3.72E-02
-3.78E-02	2.36E+02	3.78E-02	-3.78E-02	4.37E+02	3.78E-02	-3.78E-02	7.96E+02	3.78E-02
-3.84E-02	2.36E+02	3.84E-02	-3.84E-02	4.39E+02	3.84E-02	-3.84E-02	7.99E+02	3.84E-02
-3.90E-02	2.37E+02	3.90E-02	-3.90E-02	4.40E+02	3.90E-02	-3.90E-02	8.03E+02	3.90E-02
-3.96E-02	2.37E+02	3.96E-02	-3.96E-02	4.42E+02	3.96E-02	-3.96E-02	8.07E+02	3.96E-02
-4.02E-02	2.38E+02	4.02E-02	-4.02E-02	4.43E+02	4.02E-02	-4.02E-02	8.10E+02	4.02E-02
-4.08E-02	2.38E+02	4.08E-02	-4.08E-02	4.44E+02	4.08E-02	-4.08E-02	8.13E+02	4.08E-02
-4.14E-02	2.39E+02	4.14E-02	-4.14E-02	4.46E+02	4.14E-02	-4.14E-02	8.17E+02	4.14E-02
-4.20E-02	2.39E+02	4.20E-02	-4.20E-02	4.47E+02	4.20E-02	-4.20E-02	8.20E+02	4.20E-02
-4.26E-02	2.40E+02	4.26E-02	-4.26E-02	4.48E+02	4.26E-02	-4.26E-02	8.23E+02	4.26E-02
-4.32E-02	2.40E+02	4.32E-02	-4.32E-02	4.49E+02	4.32E-02	-4.32E-02	8.26E+02	4.32E-02
-4.38E-02	2.41E+02	4.38E-02	-4.38E-02	4.51E+02	4.38E-02	-4.38E-02	8.29E+02	4.38E-02
-4.44E-02	2.41E+02	4.44E-02	-4.44E-02	4.52E+02	4.44E-02	-4.44E-02	8.32E+02	4.44E-02
-4.50E-02	2.42E+02	4.50E-02	-4.50E-02	4.53E+02	4.50E-02	-4.50E-02	8.35E+02	4.50E-02
-4.56E-02	2.42E+02	4.56E-02	-4.56E-02	4.54E+02	4.56E-02	-4.56E-02	8.38E+02	4.56E-02
-4.62E-02	2.43E+02	4.62E-02	-4.62E-02	4.55E+02	4.62E-02	-4.62E-02	8.41E+02	4.62E-02
-4.68E-02	2.43E+02	4.68E-02	-4.68E-02	4.56E+02	4.68E-02	-4.68E-02	8.43E+02	4.68E-02
-4.74E-02	2.43E+02	4.74E-02	-4.74E-02	4.57E+02	4.74E-02	-4.74E-02	8.46E+02	4.74E-02
-4.80E-02	2.44E+02	4.80E-02	-4.80E-02	4.58E+02	4.80E-02	-4.80E-02	8.48E+02	4.80E-02
-4.86E-02	2.44E+02	4.86E-02	-4.86E-02	4.59E+02	4.86E-02	-4.86E-02	8.51E+02	4.86E-02
-4.92E-02	2.44E+02	4.92E-02	-4.92E-02	4.60E+02	4.92E-02	-4.92E-02	8.53E+02	4.92E-02
-4.98E-02	2.45E+02	4.98E-02	-4.98E-02	4.61E+02	4.98E-02	-4.98E-02	8.56E+02	4.98E-02
-5.04E-02	2.45E+02	5.04E-02	-5.04E-02	4.62E+02	5.04E-02	-5.04E-02	8.58E+02	5.04E-02
-5.10E-02	2.45E+02	5.10E-02	-5.10E-02	4.63E+02	5.10E-02	-5.10E-02	8.61E+02	5.10E-02
-5.16E-02	2.46E+02	5.16E-02	-5.16E-02	4.64E+02	5.16E-02	-5.16E-02	8.63E+02	5.16E-02
-5.22E-02	2.46E+02	5.22E-02	-5.22E-02	4.65E+02	5.22E-02	-5.22E-02	8.65E+02	5.22E-02
-5.28E-02	2.46E+02	5.28E-02	-5.28E-02	4.65E+02	5.28E-02	-5.28E-02	8.67E+02	5.28E-02
-5.34E-02	2.47E+02	5.34E-02	-5.34E-02	4.66E+02	5.34E-02	-5.34E-02	8.70E+02	5.34E-02
-5.40E-02	2.47E+02	5.40E-02	-5.40E-02	4.67E+02	5.40E-02	-5.40E-02	8.72E+02	5.40E-02
-5.46E-02	2.47E+02	5.46E-02	-5.46E-02	4.68E+02	5.46E-02	-5.46E-02	8.74E+02	5.46E-02
-5.52E-02	2.47E+02	5.52E-02	-5.52E-02	4.69E+02	5.52E-02	-5.52E-02	8.76E+02	5.52E-02
-5.58E-02	2.46E+02	5.58E-02	-5.58E-02	4.69E+02	5.58E-02	-5.58E-02	8.78E+02	5.58E-02

-5.64E-02	2.46E+02	5.64E-02	-5.64E-02	4.70E+02	5.64E-02	-5.64E-02	8.80E+02	5.64E-02
-5.70E-02	2.46E+02	5.70E-02	-5.70E-02	4.71E+02	5.70E-02	-5.70E-02	8.82E+02	5.70E-02
-5.76E-02	2.46E+02	5.76E-02	-5.76E-02	4.72E+02	5.76E-02	-5.76E-02	8.84E+02	5.76E-02
-5.82E-02	2.46E+02	5.82E-02	-5.82E-02	4.72E+02	5.82E-02	-5.82E-02	8.85E+02	5.82E-02
-5.88E-02	2.46E+02	5.88E-02	-5.88E-02	4.73E+02	5.88E-02	-5.88E-02	8.87E+02	5.88E-02
-5.94E-02	2.46E+02	5.94E-02	-5.94E-02	4.74E+02	5.94E-02	-5.94E-02	8.89E+02	5.94E-02
-6.00E-02	2.46E+02	6.00E-02	-6.00E-02	4.74E+02	6.00E-02	-6.00E-02	8.91E+02	6.00E-02

ANEXO EE. Optimización de Parámetros para modelo de Hardening Soil, CONDICION SECA.

Calibración HS 50kPa			Calibración HS 100kPa			Calibración HS 200kPa		
e	ed	e	e	ed	e	e	ed	e
0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
-6.00E-04	1.82E+01	6.00E-04	-6.00E-04	2.61E+01	6.00E-04	-6.00E-04	3.74E+01	6.00E-04
-1.20E-03	3.44E+01	1.20E-03	-1.20E-03	5.01E+01	1.20E-03	-1.20E-03	7.25E+01	1.20E-03
-1.80E-03	4.89E+01	1.80E-03	-1.80E-03	7.22E+01	1.80E-03	-1.80E-03	1.06E+02	1.80E-03
-2.40E-03	6.21E+01	2.40E-03	-2.40E-03	9.27E+01	2.40E-03	-2.40E-03	1.37E+02	2.40E-03
-3.00E-03	7.41E+01	3.00E-03	-3.00E-03	1.12E+02	3.00E-03	-3.00E-03	1.66E+02	3.00E-03
-3.60E-03	8.51E+01	3.60E-03	-3.60E-03	1.30E+02	3.60E-03	-3.60E-03	1.95E+02	3.60E-03
-4.20E-03	9.52E+01	4.20E-03	-4.20E-03	1.46E+02	4.20E-03	-4.20E-03	2.21E+02	4.20E-03
-4.80E-03	1.05E+02	4.80E-03	-4.80E-03	1.62E+02	4.80E-03	-4.80E-03	2.47E+02	4.80E-03
-5.40E-03	1.13E+02	5.40E-03	-5.40E-03	1.77E+02	5.40E-03	-5.40E-03	2.71E+02	5.40E-03
-6.00E-03	1.21E+02	6.00E-03	-6.00E-03	1.91E+02	6.00E-03	-6.00E-03	2.94E+02	6.00E-03
-6.60E-03	1.29E+02	6.60E-03	-6.60E-03	2.04E+02	6.60E-03	-6.60E-03	3.17E+02	6.60E-03
-7.20E-03	1.36E+02	7.20E-03	-7.20E-03	2.16E+02	7.20E-03	-7.20E-03	3.38E+02	7.20E-03
-7.80E-03	1.42E+02	7.80E-03	-7.80E-03	2.28E+02	7.80E-03	-7.80E-03	3.58E+02	7.80E-03
-8.40E-03	1.48E+02	8.40E-03	-8.40E-03	2.39E+02	8.40E-03	-8.40E-03	3.78E+02	8.40E-03
-9.00E-03	1.54E+02	9.00E-03	-9.00E-03	2.50E+02	9.00E-03	-9.00E-03	3.97E+02	9.00E-03
-9.60E-03	1.59E+02	9.60E-03	-9.60E-03	2.60E+02	9.60E-03	-9.60E-03	4.15E+02	9.60E-03
-1.02E-02	1.64E+02	1.02E-02	-1.02E-02	2.70E+02	1.02E-02	-1.02E-02	4.32E+02	1.02E-02
-1.08E-02	1.69E+02	1.08E-02	-1.08E-02	2.79E+02	1.08E-02	-1.08E-02	4.49E+02	1.08E-02
-1.14E-02	1.74E+02	1.14E-02	-1.14E-02	2.88E+02	1.14E-02	-1.14E-02	4.65E+02	1.14E-02
-1.20E-02	1.78E+02	1.20E-02	-1.20E-02	2.96E+02	1.20E-02	-1.20E-02	4.81E+02	1.20E-02
-1.26E-02	1.82E+02	1.26E-02	-1.26E-02	3.04E+02	1.26E-02	-1.26E-02	4.96E+02	1.26E-02
-1.32E-02	1.86E+02	1.32E-02	-1.32E-02	3.12E+02	1.32E-02	-1.32E-02	5.10E+02	1.32E-02
-1.38E-02	1.90E+02	1.38E-02	-1.38E-02	3.19E+02	1.38E-02	-1.38E-02	5.24E+02	1.38E-02
-1.44E-02	1.94E+02	1.44E-02	-1.44E-02	3.26E+02	1.44E-02	-1.44E-02	5.38E+02	1.44E-02
-1.50E-02	1.97E+02	1.50E-02	-1.50E-02	3.33E+02	1.50E-02	-1.50E-02	5.51E+02	1.50E-02
-1.56E-02	2.01E+02	1.56E-02	-1.56E-02	3.40E+02	1.56E-02	-1.56E-02	5.63E+02	1.56E-02
-1.62E-02	2.04E+02	1.62E-02	-1.62E-02	3.46E+02	1.62E-02	-1.62E-02	5.75E+02	1.62E-02
-1.68E-02	2.07E+02	1.68E-02	-1.68E-02	3.52E+02	1.68E-02	-1.68E-02	5.87E+02	1.68E-02
-1.74E-02	2.10E+02	1.74E-02	-1.74E-02	3.58E+02	1.74E-02	-1.74E-02	5.99E+02	1.74E-02
-1.80E-02	2.13E+02	1.80E-02	-1.80E-02	3.64E+02	1.80E-02	-1.80E-02	6.10E+02	1.80E-02
-1.86E-02	2.15E+02	1.86E-02	-1.86E-02	3.70E+02	1.86E-02	-1.86E-02	6.20E+02	1.86E-02
-1.92E-02	2.18E+02	1.92E-02	-1.92E-02	3.75E+02	1.92E-02	-1.92E-02	6.31E+02	1.92E-02

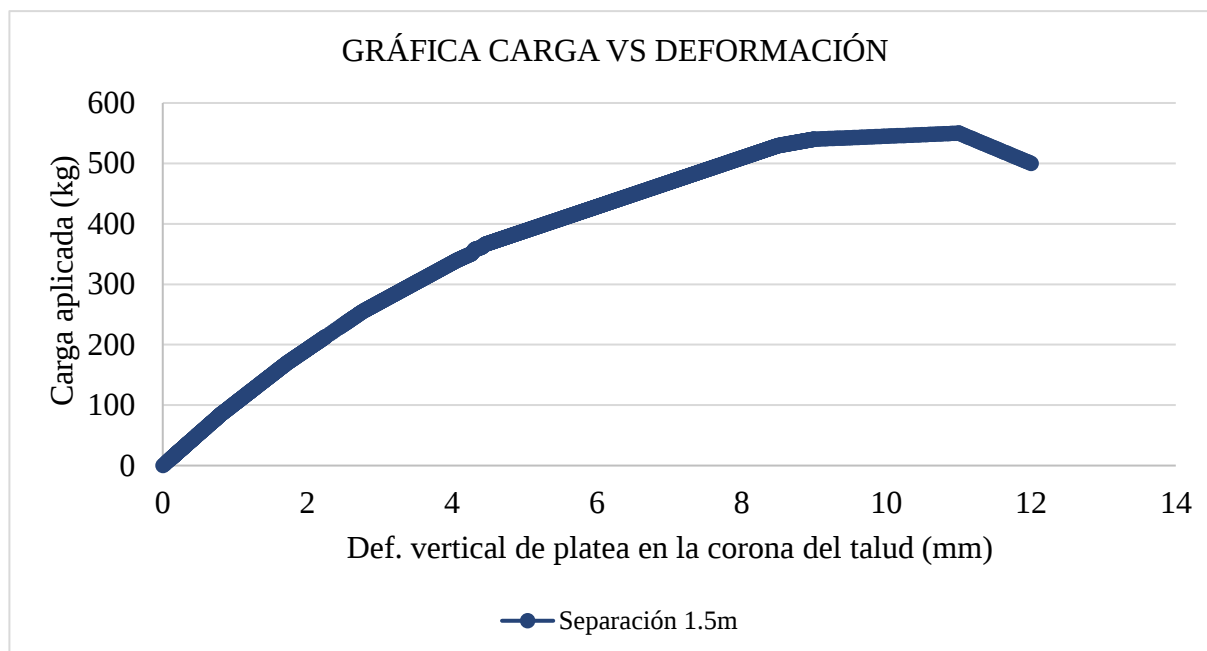
-1.98E-02	2.20E+02	1.98E-02	-1.98E-02	3.80E+02	1.98E-02	-1.98E-02	6.41E+02	1.98E-02
-2.04E-02	2.23E+02	2.04E-02	-2.04E-02	3.85E+02	2.04E-02	-2.04E-02	6.51E+02	2.04E-02
-2.10E-02	2.25E+02	2.10E-02	-2.10E-02	3.90E+02	2.10E-02	-2.10E-02	6.61E+02	2.10E-02
-2.16E-02	2.27E+02	2.16E-02	-2.16E-02	3.95E+02	2.16E-02	-2.16E-02	6.70E+02	2.16E-02
-2.22E-02	2.29E+02	2.22E-02	-2.22E-02	4.00E+02	2.22E-02	-2.22E-02	6.79E+02	2.22E-02
-2.28E-02	2.31E+02	2.28E-02	-2.28E-02	4.04E+02	2.28E-02	-2.28E-02	6.88E+02	2.28E-02
-2.34E-02	2.33E+02	2.34E-02	-2.34E-02	4.08E+02	2.34E-02	-2.34E-02	6.97E+02	2.34E-02
-2.40E-02	2.35E+02	2.40E-02	-2.40E-02	4.13E+02	2.40E-02	-2.40E-02	7.06E+02	2.40E-02
-2.46E-02	2.37E+02	2.46E-02	-2.46E-02	4.17E+02	2.46E-02	-2.46E-02	7.14E+02	2.46E-02
-2.52E-02	2.39E+02	2.52E-02	-2.52E-02	4.21E+02	2.52E-02	-2.52E-02	7.22E+02	2.52E-02
-2.58E-02	2.40E+02	2.58E-02	-2.58E-02	4.25E+02	2.58E-02	-2.58E-02	7.30E+02	2.58E-02
-2.64E-02	2.42E+02	2.64E-02	-2.64E-02	4.28E+02	2.64E-02	-2.64E-02	7.38E+02	2.64E-02
-2.70E-02	2.44E+02	2.70E-02	-2.70E-02	4.32E+02	2.70E-02	-2.70E-02	7.46E+02	2.70E-02
-2.76E-02	2.45E+02	2.76E-02	-2.76E-02	4.35E+02	2.76E-02	-2.76E-02	7.53E+02	2.76E-02
-2.82E-02	2.47E+02	2.82E-02	-2.82E-02	4.39E+02	2.82E-02	-2.82E-02	7.61E+02	2.82E-02
-2.88E-02	2.48E+02	2.88E-02	-2.88E-02	4.42E+02	2.88E-02	-2.88E-02	7.68E+02	2.88E-02
-2.94E-02	2.49E+02	2.94E-02	-2.94E-02	4.45E+02	2.94E-02	-2.94E-02	7.75E+02	2.94E-02
-3.00E-02	2.51E+02	3.00E-02	-3.00E-02	4.48E+02	3.00E-02	-3.00E-02	7.81E+02	3.00E-02
-3.06E-02	2.52E+02	3.06E-02	-3.06E-02	4.51E+02	3.06E-02	-3.06E-02	7.88E+02	3.06E-02
-3.12E-02	2.53E+02	3.12E-02	-3.12E-02	4.54E+02	3.12E-02	-3.12E-02	7.95E+02	3.12E-02
-3.18E-02	2.55E+02	3.18E-02	-3.18E-02	4.57E+02	3.18E-02	-3.18E-02	8.01E+02	3.18E-02
-3.24E-02	2.56E+02	3.24E-02	-3.24E-02	4.60E+02	3.24E-02	-3.24E-02	8.07E+02	3.24E-02
-3.30E-02	2.57E+02	3.30E-02	-3.30E-02	4.63E+02	3.30E-02	-3.30E-02	8.13E+02	3.30E-02
-3.36E-02	2.58E+02	3.36E-02	-3.36E-02	4.66E+02	3.36E-02	-3.36E-02	8.19E+02	3.36E-02
-3.42E-02	2.59E+02	3.42E-02	-3.42E-02	4.68E+02	3.42E-02	-3.42E-02	8.25E+02	3.42E-02
-3.48E-02	2.60E+02	3.48E-02	-3.48E-02	4.71E+02	3.48E-02	-3.48E-02	8.31E+02	3.48E-02
-3.54E-02	2.60E+02	3.54E-02	-3.54E-02	4.73E+02	3.54E-02	-3.54E-02	8.36E+02	3.54E-02
-3.60E-02	2.60E+02	3.60E-02	-3.60E-02	4.76E+02	3.60E-02	-3.60E-02	8.42E+02	3.60E-02
-3.66E-02	2.60E+02	3.66E-02	-3.66E-02	4.78E+02	3.66E-02	-3.66E-02	8.47E+02	3.66E-02
-3.72E-02	2.60E+02	3.72E-02	-3.72E-02	4.80E+02	3.72E-02	-3.72E-02	8.52E+02	3.72E-02
-3.78E-02	2.60E+02	3.78E-02	-3.78E-02	4.82E+02	3.78E-02	-3.78E-02	8.57E+02	3.78E-02
-3.84E-02	2.60E+02	3.84E-02	-3.84E-02	4.85E+02	3.84E-02	-3.84E-02	8.62E+02	3.84E-02
-3.90E-02	2.60E+02	3.90E-02	-3.90E-02	4.87E+02	3.90E-02	-3.90E-02	8.67E+02	3.90E-02
-3.96E-02	2.60E+02	3.96E-02	-3.96E-02	4.89E+02	3.96E-02	-3.96E-02	8.72E+02	3.96E-02
-4.02E-02	2.60E+02	4.02E-02	-4.02E-02	4.91E+02	4.02E-02	-4.02E-02	8.77E+02	4.02E-02
-4.08E-02	2.60E+02	4.08E-02	-4.08E-02	4.93E+02	4.08E-02	-4.08E-02	8.82E+02	4.08E-02
-4.14E-02	2.60E+02	4.14E-02	-4.14E-02	4.95E+02	4.14E-02	-4.14E-02	8.86E+02	4.14E-02
-4.20E-02	2.60E+02	4.20E-02	-4.20E-02	4.97E+02	4.20E-02	-4.20E-02	8.91E+02	4.20E-02
-4.26E-02	2.60E+02	4.26E-02	-4.26E-02	4.98E+02	4.26E-02	-4.26E-02	8.95E+02	4.26E-02
-4.32E-02	2.60E+02	4.32E-02	-4.32E-02	5.00E+02	4.32E-02	-4.32E-02	8.99E+02	4.32E-02
-4.38E-02	2.60E+02	4.38E-02	-4.38E-02	5.02E+02	4.38E-02	-4.38E-02	9.03E+02	4.38E-02
-4.44E-02	2.60E+02	4.44E-02	-4.44E-02	5.04E+02	4.44E-02	-4.44E-02	9.08E+02	4.44E-02
-4.50E-02	2.60E+02	4.50E-02	-4.50E-02	5.05E+02	4.50E-02	-4.50E-02	9.12E+02	4.50E-02
-4.56E-02	2.60E+02	4.56E-02	-4.56E-02	5.07E+02	4.56E-02	-4.56E-02	9.16E+02	4.56E-02
-4.62E-02	2.60E+02	4.62E-02	-4.62E-02	5.09E+02	4.62E-02	-4.62E-02	9.19E+02	4.62E-02
-4.68E-02	2.60E+02	4.68E-02	-4.68E-02	5.10E+02	4.68E-02	-4.68E-02	9.23E+02	4.68E-02
-4.74E-02	2.60E+02	4.74E-02	-4.74E-02	5.12E+02	4.74E-02	-4.74E-02	9.27E+02	4.74E-02
-4.80E-02	2.60E+02	4.80E-02	-4.80E-02	5.13E+02	4.80E-02	-4.80E-02	9.31E+02	4.80E-02
-4.86E-02	2.60E+02	4.86E-02	-4.86E-02	5.15E+02	4.86E-02	-4.86E-02	9.34E+02	4.86E-02

-4.92E-02	2.60E+02	4.92E-02	-4.92E-02	5.15E+02	4.92E-02	-4.92E-02	9.38E+02	4.92E-02
-4.98E-02	2.60E+02	4.98E-02	-4.98E-02	5.15E+02	4.98E-02	-4.98E-02	9.41E+02	4.98E-02
-5.04E-02	2.60E+02	5.04E-02	-5.04E-02	5.15E+02	5.04E-02	-5.04E-02	9.45E+02	5.04E-02
-5.10E-02	2.60E+02	5.10E-02	-5.10E-02	5.15E+02	5.10E-02	-5.10E-02	9.48E+02	5.10E-02
-5.16E-02	2.60E+02	5.16E-02	-5.16E-02	5.15E+02	5.16E-02	-5.16E-02	9.51E+02	5.16E-02
-5.22E-02	2.60E+02	5.22E-02	-5.22E-02	5.15E+02	5.22E-02	-5.22E-02	9.55E+02	5.22E-02
-5.28E-02	2.60E+02	5.28E-02	-5.28E-02	5.15E+02	5.28E-02	-5.28E-02	9.58E+02	5.28E-02
-5.34E-02	2.60E+02	5.34E-02	-5.34E-02	5.15E+02	5.34E-02	-5.34E-02	9.61E+02	5.34E-02
-5.40E-02	2.60E+02	5.40E-02	-5.40E-02	5.15E+02	5.40E-02	-5.40E-02	9.64E+02	5.40E-02
-5.46E-02	2.60E+02	5.46E-02	-5.46E-02	5.15E+02	5.46E-02	-5.46E-02	9.67E+02	5.46E-02
-5.52E-02	2.60E+02	5.52E-02	-5.52E-02	5.15E+02	5.52E-02	-5.52E-02	9.70E+02	5.52E-02
-5.58E-02	2.60E+02	5.58E-02	-5.58E-02	5.15E+02	5.58E-02	-5.58E-02	9.73E+02	5.58E-02
-5.64E-02	2.60E+02	5.64E-02	-5.64E-02	5.15E+02	5.64E-02	-5.64E-02	9.76E+02	5.64E-02
-5.70E-02	2.60E+02	5.70E-02	-5.70E-02	5.15E+02	5.70E-02	-5.70E-02	9.78E+02	5.70E-02
-5.76E-02	2.60E+02	5.76E-02	-5.76E-02	5.15E+02	5.76E-02	-5.76E-02	9.81E+02	5.76E-02
-5.82E-02	2.60E+02	5.82E-02	-5.82E-02	5.15E+02	5.82E-02	-5.82E-02	9.84E+02	5.82E-02
-5.88E-02	2.60E+02	5.88E-02	-5.88E-02	5.15E+02	5.88E-02	-5.88E-02	9.87E+02	5.88E-02
-5.94E-02	2.60E+02	5.94E-02	-5.94E-02	5.15E+02	5.94E-02	-5.94E-02	9.89E+02	5.94E-02
-6.00E-02	2.60E+02	6.00E-02	-6.00E-02	5.15E+02	6.00E-02	-6.00E-02	9.92E+02	6.00E-02

ANEXO FF. Resumen de datos de la deformación bajo carga del equipo universal, separación de 1.50 metros.

ENSAYO DE MODELO A ESCALA CON EQUIPO UNIVERSAL	
	FECHA 28/03/2025
Condiciones de ensayo:	
Área, platea de contacto:	166mm x 250mm=41500mm ²
Velocidad:	5mm/min
Separación entre muros	1.50m

Resumen de datos para Separación 1.5m			
Carga Aproximada (kg)	Deformación (mm)	Carga Aproximada (kg)	Deformación (mm)
0.0000	0.0000	299.824312	3.451083
19.958048	0.188715	319.78236	3.75796
39.916096	0.377429	340.031529	4.070141
59.874144	0.566144	360.063373	4.376474
79.832192	0.754858	379.925109	4.796264
99.79024	0.963035	400.061293	5.295474
120.20188	1.182807	419.968656	5.78901
139.706336	1.392812	439.966696	6.284795
160.117976	1.612585	460.031837	6.782243
180.076024	1.842694	480.096978	7.279692
200.034072	2.087406	500.1621189	7.77714003
220.899304	2.343242	519.996626	8.268871
239.950168	2.576831	540.012145	8.995031
259.908216	2.837329	550.045685	11.001234
279.866264	3.144206		



ANEXO GG. Resumen de datos de la deformación bajo carga del equipo universal, separación de 3.00 metros.

ENSAYO DE MODELO A ESCALA CON EQUIPO UNIVERSAL

FECHA 03/04/2025

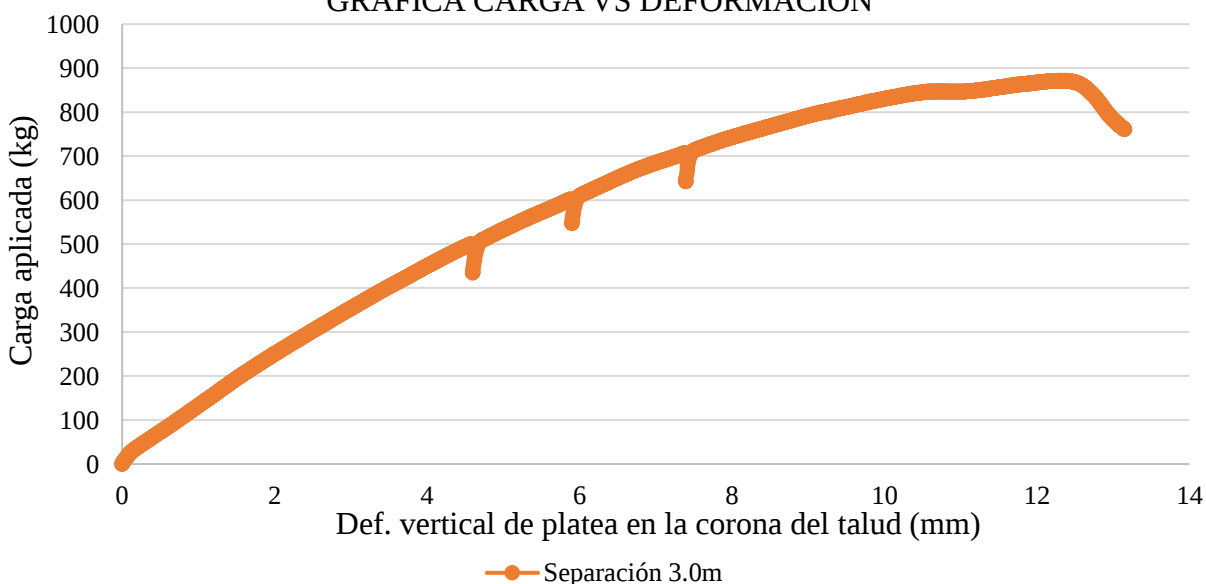
Condiciones de ensayo:

Área, platea de contacto:	166mm x 250mm=41500mm ²
Velocidad:	2.5mm/min
Separación entre muros	3.0m

Resumen de datos para Separación 3.0m

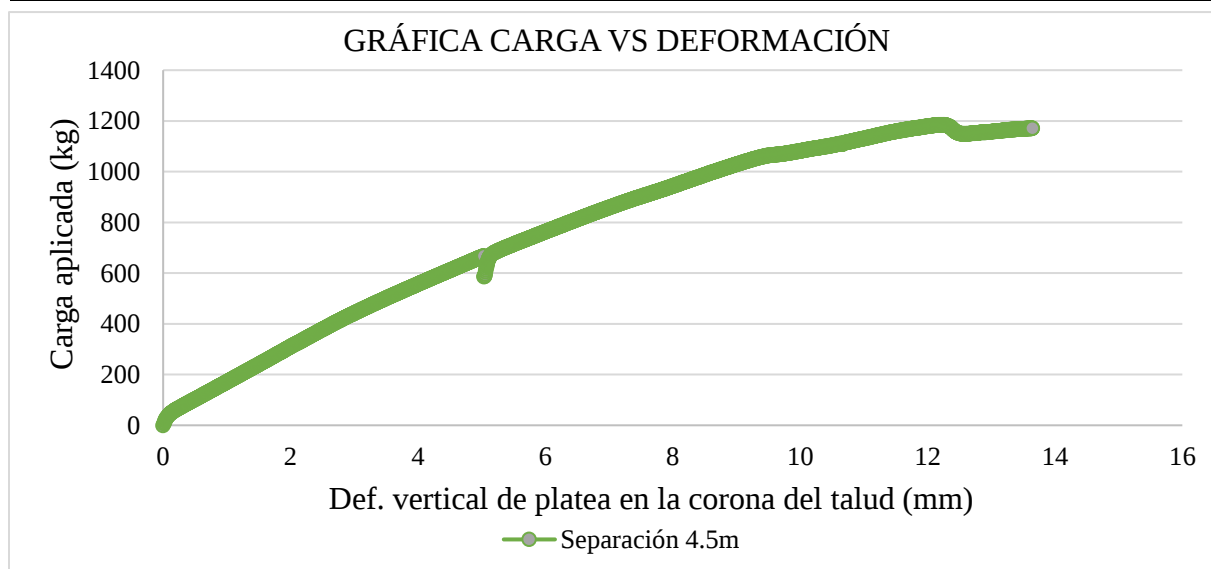
Carga Aproximada (kg)	Deformación (mm)	Carga Aproximada (kg)	Deformación (mm)	Carga Aproximada (kg)	Deformación (mm)
0.0000	0.0000	299.824312	2.46888	600.102216	5.8547
19.504456	0.08128	319.78236	2.65938	620.060264	6.1214
39.916096	0.2159	340.194	2.86258	640.018312	6.36778
59.874144	0.38608	360.152048	3.0607	659.97636	6.62178
79.832192	0.5588	380.110096	3.2639	679.934408	6.9215
99.79024	0.73152	400.068144	3.4671	699.892456	7.2644
120.20188	0.89408	420.026192	3.683	719.850504	7.59968
140.159928	1.05918	439.98424	3.89128	739.808552	7.9375
160.117976	1.22428	459.942288	4.10718	760.220192	8.33628
180.076024	1.3843	479.900336	4.3307	780.17824	8.7503
200.034072	1.5494	499.858384	4.572	800.136288	9.1821
219.99212	1.71958	519.816432	4.84378	820.094336	9.70788
239.950168	1.905	539.77448	5.08	840.052384	10.29208
259.908216	2.08788	560.18612	5.334	860.010432	11.6332
279.866264	2.27838	580.144168	5.59308	871.803824	12.3444

GRÁFICA CARGA VS DEFORMACIÓN



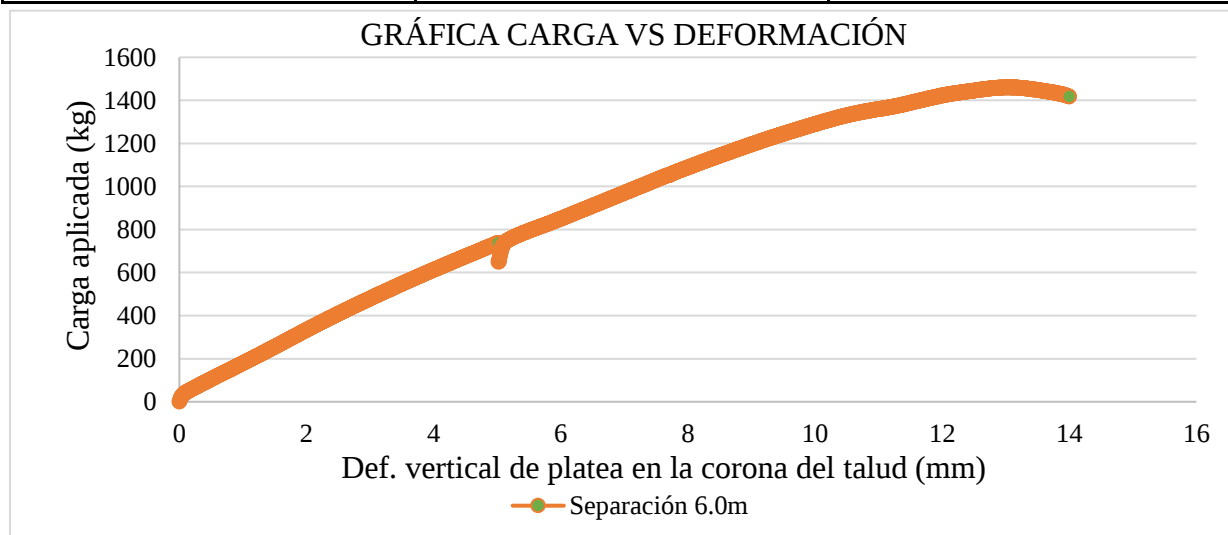
ANEXO HH. Resumen de datos de la deformación bajo carga del equipo universal, separación de 4.50 metros.

ENSAYO DE MODELO A ESCALA CON EQUIPO UNIVERSAL					
				FECHA	04/04/2025
Condiciones de ensayo:					
Área, platea de contacto:			166mm x 250mm=41500mm2		
Velocidad:			2.5mm/min		
Separación entre muros			4.5m		
Resumen de datos para Separación 4.5m					
Carga Aproximada (kg)	Deformación (mm)	Carga Aproximada (kg)	Deformación (mm)	Carga Aproximada (kg)	Deformación (mm)
18.14368	0.0254	420.026192	2.81178	820.094336	6.5786
39.462504	0.08128	439.98424	2.9718	840.052384	6.78688
59.874144	0.18288	459.942288	3.14198	860.010432	7.0104
79.832192	0.32258	480.353928	3.3147	880.422072	7.23138
100.243832	0.47498	500.311976	3.48488	899.926528	7.4676
119.748288	0.6223	519.816432	3.66268	919.884576	7.71398
140.159928	0.76708	540.228072	3.84048	939.842624	7.9502
160.117976	0.9144	560.18612	4.0259	959.800672	8.1788
180.076024	1.05918	580.144168	4.20878	980.212312	8.4074
200.034072	1.2065	600.102216	4.3942	1000.17036	8.6487
220.445712	1.35128	620.060264	4.57708	1020.128408	8.89
239.950168	1.49352	639.56472	4.7625	1040.086456	9.1313
259.908216	1.6383	660.429952	4.953	1059.590912	9.4107
279.866264	1.778	679.934408	5.18668	1080.002552	9.9441
299.824312	1.92278	699.892456	5.3594	1099.9606	10.4013
319.78236	2.06248	719.850504	5.55498	1119.918648	10.795
340.194	2.21488	739.808552	5.7531	1139.876696	11.14552
360.152048	2.3622	760.220192	5.96138	1159.834744	11.5062
379.656504	2.50698	780.17824	6.16458	1179.792792	12.0015
400.068144	2.65938	800.136288	6.37032	1186.14308	12.2174



ANEXO II. Resumen de datos de la deformación bajo carga del equipo universal, sep. 6.00m

ENSAYO DE MODELO A ESCALA CON EQUIPO UNIVERSAL					
Condiciones de ensayo:			FECHA		08/04/2025
Área, platea de contacto:			166mm x 250mm=41500mm2		
Velocidad:			2.5mm/min		
Separación entre muros			6.0m		
Resumen de datos para Separación 6.0m					
Carga	Deformación	Carga	Deformación	Carga	Carga
Aproximada (kg)	(mm)	Aproximada (kg)	(mm)	Aproximada (N)	Aproximada (kg)
20.865232	0.0254	519.816432	3.2893	1020.128408	7.40918
39.916096	0.08382	539.77448	3.43408	1040.086456	7.57428
59.874144	0.2032	559.732528	3.58902	1059.590912	7.747
79.832192	0.3302	580.144168	3.7465	1079.54896	7.91718
100.243832	0.46228	600.102216	3.8989	1099.9606	8.1026
119.748288	0.58928	620.060264	4.05892	1119.918648	8.2804
140.159928	0.73152	640.018312	4.2164	1139.876696	8.46328
160.117976	0.86868	659.97636	4.37388	1159.834744	8.65378
180.076024	1.0033	679.934408	4.5339	1179.792792	8.84682
200.034072	1.13792	699.892456	4.699	1200.204432	9.04748
219.99212	1.27	719.850504	4.85648	1220.16248	9.23798
240.40376	1.397	739.808552	5.12318	1240.120528	9.4488
260.361808	1.53162	760.220192	5.22732	1260.078576	9.6647
280.319856	1.65608	780.17824	5.37718	1280.036624	9.88568
300.277904	1.78562	800.136288	5.5499	1299.994672	10.11428
320.235952	1.91008	820.094336	5.73278	1319.95272	10.3505
340.194	2.03962	840.052384	5.91058	1339.910768	10.6299
359.698456	2.1717	860.010432	6.07568	1359.868816	10.9982
380.110096	2.30632	879.96848	6.2484	1379.826864	11.3665
400.068144	2.4384	899.926528	6.41858	1399.784912	11.65098
419.5726	2.57302	919.884576	6.5786	1420.196552	11.95578
439.98424	2.71018	939.842624	6.7437	1440.1546	12.36218
459.942288	2.8575	959.800672	6.91388	1460.112648	12.93368
480.353928	3.00228	980.212312	7.07898	1461.019832	13.0429
499.858384	3.14198	1000.17036	7.24408		



ANEXO JJ. Desarrollo del plan piloto para modelo a escala reducida.

PLAN PILOTO			
N° PRUEBA= 1		FECHA 03/12/2024	
Escala= 1/30			
CONDICIONES DE PRUEBA.			
Tipo de suelo= Arena bien gradada húmeda.		Nivel de compactación= baja	
Material para muros= Madera.		Superficie de contacto= 25cm2	

Separación entre muros= 1.50 METROS DE SEPARACIÓN

Carga de falla= 115 kg (5 pesas de 20kg y 1 de 15kg)

FOTOS ANTES DE LA PRUEBA







FOTOS DESPUÉS DE LA PRUEBA



PLAN PILOTO			
N° PRUEBA= 2		FECHA 03/12/2024	
Escala= 1/30			
CONDICIONES DE PRUEBA.			
Tipo de suelo= Arena bien gradada húmeda.		Nivel de compactación= baja	
Material para muros= Madera.		Superficie de contacto= 25cm2	
separación entre muros= 3.0 metros de separación			
Carga de falla= +135		(6 pesas de 20kg y 1 de 15kg + Peso propio (70kg))	
			
Conclusiones		Recomendaciones.	
• Carga concéntrica, muy importante (guía la dirección de falla) • Nivel de compactación influye en la capacidad de carga • Es importante escalar la densidad, muros más pesados aumentan la resistencia y evitan fallas súbitas • Dentro de todo se obtuvo el comportamiento esperado. Incrementando la capacidad de carga a una mayor separación.		• Nivelación Rigurosa: Esencial para una correcta visualización y aplicación de cargas. • Minimizar en lo absoluto posible efecto de fricción entre los muros y el vidrio • Medir desplazamientos mediante vectores • Carga Gradual: Aplicar la carga de forma lenta y uniforme para un análisis preciso. • Vigilar Bordes: Prestar atención a los efectos de borde en ensayos con cargas mayores.	