



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

ESCUELA DE INGENIERÍA

ESTUDIO COMPARATIVO ANÁLISIS DINÁMICO DE DEFORMACIONES: EVALUACIÓN EN FLAC2D Y PLAXIS2D EN DEPÓSITOS DE RELAVES

DIEGO ANDRÉS TRONCOSO ALFARO

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de

Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

CHRISTIAN LEDEZMA

Santiago de Chile, abril, 2025.

(A mis padres y hermanos por su apoyo incondicional a lo largo de mi vida, tanto en lo personal como en mi formación académica.)

AGRADECIMIENTOS

Durante estos años de estudio, tanto en el diplomado como en el magíster, quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi familia, quienes fueron un pilar fundamental en cada etapa de este proceso. Su constante apoyo, aliento y confianza me dieron la fuerza y la motivación necesarias para seguir perfeccionándome en lo académico y profesional.

En especial, agradezco a mi madre, Adela Alfaro Lillo, y a mi padre, Jorge Troncoso Aránguiz, por su ejemplo, entrega y respaldo incondicional, que fueron determinantes para que pudiera tomar la decisión de continuar creciendo en el ámbito académico y profesional. Asimismo, agradezco a mis hermanos, Jorge Troncoso Alfaro y Rodrigo Troncoso Alfaro, por estar siempre presentes y brindarme su apoyo incondicional.

También agradecer a mi pareja Allison Blair, por su paciencia, cariño y amor en estos años de estudios. Su compañía y comprensión fueron esenciales para mantener el equilibrio en esta etapa desafiante.

Quiero agradecer a mis amigos, compañeros y profesores que estuvieron en esta etapa estudiantil, en especial al profesor Christian Ledezma por su valiosa guía, consejos, aporte de ideas y conocimiento que hicieron posible la elaboración de este trabajo.

Finalmente, quiero agradecer a Cristian Recabarren por haberme autorizado el uso de los parámetros geotécnicos del depósito de relave en estudio.

INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
I. INTRODUCCIÓN	13
I.1. Objetivos.....	14
II. DESCRIPCIÓN Y ESTADO DE LA OBRA	15
III. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA	16
III.1. Suelo de Fundación.....	16
III.2. Materiales de Construcción Muros del Depósito de Relave.....	17
III.2.1. Material Estéril Mina	17
III.2.2. Material de Transición	17
III.3. Resumen Parámetros Geotécnicos.....	17
IV. MODELACIÓN NUMÉRICA.....	20
IV.1. MODELOS CONSTITUTIVOS	20
IV.1.1. Morh-Coulomb.....	21
IV.1.2. Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSS)	22
IV.1.3. UBC3D-PLM	26

V.	SISMO DE DISEÑO.....	29
VI.	MODELACIÓN EN FLAC2D	32
VI.1.	Modelos constitutivo de los materiales.....	33
VI.2.	Parámetros geotécnicos adoptados en Flac2D.....	33
VI.3.	Malla de diferencias finitas.....	34
VI.4.	Nivel Freático	35
VI.5.	Amortiguamiento de Rayleigh.....	35
VI.6.	Condiciones de borde	38
VI.7.	Acondicionamiento del sismo de diseño	39
VI.8.	Resultados análisis dinámico en Flac2D	41
VI.8.1.	Estimación de desplazamientos	42
VI.8.2.	Aceleraciones horizontales	45
VI.8.3.	Función de amplificación.....	47
VII.	MODELACIÓN EN PLAXIS2D.....	48
VII.1.	Modelos constitutivos de los materiales.....	50
VII.1.	Parámetros geotécnicos adoptados en Plaxis2D.....	50
VII.2.	Malla de diferencias finitas	53
VII.3.	Nivel freático	54
VII.4.	Amortiguamiento de Rayleigh	55
VII.5.	Condiciones de borde	55
VII.6.	Acondicionamiento del sismo de diseño	56

VII.7. Resultados análisis dinámico en Plaxis2D	59
VII.7.1. Estimación de desplazamientos	60
VII.7.1. Aceleraciones Horizontales.....	64
VII.7.1. Función de amplificación.....	66
VII.7.2. Resultados licuefacción del relave en Plaxis2D	68
VIII. COMPARACIÓN RESULTADOS FLAC2D VS PLAXIS2D	71
VIII.1. Acondicionamiento del sismo	71
VIII.1. Comparación de desplazamientos horizontales y verticales	74
VIII.2. Comparación de Aceleraciones horizontales y pseudo-espectros de repuestas	78
VIII.3. Comparación función de amplificación.....	83
IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	86
X. BIBLIOGRAFIA.....	89
XI. ANEXOS.....	91
XII. ANEXO A: FASES CONSTRUCTIVAS PLAXIS2D.....	92
XIII. ANEXO B: NIVEL FREATICO POR FASES PLAXIS2D.....	93
XIV. ANEXO C: RESULTADOS TENSIONES-EXCESO DE PRESIONES DE POROS PLAXIS2D (MC).....	94
XV. ANEXO D: RESULTADOS TENSIONES-EXCESO DE PRESIONES DE POROS PLAXIS2D (HSS).....	97

INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla II-1: Características geométricas muro Principal.....	15
Tabla IV-1: Resumen parámetros geotécnicos suelo de fundación	18
Tabla IV-2: Resumen parámetros geotécnicos materiales de Muro	19
Tabla V-1: Resumen de PGA estudio de amenaza sísmica	29
Tabla V-2: Principales características del sismo en campo libre.....	30
Tabla VI-1: Modelos constitutivos utilizados por unidad de suelo	33
Tabla VI-2: Distancia máxima entre nodos y frecuencia máxima de propagación en los materiales de los modelos numéricos	35
Tabla VI-3: Razones de amortiguamiento para los distintos materiales.....	37
Tabla VI-4: Verificación sismo recuperado en afloramiento rocoso en el modelo numérico (Flac2D).....	41
Tabla VI-5: Resumen de aceleraciones máximas en PC- 	45
Tabla VII-1: Modelos constitutivos utilizados en plaxis2D	50
Tabla VII-2: Resumen parámetros calibrados material Estéril Mina con modelo HSS	52
Tabla VII-3: Resumen parámetros material de relave con modelo UBC3D-PLM.....	52
Tabla VII-4: Distancia promedio entre nodos y frecuencia máxima de propagación en los materiales de los modelos numéricos	54
Tabla VII-5: Verificación sismo recuperado en afloramiento rocoso en el modelo numérico (Plaxis2D) .	58
Tabla VII-6: Resumen aceleraciones máximas en los PC-Plaxis2D	64
Tabla VIII-1: Comparación de las características del sismo de entrada.....	73
Tabla VIII-2: Comparación desplazamientos horizontales.....	77
Tabla VIII-3: Comparación desplazamientos verticales.....	77
Tabla VIII-4: Comparación aceleraciones máximas en cada punto de control	82

INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura IV-1:Desviador de tensiones vs Deformación unitaria	18
Figura IV-2: Desviador de tensiones vs presión efectiva media.....	18
Figura IV-3: Deformación volumétrica vs deformación unitaria	18
Figura IV-4: Índice de vacíos vs presión efectiva media.....	18
Figura IV-1: Relación hiperbólica tensión-deformación en carga primaria para un ensayo Triaxial drenado estándar (Plaxis, 2023).....	23
Figura IV-2: parámetro de rigidez en el ensayo de corte cíclico (Plaxis, 2023).....	25
Figura IV-3: Regla original de endurecimiento UBCSAND (Plaxis, 2023)	27
Figura V-1: Registro sísmico utilizado en el estudio. (a) Registro sintético en el dominio del tiempo, (b) registro en el dominio de las frecuencias; (c) pseudo-espectro de aceleraciones	31
Figura VI-1: Deposito de relave modelado en Flac2D- Última fase de crecimiento.....	32
Figura VI-2: Amortiguamiento de Rayleigh utilizados	37
Figura VI-3: Esquema de acondicionamiento de señal.....	39
Figura VI-4: (a) Sismo de diseño; (b) Sismo en superficie de afloramiento rocoso (Flac2D)	40
Figura VI-5: Comparación espectros de respuesta modelo en Flac2D y sismo de diseño	40
Figura VI-6: Comparación de Intensidad de Arias en Flac2D	41
Figura VI-7: Puntos de control (PC) Flac2D	42
Figura VI-8: Desplazamientos horizontales (m) en Flac2D	43
Figura VI-9: Desplazamientos verticales (m)	43
Figura VI-10: Desplazamiento horizontales y verticales coronamiento muro en Flac2D.....	44
Figura VI-11:Aceleraciones horizontales en los puntos de control de interés.....	46
Figura VI-12: Función de amplificación muro depósito de relave en Flac2D	47
Figura VII-1: Depósito de relave modelado en Plaxis2D-Última Fase de crecimiento	49
Figura VII-2:Desviador de tensiones vs Deformación unitaria	51
Figura VII-3: Desviador de tensiones vs presión efectiva media	51
Figura VII-4: Deformación volumétrica vs deformación unitaria.....	51
Figura VII-5: Índice de vacíos vs presión efectiva media	51
Figura VII-6: Elemento 15-node (Plaxis,2024)	53

Figura VII-7: Nivel freático modelado en la última fase constructiva.	54
Figura VII-8: (a) Sismo de diseño; (b) Sismo en superficie de afloramiento rocoso (Plaxis2D).....	57
Figura VII-9: Comparación espectros de respuesta modelo en Plaxis2D y sismo de diseño	57
Figura VII-10: Comparación de Intensidad de Arias en Plaxis2D	58
Figura VII-11: Puntos de control (PC) Plaxis2D.....	59
Figura VII-12: Desplazamientos horizontales (m) en Plaxis2D-Modelo N°1.....	61
Figura VII-13: Desplazamientos horizontales (m) en Plaxis2D-Modelo N°2.....	61
Figura VII-14: Desplazamientos verticales (m) en Plaxis2D-Modelo N°1	61
Figura VII-15: Desplazamientos verticales (m) en Plaxis2D-Modelo N°2.....	61
Figura VII-16: Desplazamientos horizontales (m) en Plaxis2D-Modelo N°1.....	62
Figura VII-17: Desplazamientos horizontales (m) en Plaxis2D-Modelo N°2.....	62
Figura VII-18: Desplazamientos verticales (m) en Plaxis2D-Modelo N°1	63
Figura VII-19: Desplazamientos verticales (m) en Plaxis2D-Modelo N°2.....	63
Figura VII-20: Aceleraciones horizontales en los puntos de control de interés; (a): Modelo N°1, (b): Modelo N°2.....	65
Figura VII-21: Función de amplificación muro depósito de relave en Plaxis2D: (a): Modelo N°1; (b): Modelo N°2.....	67
Figura VII-22 Licuefacción del relave.....	69
Figura VII-23: Secciones evaluando licuefacción del relave en profundidad	69
Figura IX-3: Licuefacción sección 1.....	70
Figura IX-4 Licuefacción sección 2.....	70
Figura IX-5: Licuefacción sección 3.....	70
Figura VIII-1: Comparación aceleraciones horizontales	72
Figura VIII-2: Comparación pseudo-espectros de aceleraciones	72
Figura VIII-3: Comparación Intensidad de Arias	73
Figura VIII-4: Puntos de control (PC)-(a): Modelo Flac2D; (b): Modelo Plaxis2D	75
Figura VIII-5: Desplazamientos horizontales coronamiento talud aguas arriba	76
Figura VIII-6: Desplazamientos verticales coronamiento talud aguas arriba.....	76
Figura VIII-7: Desplazamientos horizontales centro coronamiento	76
Figura VIII-8: Desplazamientos verticales centro coronamiento	76
Figura VIII-9: Desplazamientos horizontales coronamiento talud aguas abajo	76

Figura VIII-10: Desplazamientos verticales coronamiento talud aguas abajo	76
Figura VIII-11: Puntos de control (PC) aceleraciones horizontales- (a): Modelo en Flac2D; (b) Modelo en Plaxis2D.....	79
Figura VIII-12: Aceleraciones horizontales punto 1	80
Figura VIII-13: Aceleraciones horizontales punto 2	80
Figura VIII-14: Aceleraciones horizontales punto 3	80
Figura VIII-15: Pseudo-espectro de aceleraciones horizontales punto 1.....	81
Figura VIII-16: Pseudo-espectro de aceleraciones horizontales punto 2.....	81
Figura VIII-17: Pseudo-espectro de aceleraciones horizontales punto 3.....	82
Figura VIII-18: Función de amplificación: Coronamiento-Base Muro.....	85
Figura VIII-19: Función de amplificación: Coronamiento-Afloramiento Rocoso	85
Figura XIII-1: Fases constructivas Plaxis2D: (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase final.....	92
Figura XIV-1: Nivel freático por fases constructivas Plaxis2D: (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase final.	93
Figura XV-1: Tensiones totales verticales Plaxis2D (MC): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo	94
Figura XV-2: Tensiones efectivas verticales Plaxis2D (MC): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo	95
Figura XV-3: Exceso de presión de poros Plaxis2D (MC): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo	96
Figura XVI-1: Tensiones totales verticales Plaxis2D (HSS): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo	97
Figura XVI-2: Tensiones efectivas verticales Plaxis2D (HSS): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo	98
Figura XVI-3: Exceso de presión de poros Plaxis2D (HSS): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo	99

RESUMEN

El presente trabajo de tesis se realiza con el objetivo de analizar el comportamiento dinámico de un depósito de relaves ubicado en una zona de alta sismicidad en Chile, país caracterizado por una importante actividad sísmica y una industria minera altamente desarrollada. La estabilidad de los depósitos de relaves constituye un aspecto clave en la seguridad minera, debido al alto potencial de daño que podría provocar una falla estructural, afectando no solo las operaciones productivas, sino también el medio ambiente y las comunidades aledañas.

En este contexto, la necesidad de contar con herramientas de análisis confiables y representativas se vuelve fundamental. Por ello, este estudio emplea métodos numéricos avanzados a través de dos softwares ampliamente reconocidos en el ámbito geotécnico: Flac2D y Plaxis2D. Ambos programas permiten simular el comportamiento de los materiales bajo condiciones sísmicas, considerando distintos modelos constitutivos y niveles de complejidad. En particular, se aplican modelos como el Mohr-Coulomb, el Hardening Soil with Small Strain Stiffness y el UBC3D-PLM, que permiten evaluar desde comportamientos elasto-plásticos simples hasta fenómenos complejos como la licuefacción.

Este trabajo no solo busca obtener una estimación más realista de los desplazamientos, presiones de poro y posibles mecanismos de falla, sino también generar criterios técnicos que permitan comparar metodologías y validar resultados con mayor certeza. Asimismo, pretende contribuir a la mejora de los procedimientos de diseño y evaluación sísmica en la ingeniería de relaves en Chile, promoviendo una gestión de riesgos más eficiente y acorde con los estándares internacionales. De esta manera, la tesis se convierte en un aporte técnico y práctico para la ingeniería geotécnica nacional y la sostenibilidad de la industria minera.

ABSTRACT

This thesis aims to analyze the dynamic behavior of a tailings storage facility (TSF) located in a high seismicity zone in Chile, a country known for its significant seismic activity and highly developed mining industry. The stability of tailings dams is a critical aspect of mining safety due to the high potential for structural failure to cause severe environmental, social, and economic impacts.

In this context, the need for reliable and representative analytical tools becomes essential. Therefore, this study applies advanced numerical methods using two widely recognized geotechnical software programs: Flac2D and Plaxis2D. Both tools enable simulation of the material behavior under seismic loading, incorporating different constitutive models and levels of complexity. Specifically, models such as Mohr-Coulomb, Hardening Soil with Small Strain Stiffness, and UBC3D-PLM are implemented to capture responses ranging from simple elasto-plastic behavior to complex phenomena like liquefaction.

The primary goal of this work is not only to provide a more realistic estimation of displacements, pore water pressures, and potential failure mechanisms, but also to develop technical criteria to compare methodologies and validate results with greater confidence. Furthermore, this thesis aims to contribute to the improvement of seismic design and assessment practices in Chilean tailings engineering, promoting a more efficient risk management approach aligned with international standards.

Thus, this research offers both technical and practical contributions to the field of geotechnical engineering and supports the long-term sustainability of the mining industry in Chile.

I. INTRODUCCIÓN

Los depósitos de relaves son estructuras de contención utilizadas en la minería para almacenar los residuos generados durante el proceso de extracción de minerales (relaves). Cuando se extraen metales preciosos como el oro, plata, hierro o el cobre, el material de mena se somete a un proceso de molienda y concentrado para separar el mineral de valor económico de la roca. Los residuos restantes conocidos como relaves, contienen una mezcla de agua, sedimentos y requieren ser gestionados de manera adecuada para evitar daños al medio ambiente y a las comunidades cercanas.

Los depósitos de relaves se construyen generalmente en áreas cercanas a las minas, en zonas donde la topografía y las condiciones geográficas permiten la contención de grandes volúmenes de relave. Los relaves se almacenan en estos depósitos, que pueden tomar forma de presa, piscinas o depósitos subterráneos, dependiendo de las características del terreno y el diseño de la mina. Sin embargo, la opción más comúnmente utilizada para la depositación de relaves es la construcción de muros de empréstito y/o arena, debido a su capacidad de albergar grandes cantidades de material de manera eficiente.

La principal función de los depósitos de relaves es contener los residuos generados de manera controlada. Esta gestión busca evitar la dispersión de minerales pesados u otro contaminante al entorno natural, protegiendo así el suelo, el agua y a biodiversidad. El almacenamiento adecuado de los relaves también evita que los residuos lleguen a cuerpos de agua cercanos, como ríos o lagos, lo que podría generar daños ecológicos de gran escala.

La importancia de los depósitos de relaves radica en su papel de la minimización de los impactos negativos de la minería. Si bien la extracción de minerales es esencial para el desarrollo industrial y económico de muchos países. La falta de gestión adecuada de los depósitos de relaves puede resultar en desastres ambientales, como los derrumbes de presas de relaves, que han ocasionado graves consecuencias tanto para el medio ambiente como las personas que habitan cercanas a las minas.

Por esta razón, la ingeniería y la gestión de los depósitos de relaves han evolucionado para cumplir con estrictos estándares de seguridad y sustentabilidad. Además, las normativas gubernamentales y las organizaciones medioambientales exigen un monitoreo constante de estos depósitos, así como el desarrollo de tecnologías más limpias y eficaces para la gestión de los residuos mineros. En este contexto, los avances en técnicas de reciclaje y tratamiento de aguas también están ayudando a reducir los impactos negativos de los relaves, favoreciendo un enfoque más sostenible en la industria minera.

En resumen, los depósitos de relaves son esenciales para la gestión de los residuos mineros y desempeñan un papel fundamental en la protección del medio ambiente. Sin embargo, su correcta administración es crucial para evitar efectos negativos a largo plazo en los ecosistemas y las comunidades cercanas, lo que subraya la importancia de continuar investigando y aplicando prácticas más seguras y responsables en la industria minera.

I.1. Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es analizar el comportamiento dinámico de un depósito de relaves, realizando una comparación mediante dos softwares: Flac2D y Plaxis2D. Esta comparación se realiza en un perfil bidimensional que presenta la condición más desfavorable del depósito de relaves.

Dentro de los objetivos específicos para el desarrollo del presente trabajo es considerar los siguientes puntos:

- Calibración de los modelos constitutivos mediante ensayos Triaxiales y mediante referencias bibliográficas.
- Calibración sismo de diseño.
- Realizar un análisis dinámico de deformaciones mediante Plaxis2D utilizando modelos constitutivos Elástico-Lineal (basamento rocoso) y Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb (materiales que componen el depósito de relave).
- Realizar un análisis dinámico de deformaciones mediante Plaxis2D utilizando modelos constitutivos Elástico-Lineal (basamento rocoso), No-Lineal: Hardening Soil With Small Strain Stiffness (materiales que componen el cuerpo del muro del depósito de relave) y UBC3D-PLM (relave).
- Comparar los resultados tensión-deformación de los puntos de interés entre Flac2D y Plaxis2D.

II. DESCRIPCIÓN Y ESTADO DE LA OBRA

El depósito de relave estudiado está conformado por tres muros de contención (Norte, Principal y Sur). El presente estudio se realizó en la sección más desfavorable el cual se encuentra en el Muro Principal.

El muro Principal contempla 10 Fases de crecimiento hacia aguas abajo (Fase 0 a Fase 9). El cuerpo del muro está conformado por Estéril de Mina, mientras que el talud aguas arriba considera capas de material drenante, filtro y transición en las Fases 0 y 1. Desde la Fase 2, se genera un cambio de diseño considerando un único material de cobertura (2C*) y una impermeabilización con un paquete de geosintéticos (geotextil más geomembrana).

En la Tabla II-1se muestra un resumen de las características geométricas del muro Principal.

Tabla II-1: Características geométricas muro Principal

Descripción	Diseño
Método de crecimiento	Aguas abajo
Etapas de crecimiento	10 fases
Talud aguas arriba	H:V=2,0:1,0
Talud aguas abajo Fases 0 a 1	H:V=1,5:1,0
Talud aguas abajo Fases 2 a 4	H:V =1,7:1,0
Talud aguas abajo Fases 5 a 9	H:V=1,9:1,0
Ancho 2C*	3,0 m ⁽¹⁾
Revancha mínima de operación	5,0 m
Revancha mínima de cierre	3,0 m

(1) : Si bien el ancho compactado mínimo es de 3,0 m, el ancho total de construcción es de 5,0 m, considerando berma de seguridad.

III. CARACTERIZACIÓN GEOTÉCNICA

La caracterización geotécnica consiste en el proceso de recolección, análisis e interpretación de datos del suelo con el fin de determinar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales que lo conforman. Este estudio es fundamental para evaluar el comportamiento del terreno frente a cargas estáticas y dinámicas, y constituye la base para el desarrollo de modelos numéricos confiables.

Los parámetros geotécnicos más relevantes incluyen el peso específico, cohesión, ángulo de fricción interna, módulo de elasticidad y rigidez a pequeñas deformaciones. Estos valores permiten definir el comportamiento mecánico del suelo y son esenciales para seleccionar adecuadamente los modelos constitutivos.

A continuación, se describen los materiales que conforman el depósito de relave.

III.1. Suelo de Fundación

La zona del Depósito de Relave está ubicada en el norte de Chile, entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera, aproximadamente a 150 km hacia el interior de la zona de subducción que es paralela a la línea de costa chilena.

En general, la zona se caracteriza por depósitos Aluviales y Coluviales recientes, y fanglomerados antiguos (Gravas de Atacama). Estos materiales sobreyacen a un basamento compuesto por rocas metasedimentarias, volcanoclásticas, metavolcánicas e intrusivas.

Las características de los horizontes se describen a continuación:

Depósitos Aluviales: Presentan espesores variables que van desde los 5 a 40 m. Se describen como suelos arenosos bien gradados (SW) y gravas mal a bien gradadas (GP, GW), con escaso contenido de finos no plásticos y 10% de sobretamaño. Compacidad alta, humedad baja a nula y bajo contenido de sales (<1%).

Gravas de Atacama: Presentan espesores variables que van desde los 8 a 22 m. Se describen como gravas limosas con arena con finos no plásticos y 10% de sobretamaño. Compacidad alta, humedad baja a nula. Las Gravas de Atacama suelen estar cementadas, por lo tanto, presentan mayor dureza, mayor compacidad y menor conductividad hidráulica que los depósitos aluviales y coluviales.

Basamento Rocoso: Consiste en brechas andesíticas de la Formación Abundancia, granito/metagranito del Batolito de Copiapó, y formación Punta del Cobre en el Muro Sur.

III.2. Materiales de Construcción Muros del Depósito de Relave

III.2.1. Material Estéril Mina

El cuerpo de los muros de contención del DR Los Diques se construye considerando materiales del tipo “Run of the Mine” (ROM), principalmente de Metasedimentos Indiferenciados (UG-30) y Metalvolcanoclásticos indiferenciados (UG-40). La resistencia a la compresión no confinada de estas rocas intactas varía entre 130 MPa y 230 MPa.

III.2.2. Material de Transición

El Depósito de Relave en un comienzo de su diseño consideró ocupar en el talud aguas arriba 3 capas de materiales conformados por: materiales de filtro, material drenaje y material transición. Estos materiales se utilizaron para la construcción de los muros en Fase 0 a 1. A partir de la Fase 2 se construye con un único material de cobertura y una impermeabilización con geosintéticos (geotextil más geomembrana). Para el Muro Principal se consideró el material 2C*.

Para la construcción de los modelos numéricos se considera que el material de transición, ubicado en el espaldón aguas arriba, es 2C* para todas las Fases de crecimiento.

III.3. Resumen Parámetros Geotécnicos

Para el material estéril de la mina, se cuenta con información detallada proveniente de ensayos Triaxiales CID realizados en probetas con dimensiones de 100x180 mm. Estos ensayos permiten evaluar las características mecánicas y el comportamiento del material bajo condiciones específicas de carga (8 kg/cm², 12 kg/cm² y 16 kg/cm²). Las gráficas que ilustran los resultados obtenidos de este ensayo se presentan desde la Figura III-1 a la Figura III-4, proporcionando una representación visual clara de los datos obtenidos durante las pruebas.

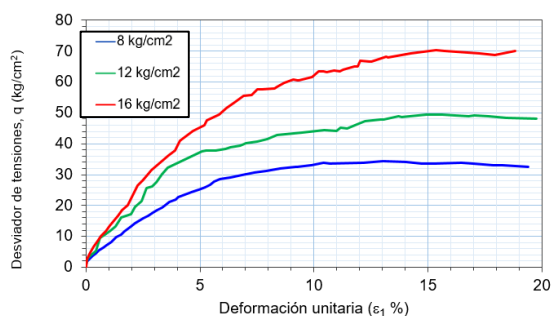


Figura III-1: Desviador de tensiones vs Deformación unitaria

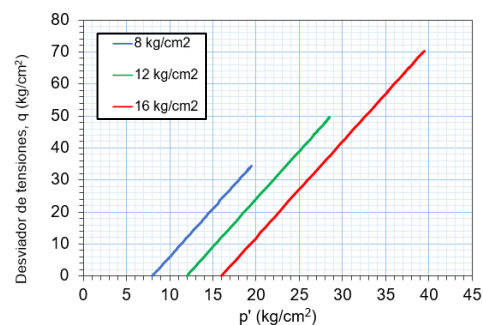


Figura III-2: Desviador de tensiones vs presión efectiva media

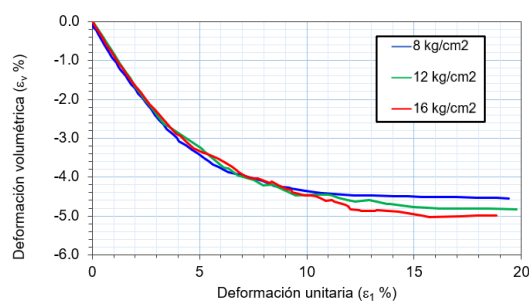


Figura III-3: Deformación volumétrica vs deformación unitaria

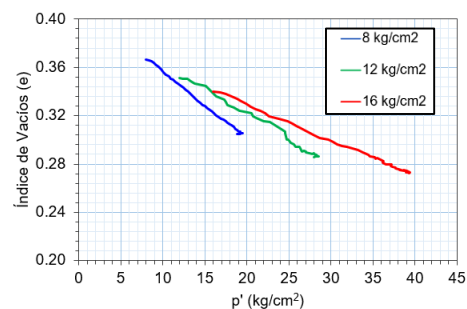


Figura III-4: Índice de vacíos vs presión efectiva media

En la Tabla III-1 y Tabla III-2 se muestra un resumen de los parámetros geotécnicos adoptados para todos los materiales observados en el suelo de fundación del Depósito de Relave y los materiales de construcción de los Muros, respectivamente.

Tabla III-1: Resumen parámetros geotécnicos suelo de fundación

Parámetro	Símbolo	Unidad	Depósito Aluviales	Grava de Atacama	Roca Basal
Peso unitario	γ_t	t/m ³	2,10	2,20	2,66
Ángulo de fricción interna	ϕ	(°)	40	44	-
Cohesión	c	t/m ²	2,5	3,5	-
Coefficiente de Poisson	ν	-	0,3	0,3	0,2

Parámetro	Símbolo	Unidad	Depósito Aluviales	Grava de Atacama	Roca Basal
Módulo de deformación estático	E_s	t/m ²	$3.200 \cdot \sigma_3'^{0,5} + 2.000$	$4.200 \cdot \sigma_3'^{0,5} + 2.000$	470.000
Módulo de deformación dinámico	E_d	t/m ²	2,5 E_s	2,5 E_s	470.000

Tabla III-2: Resumen parámetros geotécnicos materiales de Muro

Parámetro	Símbolo	Unidad	Estéril Mina	Cobertura (2C*)	Relave
Peso unitario	γ_t	t/m ³	1,95	1,78	2,66
Ángulo de fricción interna	ϕ	(°)	41	38	25
Cohesión	c	t/m ²	3,0	0,0	0,0
Coefficiente de Poisson	ν	-	0,3	0,3	0,3
Módulo de deformación estático	E_s	t/m ²	$1.850 \cdot \sigma_3'^{0,5} + 2.000$	$1.850 \cdot \sigma_3'^{0,5} + 2.000$	$600 \cdot \sigma_3'^{0,5} + 500$
Módulo de deformación dinámico	E_d	t/m ²	2,5 E_s	2,5 E_s	2,5 E_s

IV. MODELACIÓN NUMÉRICA

La modelación numérica es una herramienta fundamental en la ingeniería geotécnica moderna que permite simular el comportamiento del suelo y las estructuras bajo diferentes condiciones de carga, geometría y propiedades de materiales. A través de la formulación matemática de las leyes físicas que rigen el comportamiento mecánico del suelo, es posible predecir respuestas complejas como deformaciones, esfuerzos, presiones de poro, licuefacción, estabilidad de taludes y efectos sísmicos.

Este tipo de modelación se basa en métodos computacionales, entre los cuales destacan el método de los elementos finitos (FEM) y el método de diferencias finitas (FDM). Ambos métodos discretizan el dominio continuo en una malla de elementos o nodos, permitiendo resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan el equilibrio y la deformación del medio.

En el presente estudio se emplearon los programas Flac2D, basado en el método de diferencias finitas, y Plaxis2D, basado en elementos finitos. Estos softwares permiten incorporar modelos constitutivos avanzados que representan el comportamiento no lineal del suelo, condiciones de saturación, efectos dinámicos.

La modelación numérica permite realizar análisis en condiciones estáticas y dinámicas, evaluar el efecto de diferentes configuraciones geométricas y propiedades de materiales, y prever el desempeño de obras geotécnicas ante eventos extremos como los sismos. Además, ofrece la posibilidad de estudiar escenarios hipotéticos, optimizar diseños y mejorar la comprensión de fenómenos complejos que serían difíciles de evaluar únicamente mediante ensayos físicos o métodos analíticos.

Una parte esencial de la modelación numérica es la elección del modelo constitutivo, el cual describe matemáticamente la relación entre tensiones y deformaciones del material. La selección adecuada de este modelo depende del tipo de suelo, las condiciones de carga y el objetivo del análisis

IV.1. MODELOS CONSTITUTIVOS

Un modelo constitutivo es una representación matemática y física que describe el comportamiento mecánico de un material, como el suelo o la roca, bajo diversas condiciones de carga, deformación, entre otros factores. Estos modelos buscan predecir como un material responderá a fuerzas externas y son fundamentales para el análisis y diseño de estructuras civiles, estructurales y geotécnicas.

El modelo constitutivo establece las relaciones entre las tensiones (fuerzas internas) y las deformaciones (cambio en la forma) de un material, teniendo en cuenta sus propiedades y características, como la elasticidad, plasticidad, resistencia, rigideces y la capacidad de experimentar procesos de endurecimiento o ablandamiento.

Por ejemplo, en el caso de suelo, un modelo constitutivo puede predecir como el suelo se comporta cuando se somete a compresión, extensión o como puede comportarse bajo cargas cíclicas, como ocurren en los terremotos.

A continuación, se detallan los modelos constitutivos utilizados para el presente estudio:

IV.1.1. Mohr-Coulomb

Considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no-lineal del suelo (Nieto et al., 2009). Es un modelo elastoplástico perfecto (isotrópico) desarrollado a partir de la composición de la ley de Hooke y la forma generalizada del criterio de falla Mohr-Coulomb.

El modelo Mohr-Coulomb es uno de los modelos constitutivos más utilizadas en geotécnica, especialmente para describir el comportamiento de suelos y rocas bajo esfuerzo de corte y de compresión. Este modelo es particularmente útil para analizar el comportamiento plástico de los materiales cuando se aproximan a su capacidad de carga, en situaciones de deslizamiento, falla.

El modelo Mohr-Coulomb se basa en dos conceptos principales:

1. Cohesión (c): Es la fuerza de adhesión entre las partículas de un material. Esta propiedad se debe a las fuerzas moleculares, como las fuerzas de Van der Waals o los enlaces químicos, que tienden a mantener las partículas juntas, incluso sin una carga externa significativa. La cohesión depende de varios factores, como el tipo de material (arcilla, limos, etc.), la distribución de tamaños de partículas, el contenido de agua (puede actuar como agente cohesivo) y la presencia de minerales cementantes (en suelos como las arcillas, la cohesión es principalmente debido a fuerzas químicas y electrostáticas entre las partículas de arcilla).
2. Ángulo de fricción interna (ϕ): Representa la resistencia al deslizamiento de las partículas del material cuando se les aplica un esfuerzo de corte. Depende de la geometría de las partículas y de la fuerza de fricción entre ellas.

El modelo establece que la tensión de corte máxima ($\tau_{\max}$) que un material puede soportar antes de fallar está relacionada con la tensión normal (σ_n) aplicada sobre el material a través de la siguiente ecuación:

$$\tau = c + \sigma_n \cdot \tan(\phi) \quad (1)$$

Donde:

τ : Esfuerzo de corte.

σ_n : Tensión normal (perpendicular a la superficie).

C : Cohesión del material.

ϕ : Ángulo de fricción interna del material.

Esta ecuación describe la superficie de falla del material en el espacio de las tensiones, donde cualquier combinación de esfuerzos de corte y normal que se encuentre por encima de esta superficie provocará la falla del material.

IV.1.2. Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSS)

El modelo Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSS) es una extensión del modelo Hardening Soil (HS), que es ampliamente utilizado en geotecnia para describir el comportamiento no lineal de suelos, especialmente en términos de su comportamiento bajo cargas de compresión y corte. La principal diferencia del modelo HSS en comparación con el modelo HS es que incorpora el comportamiento a pequeñas deformaciones lo que permite una representación más precisa de la rigidez del suelo en el rango de deformaciones muy pequeñas, donde los efectos elásticos pueden ser significativos.

Al someter una probeta de suelo a una tensión desviadora, el suelo muestra un decrecimiento de rigidez, lo que provoca que se generen deformaciones plásticas irreversibles en el material. En el caso de un ensayo triaxial, la relación entre la deformación axial y la tensión desviadora se asemeja a una hipérbola. Esta relación fue formulada en un comienzo por Kondner (1963) y usada posteriormente por Duncan & Chang (1970) en su modelo.

El modelo Hardening Soil supera al primer modelo hiperbólico en tres aspectos. En primer lugar, se distingue por utilizar la teoría de la plasticidad en vez de la teoría de elasticidad. Además, incluye la dilatancia del suelo y, por último, se introduce una superficie de fluencia variable en el espacio (yield cap). En la Figura IV-1 se muestra una gráfica del modelo hiperbólico.

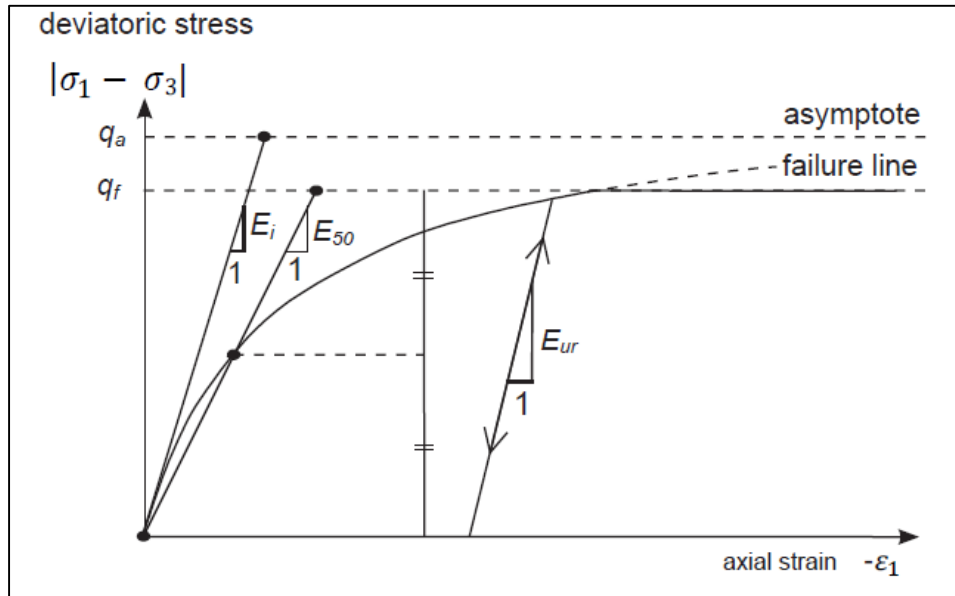


Figura IV-1: Relación hiperbólica tensión-deformación en carga primaria para un ensayo Triaxial drenado estándar (Plaxis, 2023)

En la Figura IV-1, q_a representa el valor asintótico de resistencia, y E_{50} es el módulo de deformación correspondiente al alcanzar el 50% de la tensión desviadora de falla q_f . La expresión que establece el esfuerzo desviador de falla es derivada del criterio de falla de Mohr-Coulomb involucrando los valores de resistencia c y ϕ ; mientras que q_a resulta ser una fracción de q_f dada por la relación de falla R_f , como se describe en la siguiente expresión:

$$q_f = (p + c \cdot \cot(\phi)) \cdot \frac{6 \cdot \sin(\phi)}{3 - \sin(\phi)} \quad (2)$$

$$q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (3)$$

De este modo, cuando $q=q_f$, el criterio de falla se satisface y la plasticidad perfecta ocurre, tal y como es establecido en el modelo de Mohr-Coulomb (Fowler, A. C, 1997).

Finalmente, el modelo Hardening Soil simula el comportamiento del suelo en trayectorias de carga y descarga teniendo en cuenta la rigidez que presenta el suelo. Para ello, se define un módulo elástico E_{ur} . No obstante, el rango de deformación en el que se puede considerar el suelo realmente elástico es muy pequeño. Además, con el aumento de la deformación, la rigidez del suelo cae se reduce de manera no lineal.

En condiciones dinámicas, se presenta una secuencia de carga y descarga debido a la carga cíclica a la que se encuentra sometida la masa de suelo. Esto conlleva a un comportamiento irreversible del suelo. En general, esto se observa en los terremotos, los que inducen pequeñas deformaciones en el suelo, en donde se exhibe un alto valor de rigidez de corte inicial G_0 que decrece a medida que la cantidad de energía disipada aumenta al incrementar deformación de corte.

Para tomar en cuenta estos aspectos, es que se utiliza el modelo Hardening Soil HS small, el cual corresponde a una extensión del Hardening soil, en donde solo se incluyen dos nuevas variables: Una alta rigidez en pequeñas deformaciones G_0 , y la deformación de corte en que G se ha reducido en un 70% de la rigidez de corte inicial G_0 ($\gamma_{0.7}$). La dependencia de este valor queda expresada por:

$$G_0 = G_0^{\text{ref}} \left(\frac{c \cdot \cos(\phi) - \sigma_3' \cdot \sin(\phi)}{c \cdot \cos(\phi) + p^{\text{ref}} \cdot \sin(\phi)} \right)^m \quad (4)$$

El típico comportamiento histerético se muestra en la Figura IV-2. La rigidez de corte tangente (G_t) y secante (G_s) al comienzo de la curva coinciden con la máxima rigidez de corte G_0 . Sin embargo, mientras aumenta la deformación de corte, se observa que la rigidez decae.

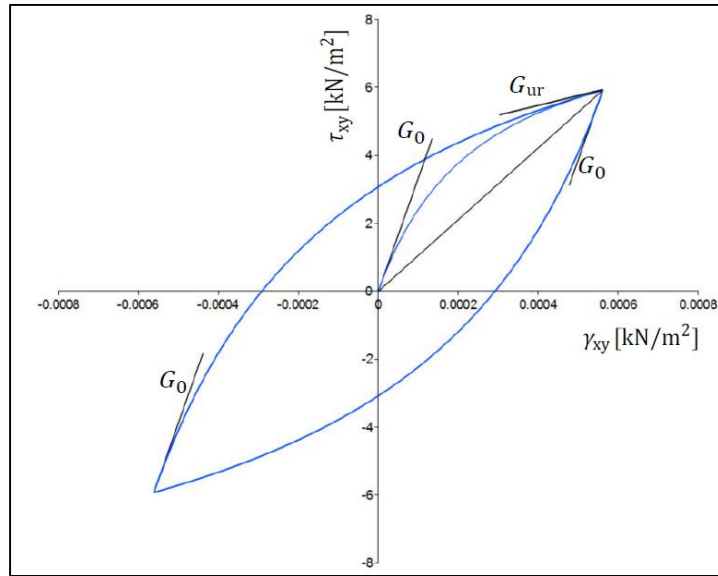


Figura IV-2: parámetro de rigidez en el ensayo de corte cíclico (Plaxis, 2023)

La relación de endurecimiento se representa por el parámetro E_{50} el cual es el módulo de rigidez dependiente de la tensión de confinamiento para la carga primaria y viene dado por la siguiente expresión:

$$E_{50} = E_{50}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cdot \cos(\phi) - \sigma_3' \cdot \sin(\phi)}{c \cdot \cos(\phi) + p^{\text{ref}} \cdot \sin(\phi)} \right)^m \quad (5)$$

Donde el valor E_{50}^{ref} representa el módulo de rigidez de referencia correspondiente a la presión de confinamiento de referencia p^{ref} . En Plaxis el valor del confinamiento de referencia p^{ref} es igual a 100 en unidades de tensión.

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

$$E_{\text{ur}} = E_{\text{ur}}^{\text{ref}} \left(\frac{c \cdot \cos(\phi) - \sigma_3' \cdot \sin(\phi)}{c \cdot \cos(\phi) + p^{\text{ref}} \cdot \sin(\phi)} \right)^m \quad (6)$$

Donde el valor $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ representa el módulo de rigidez de referencia correspondiente a la presión de confinamiento de referencia p^{ref} . En Plaxis el valor de $E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ viene dado por $3 \cdot E_{50}$.

IV.1.3. UBC3D-PLM

Este modelo se utiliza para analizar y predecir la respuesta de un suelo arenoso que se encuentra sometido a una sollicitación dinámica con el fin de estudiar el fenómeno de licuefacción. Este modelo es una extensión en 3D del UBCSAND que fue introducido por (Puebla et al., 1997) y desarrollado por Tsegaye (2010). Posteriormente, autores como Beaty y Byrne (2011) y (Petalas et al., 2012) han introducido modificaciones para que el modelo pueda reproducir con mayor precisión el comportamiento de un suelo bajo cargas dinámicas y cíclicas.

De manera similar al modelo UBCSAND original, UBC3D-PLM es un modelo de tensiones efectivas basado en la teoría de la plasticidad clásica con una regla de endurecimiento hiperbólico (Makra, 2013). La principal diferencia con UBCSAND es que UBC3D-PLM utiliza el criterio de Mohr-Coulomb en 3D en lugar de 2D para caracterizar adecuadamente la respuesta elástica y plástica del suelo ante cargas cíclicas.

La respuesta elástica se presenta cuando el suelo se encuentra en estado de descarga, y dicho comportamiento se caracteriza con los módulos de corte G^e y de compresibilidad K^e .

Por otro lado, el rango plástico cuenta con una regla de flujo no asociada que permite obtener las deformaciones a partir de la función de la superficie de potencial plástico. Los incrementos de deformación plástica estarán relacionados con los incrementos de la razón de tensiones mediante una constitutiva hiperbólica.

En la Figura IV-3 se muestra una gráfica de la regla de endurecimiento que rige la cantidad de deformación plástica como resultado de la movilización de la resistencia al corte.

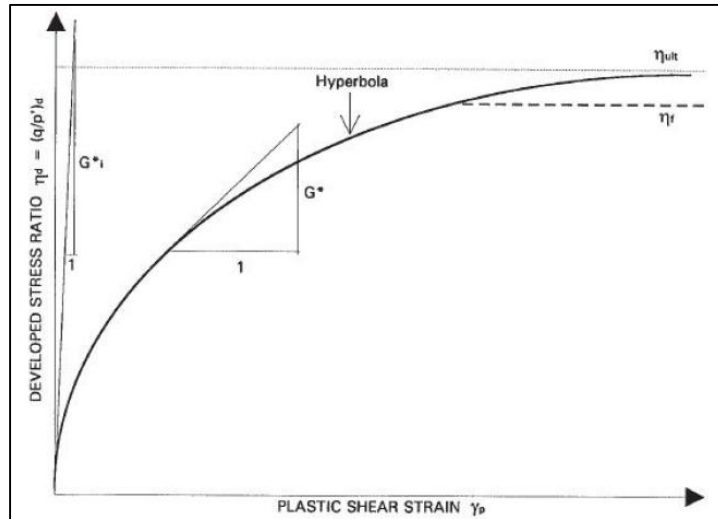


Figura IV-3: Regla original de endurecimiento UBCSAND (Plaxis, 2023)

La ley de endurecimiento se encuentra caracterizada por el módulo de corte plástico G^p y el número de ciclos de carga y descarga. Además, el comportamiento post licuefacción se basa en la degradación de la rigidez del suelo. Es decir, se utiliza un módulo de compresibilidad plástico K^p_G , el cual decrece en función de la deformación plástica generada durante la dilatación del suelo.

El fenómeno de licuación determinado por el modelo UBCS3D-PLM se puede explicar considerando que la resistencia al corte τ para suelos sin cohesión viene dada por la fórmula de Coulomb:

$$\tau = \sigma_{v0}' \cdot \tan(\phi) \quad (7)$$

Donde σ_{v0}' es la tensión vertical efectiva inicial y ϕ el ángulo de fricción interna del material.

De acuerdo a la fórmula de Terzaghi la tensión efectiva viene dada por:

$$\sigma_{v0}' = \sigma_{v0} - p_w \quad (8)$$

Donde σ_{v0} es la tensión vertical total y p_w la presión de poros.

Cuando el exceso de presión de poros Δp_w durante un terremoto, la fórmula (8) puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\sigma_{v0}' = \sigma_{v0} - (p_w + \Delta p_w) \quad (9)$$

El modelo UBC3D-PLM incorpora una ley isotr3pica no lineal para el comportamiento el3stico que se define en t3rminos del m3dulo de masa el3stica K y el m3dulo de corte el3stico G , que se define mediante la siguiente ecuaci3n:

$$K = k_B^{*e} \cdot p^{\text{ref}} \cdot \left(\frac{p'}{p^{\text{ref}}} \right)^{me} \quad (10)$$

$$G = k_G^{*e} \cdot p^{\text{ref}} \cdot \left(\frac{p'}{p^{\text{ref}}} \right)^{ne} \quad (11)$$

Donde k_B^{*e} es el factor del m3dulo de compresi3n volum3trico, k_G^{*e} es el factor del m3dulo de corte, p^{ref} la presi3n de referencia y los factores me y ne son par3metros que definen la tasa de dependencia de la tensi3n de rigidez.

V. SISMO DE DISEÑO

Para el análisis dinámico de deformaciones se tiene un estudio de amenaza sísmica que se considera representativo para la sección analizada.

El estudio genera seis registros sintéticos, tres de ellos para suelo tipo I ($V_s \geq 900$ m/s) y tres para tipo II ($400 \text{ m/s} \leq V_s < 900 \text{ m/s}$) conforme a la norma NCh433 of.1996 modificada en 2012, los que son aproximadamente equivalentes a los suelos tipo A y B del Decreto Supremo N°61, 2011.

El estudio realiza un análisis determinístico de la amenaza con el objetivo de calibrar los resultados del análisis probabilístico, considerando eventos históricos ocurridos en la zona del proyecto y escenarios hipotéticos representativos de las condiciones más desfavorables, tanto por las magnitudes escogidas como por las ubicaciones críticas en cuanto a distancia hipocentral mínima posible con respecto al sitio de estudio. El estudio concluye que los escenarios evaluados en forma determinística presentan apropiado respaldo o comprobación de la adecuación de los valores probabilísticos.

Los niveles de amenaza sísmica considerados corresponden al “sismo de diseño”, asociado a una probabilidad de excedencia (Pe) de 10% en 50 años y equivalente a un periodo de retorno medio (T) de 475 años, al “sismo máximo probable” (Pe= 10% en 100 años y T=949 años), al “sismo máximo considerado” (Pe= 10% en 250 años y T=2.373 años), al “sismo máximo creíble” (Pe=10 % en 500 años y T=4.746 años) y al “sismo máximo creíble-ICOLD” (Pe= 10% en 1.000 y T=9.491 años). Los valores medios de la aceleración horizontal máxima PGA en campo libre propuestos para dichos niveles de amenaza se resumen en la Tabla V-1.

Tabla V-1: Resumen de PGA estudio de amenaza sísmica

Aceleración máxima en campo libre, PGA (g)				
Sismo de Diseño	Sismo Max. Probable	Sismo Max. Considerado	Sismo Max. Creíble	Sismo Max. Creíble-ICOLD
0,493	0,558	0,646	0,714	0,784

Cabe destacar que no se consideró la componente vertical del movimiento, dado que en el estudio de amenaza sísmica se indica que esta se puede incorporar utilizando los mismos registros de la componente horizontal, pero no se proporciona los valores de PGA. En este contexto, se determinó utilizar solo la

componente horizontal, estimando que el efecto de la componente vertical no involucraría un cambio en las conclusiones respecto al comportamiento dinámico de los muros.

De acuerdo con lo señalado en el estudio de amenaza sísmica los registros sintéticos desarrollados para representar la amenaza sísmica fueron normalizados por una aceleración máxima de 1,0 g. Sin embargo, el proceso de compatibilización con los espectros de diseño resulta en registros con valores, en general, levemente superiores a 1,0 g, lo cual debe mantenerse para no alterar la compatibilidad.

Para usar los registros sintéticos en los análisis dinámicos, estos deben multiplicarse directamente por el valor de aceleración máxima correspondiente a la amenaza de diseño seleccionada para el proyecto. Por lo explicado anteriormente, al utilizar la aceleración del Sismo Máximo Creíble, el PGA resultante es de 0,80 g.

Para el presente estudio, se seleccionó el registro sintético denominado 03_SII, el cual corresponde al de mayor Intensidad de Arias y Potencial Destructivo de 3 registros propuestos para el sismo máximo creíble. En la Tabla V-2 se resumen las principales características del registro sintético utilizado en el análisis de deformaciones, mientras que en la Figura V-1, se muestra el registro en el dominio del tiempo y espectral, además del espectro de respuesta elástico.

Tabla V-2: Principales características del sismo en campo libre

Parámetro	Unidad	Registro 03_SII
Aceleración máxima campo libre, PGA	g	0,80
Duración total	s	62
Intensidad de Arias	m/s	39,03
Cruces por cero	1/s	10,29
Potencial Destructivo	m · s	0,37

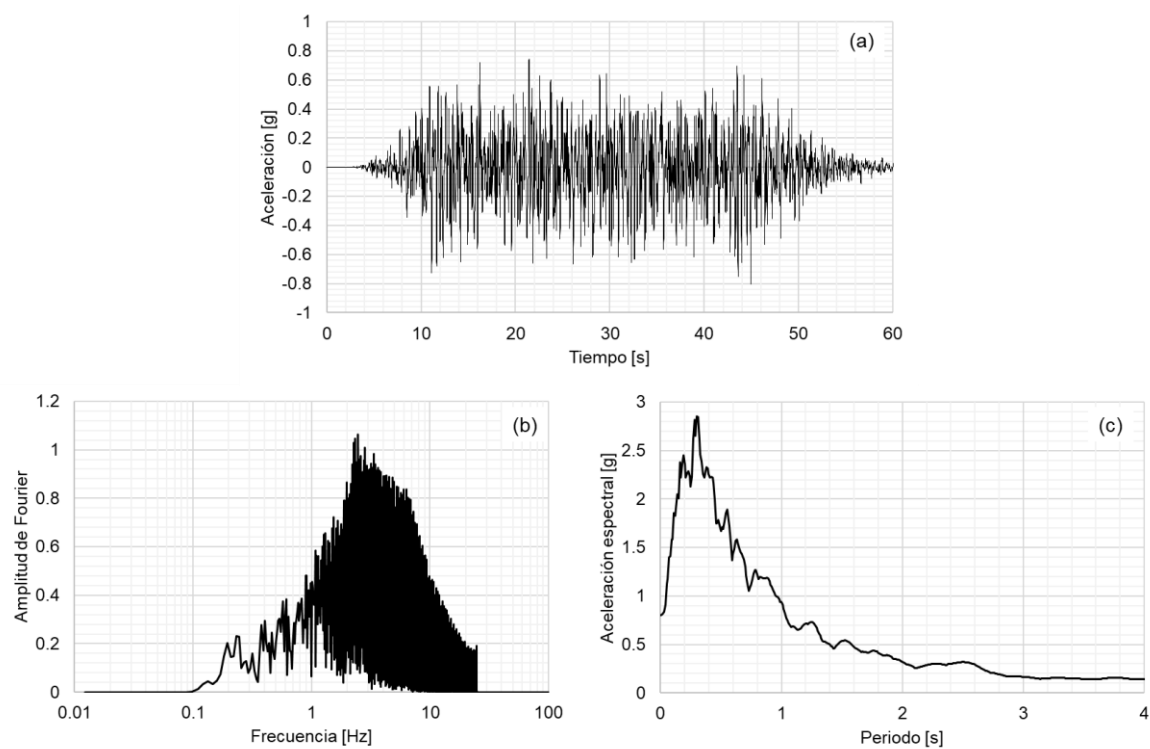


Figura V-1: Registro sísmico utilizado en el estudio. (a) Registro sintético en el dominio del tiempo, (b) registro en el dominio de las frecuencias; (c) pseudo-espectro de aceleraciones

VI. MODELACIÓN EN FLAC2D

Para evaluar las deformaciones estáticas y sísmicas del depósito de relaves se han desarrollado modelos numéricos con el software basado en el método de diferencias finitas Flac2D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) versión 8.1. El software resuelve un problema de equilibrio de fuerzas a través de un análisis lagrangiano, que permite agregar secuencialmente las etapas de crecimiento y analizar las deformaciones de la estructura en su condición estática y sísmica. A continuación, se describen las condiciones generales adoptadas en la modelación

Para generar las condiciones iniciales del análisis dinámico es necesario establecer los estados iniciales de tensiones de los materiales, así como la trayectoria de carga de estos antes de la aplicación del sismo. El análisis numérico incorpora dos etapas, según se describe a continuación:

- Análisis estático: Incluye la secuencia constructiva del depósito de relave en 6 fases, además del llenado del depósito. Corresponde a la etapa de inicialización del estado tensional.
- Análisis dinámico: Se evalúa la respuesta de cada muro aplicando la sollicitación sísmica indicada en la sección V.

Para lograr la configuración final proyectada del depósito de relave, se modela la secuencia constructiva según las fases de crecimiento, realizando un análisis estático para cada una de ellas. En la Figura VI-1 se muestra la última fase de crecimiento.

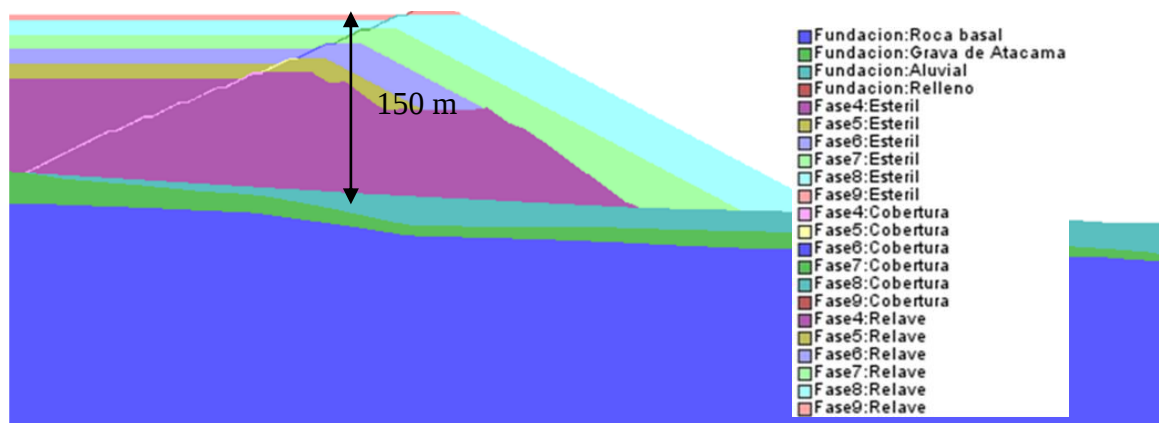


Figura VI-1: Deposito de relave modelado en Flac2D- Última fase de crecimiento

VI.1. Modelos constitutivo de los materiales

Para el análisis estático y dinámico se consideran los modelos constitutivos mostrados en la Tabla VI-1.

Tabla VI-1: Modelos constitutivos utilizados por unidad de suelo

Unidad	Modelo Constitutivo
Basamento Rocoso	Elástico-Lineal
Relave	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb
Estéril de Mina	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb
Cobertura	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb
Grava de Atacama	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb
Suelo Aluvial	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb

Los módulos elásticos isotrópicos de los modelos constitutivos se definen como:

$$K = \frac{E}{8 \cdot (1 + 2 \cdot \nu)} \quad (12)$$

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (13)$$

Donde:

K: Modulo volumétrico de compresibilidad (t/m²).

G: Módulo de corte (t/m²).

E: Módulo de deformación (t/m²).

ν : Coeficiente de Poisson (-).

VI.2. Parámetros geotécnicos adoptados en Flac2D

Los parámetros geotécnicos correspondientes a todos los materiales considerados en el modelo del depósito de relaves se detallan en el acápite IV. En particular, se hace referencia a los valores presentados en la Tabla III-1 y la Tabla III-2, donde se especifican las propiedades mecánicas y físicas más relevantes para el análisis. Estos parámetros constituyen la base fundamental para la caracterización del comportamiento del depósito ante diferentes condiciones de carga, lo cual resulta esencial para garantizar la estabilidad y seguridad del diseño planteado. Además, su correcta

selección y justificación técnica son clave para la validez de los resultados obtenidos en las simulaciones numéricas.

VI.3. Malla de diferencias finitas

La malla de diferencias finitas debe tener un espaciamiento vertical que permita una adecuada propagación de ondas sísmicas de diferente frecuencia. La distancia máxima vertical entre los nodos de la malla L_m fue definida de acuerdo con las recomendaciones de Kuhlemeyer & Lysmer (1969).

$$L_m \leq \frac{V_s}{8 \cdot f_{\max}} \quad (14)$$

Donde:

V_s : Velocidad de propagación de onda de corte (m/s).

$f_{\max}$: Frecuencia máxima de interés de las ondas sísmicas propagadas por el material (Hz).

Se establece que el rango de frecuencias de interés en este estudio es entre 0,5 y 10,0 Hz. El rango de frecuencias considerado entre 0,5 Hz y 10 Hz se justifica en base a criterios técnicos asociados al contenido frecuencia típico de los movimientos sísmicos y a las características dinámicas de los depósitos de relaves y suelos blandos. Estudios previos y registros sísmicos reales en zonas similares han demostrado que la mayor parte de la energía sísmica significativa se encuentra dentro de este intervalo, particularmente en eventos de mediana a alta magnitud.

Además, desde el punto de vista geotécnico, este rango abarca las frecuencias naturales más comunes de estructuras como depósitos de relaves, los cuales, dependiendo de su geometría y rigidez, suelen presentar frecuencias propias entre 1 Hz y 5 Hz. Incluir frecuencias desde 0,5 Hz permite captar el efecto de componentes de largo período, mientras que el límite superior de 10 Hz asegura incluir también la respuesta de capas superficiales más rígidas o de menor espesor.

En la Tabla VI-2 Se indica la distancia máxima entre nodos de la malla de diferencias finitas adoptada en los modelos para cada uno de los materiales que componen el muro y el suelo de fundación, sus velocidades de onda de corte y las frecuencias máximas de las ondas que se pueden propagar a través de ellos, estimadas con la Ec. 14. De esta tabla se desprende que la distancia

adoptada entre los nodos es apropiada para el rango de frecuencias de interés, propagando de manera correcta el registro sísmico.

Tabla VI-2: Distancia máxima entre nodos y frecuencia máxima de propagación en los materiales de los modelos numéricos

Material	Distancia máxima entre nodos (m)	Velocidad de onda de corte (m/s)⁽¹⁾	Frecuencia máxima, f (Hz)
Estéril Mina	2	270	16,9
Cobertura (2C*)	2	280	17,5
Relave	2	145	9,1
Aluvial	2	440	27,5
Grava de Atacama	5	450	11,3
Roca	10	850	10,6

Nota: (1): Velocidad de onda de corte estimada al confinamiento medio de cada material

VI.4. Nivel Freático

De acuerdo con el análisis de los datos históricos de monitoreo de los piezómetros que presenta este estudio, y según la topografía se puede inferir que:

- La laguna se encuentra a más de 1.000 m de distancia del muro de depósito de relave, por lo tanto, para efectos de modelación se optó por incorporar un nivel freático alejado del muro y que desciende hacia los drenes existentes.

VI.5. Amortiguamiento de Rayleigh

La disipación de energía de los materiales con un modelo constitutivo de tipo elástico y elasto-plástico sometido a carga cíclica se debe reproducir mediante un amortiguamiento mecánico del tipo Rayleigh, el cual se aplica por medio de una matriz de amortiguamiento (C) con componentes proporcionales a la matriz de masa (M) y rigidez (K), según se muestra en la Ec. 15.

$$C = \alpha \cdot M + \beta \cdot K \quad (15)$$

Donde:

C, M, K: Matrices respectivas de amortiguamiento, masa y rigidez del problema.

α y β : Constantes de amortiguamiento proporcional la matriz de masa y rigidez.

La razón de amortiguamiento crítico, ξ_i , es la fracción amortiguamiento crítico para una frecuencia angular ω_i y queda definido a través de la siguiente ecuación:

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_i} + \beta \cdot \omega_i \right) \quad (16)$$

En la Figura III-3 se presenta la variación de la razón de amortiguamiento crítico como función de la frecuencia angular ω_i . La curva de “Suelo de Fundación” considera Suelo Aluvial, Grava de Atacama. La curva de “Material Muro” considera los materiales de Estéril Mina, Relaves y Cobertura.

Las razones de amortiguamiento utilizadas en la modelación se indican en la Tabla VI-3. Las curvas de amortiguamiento para el estéril, relaves y cobertura se ajustaron en el rango de frecuencias de interés asociado al sismo de estudio y la frecuencia predominante de vibración de la presa. El amortiguamiento crítico mínimo y la frecuencia definen los valores de α y β detallados en la Tabla VI-3.

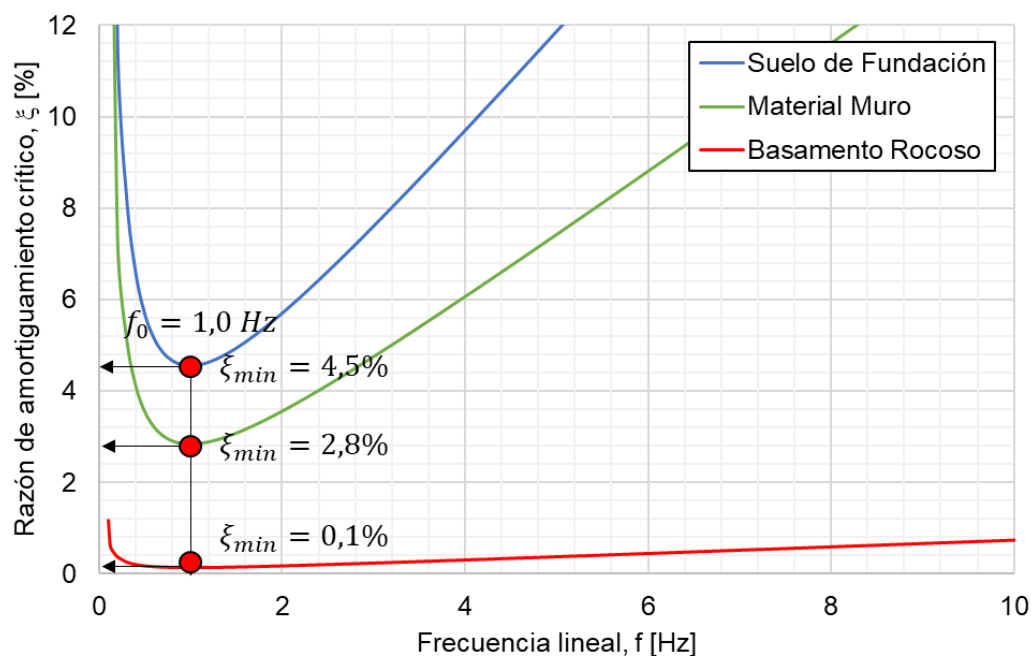


Figura VI-2: Amortiguamiento de Rayleigh utilizados

Tabla VI-3: Razones de amortiguamiento para los distintos materiales

Material	α (-)	β (-)	Razón de amortiguamiento crítico mímico, ξ_{min} (%)	Frecuencia de ξ_{min} , f (Hz)
Estéril Mina	0,1780	0,0046	2,8	1,0
Relaves	0,1780	0,0046	2,8	1,0
Cobertura (2C*)	0,1780	0,0046	2,8	1,0
Suelo Aluvial	0,2840	0,0073	4,5	1,0
Grava de Atacama	0,2840	0,0073	4,5	1,0
Basamento Rocoso	0,0092	0,0002	0,1	1,0

Nota: Para el basamento rocoso se consideró un modelo elástico.

VI.6. Condiciones de borde

Para el caso estático se han considerado condiciones de borde estándar. La base del modelo se fija y se restringen los desplazamientos horizontales en los extremos laterales del modelo. Esto último, sumado a las dimensiones de la malla, evita la influencia de los bordes en la respuesta de las zonas de interés a analizar.

Para el análisis dinámico, se han considerado elementos absorbentes en los bordes laterales (free field condition), de modo de evitar ondas reflejadas que puedan modificar la respuesta en superficie y un borde flexible en la base del modelo (compliant base). Para implementar el borde flexible en la base del modelo, se utilizaron bordes tipo quiet, que son capaces de absorber las ondas descendentes y simultáneamente, incorporar el registro sísmico como tensión.

Dado que los registros de aceleración horizontal recomendados por el estudio de amenaza sísmica fueron entregados en la superficie, para poder incorporarlos en la base del modelo, se debió acondicionar el registro a través del procedimiento que se describe en la VI.7. Posteriormente, el registro de aceleraciones acondicionado en la base $a(t)$ se integra para establecer un registro de velocidades $v(t)$ que permite calcular un registro de tensiones que se debe imponer en la base del modelo, calculado a partir de la siguiente ecuación.

$$\tau = 2 \cdot (\rho \cdot V_s) \cdot v(t) \quad (17)$$

Donde:

τ : Tensión de corte aplicada en la base del modelo numérico (P_a).

ρ : Densidad de masa de la roca basal del modelo (kg/m^3).

V_s : Velocidad de ondas de corte de la roca basal del modelo (m/s).

$v(t)$: Registro de velocidades en el tiempo (m/s).

VI.7. Acondicionamiento del sismo de diseño

Debido a que los registros sintéticos representativos de la amenaza sísmica que se consideran en el análisis de deformaciones se definen en la roca en superficie libre, es necesario realizar un acondicionamiento para determinar el registro de aceleraciones en profundidad, que será aplicado en la base del modelo (ver Figura VI-3).

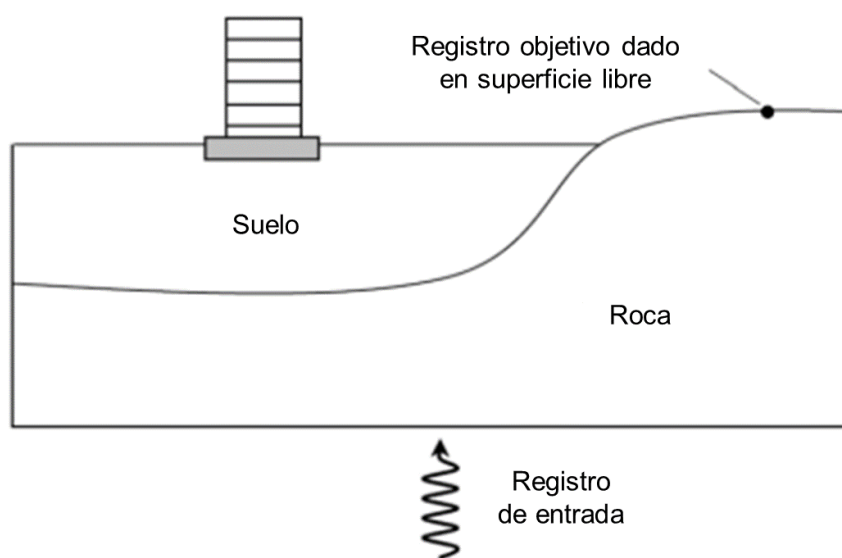


Figura VI-3: Esquema de acondicionamiento de señal

De acuerdo con el estudio de amenaza sísmica (ver Sección 7.0), el sismo de diseño es estimado en superficie libre para suelo tipo II ($400 \text{ m/s} \leq V_s < 900 \text{ m/s}$) o tipo B del Decreto Supremo N°61 (Ref. 20). Los modelos numéricos de este estudio asumen que el registro sintético que define la amenaza sísmica se recupera en un afloramiento de roca, la cual tiene una velocidad de onda de corte de 850 m/s . Al dividir el registro objetivo en superficie por dos e imponerlo en la base de los modelos es posible recuperar el sismo en la superficie de un afloramiento de roca (el acelerograma se obtuvo en punto de control ubicado en un afloramiento rocoso en el extremo del modelo) en la Figura VI-4 se muestra el sismo de diseño (a) y el sismo en la superficie de un afloramiento de roca en Flac2D (b).

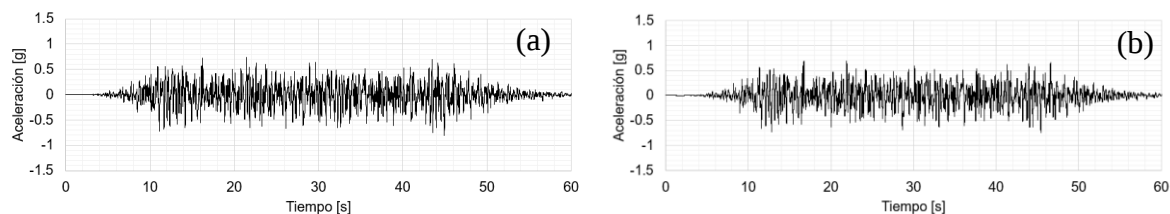


Figura VI-4: (a) Sismo de diseño; (b) Sismo en superficie de afloramiento rocoso (Flac2D)

Como es posible ver en la Figura VI-5 y Figura VI-6, los acelerogramas y espectros de respuesta en la superficie del modelo se asemejan al espectro de diseño, entregando aceleraciones máximas y espectrales coincidentes para el rango de periodos de interés. En la Tabla VI-4 se muestra un resumen de las características del sismo recuperado en superficie de afloramiento rocoso y el sismo de diseño.

Lo anterior demuestra que el depósito de relave será solicitado de acuerdo con lo indicado estudio de amenaza sísmica.

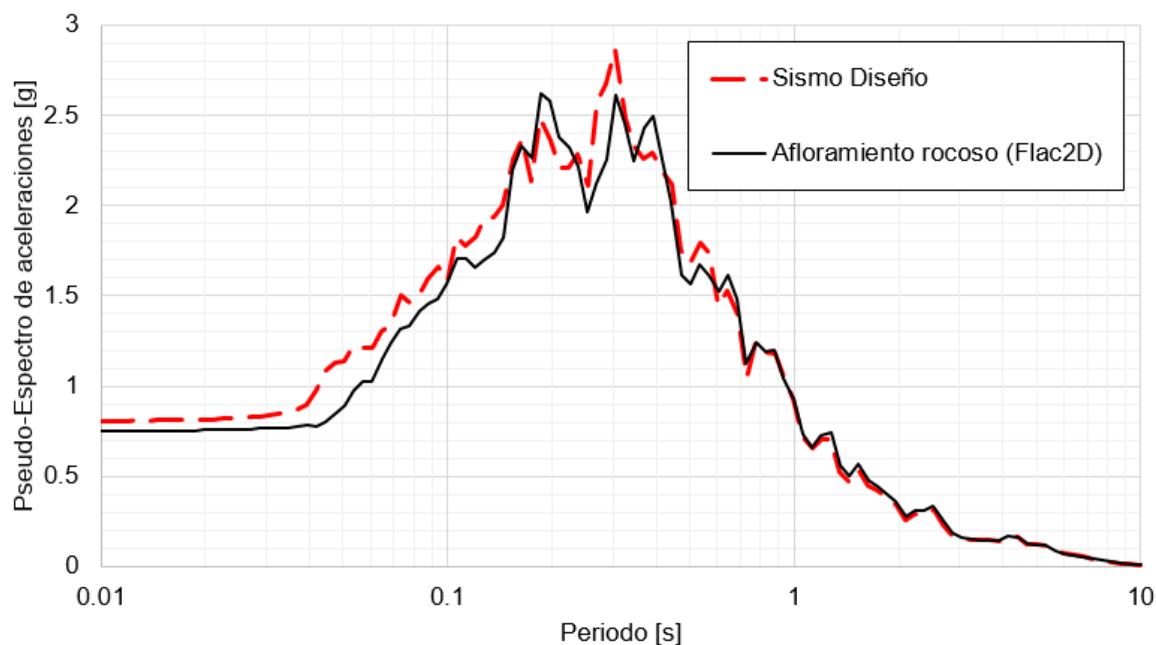


Figura VI-5: Comparación espectros de respuesta modelo en Flac2D y sismo de diseño

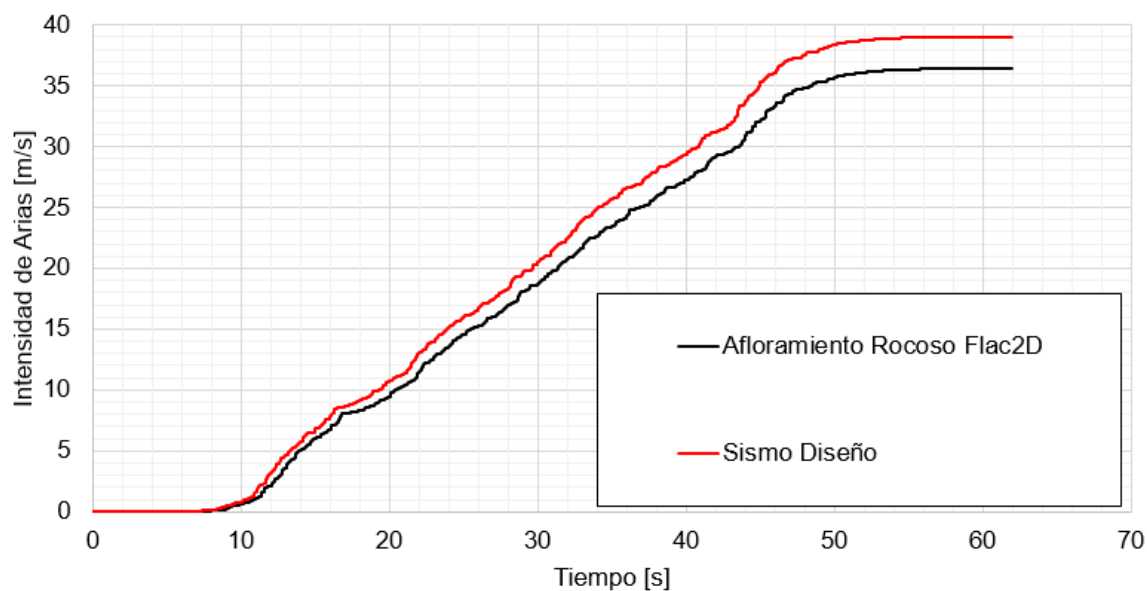


Figura VI-6: Comparación de Intensidad de Arias en Flac2D

Tabla VI-4: Verificación sismo recuperado en afloramiento rocoso en el modelo numérico (Flac2D)

Parámetros	Sismo de Diseño	Afloramiento Rocoso (Flac2D)
Aceleración máxima, PGA (g)	0,80	0,75
Intensidad de Arias (m/s)	39,03	36,44
Cruces por cero (1/s)	10,29	8,64
Potencial Destructivo (m·s)	0,37	0,49

VI.8. Resultados análisis dinámico en Flac2D

Los desplazamientos y aceleraciones obtenidos de la modelación se han considerado en los puntos de control (PC) señalados en la Figura VI-7. Los PC fueron ubicados en sectores de interés, como es el contacto suelo de fundación – Muro, talud aguas abajo, y coronamiento.

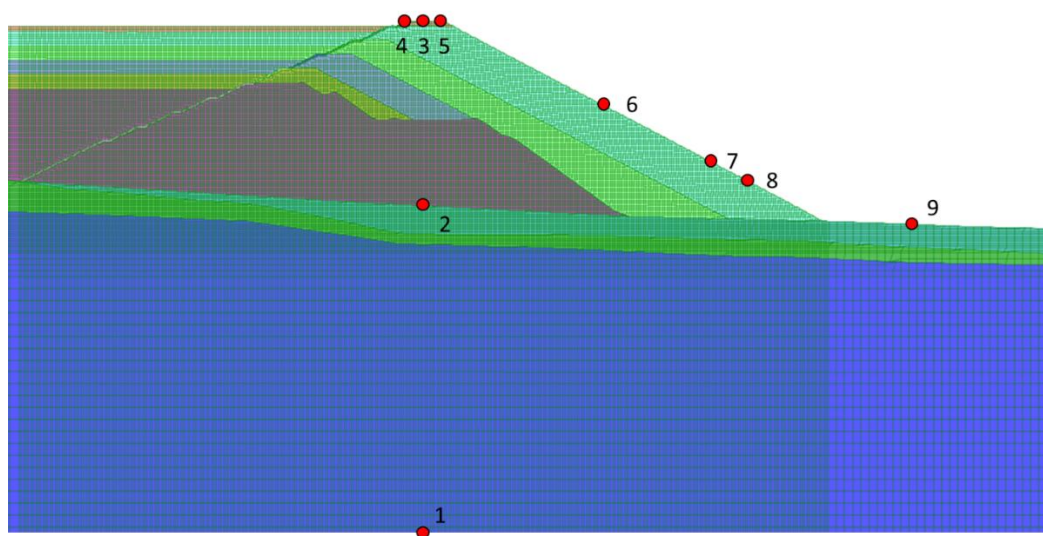


Figura VI-7: Puntos de control (PC) Flac2D

VI.8.1. Estimación de desplazamientos

En la Figura VI-8 se muestra el campo de desplazamientos horizontales del muro del depósito de relave. Se puede observar que la mayor parte de los desplazamientos se concentra en el talud aguas abajo del Muro, con valores máximos de 3,0 m, aproximadamente.

En la Figura VI-9 se muestra el campo de desplazamientos verticales del muro del depósito de relave. Se puede observar que, los desplazamientos son predominantemente descendentes (asentamientos) con magnitudes de hasta 1,2 m en la cara aguas abajo del Muro.

Finalmente, en la Figura VI-10, se muestran los desplazamientos horizontales y verticales en función del tiempo en los diferentes PC. En el coronamiento, los desplazamientos horizontales promedio son de 1,50 m, mientras que en el talud aguas abajo el PC 6 alcanza un máximo de 2,5 m. Por otro lado, con respecto al desplazamiento vertical, el coronamiento resulta en un asentamiento promedio de 0,7 m, mientras que en el talud aguas abajo el máximo asentamiento se presenta en el PC 6, con 1,0 m, aproximadamente.

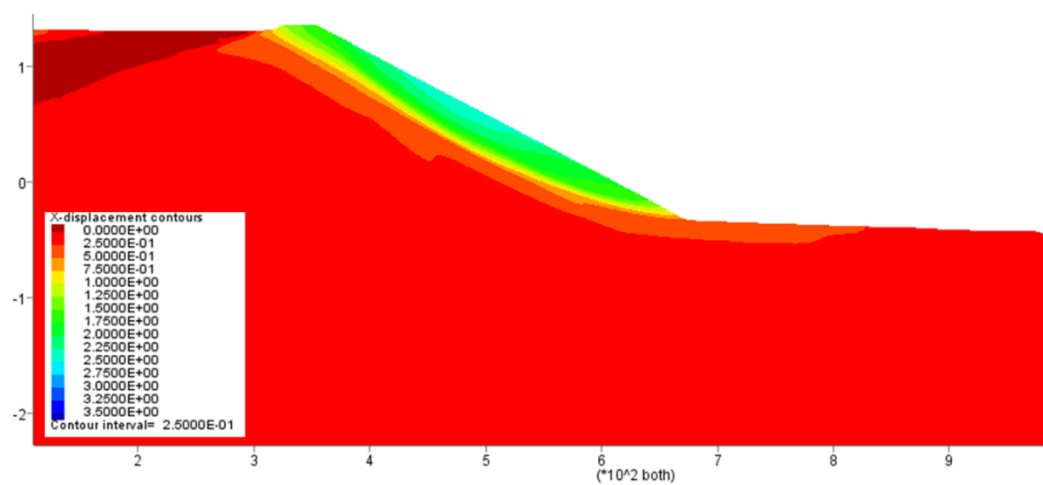


Figura VI-8: Desplazamientos horizontales (m) en Flac2D

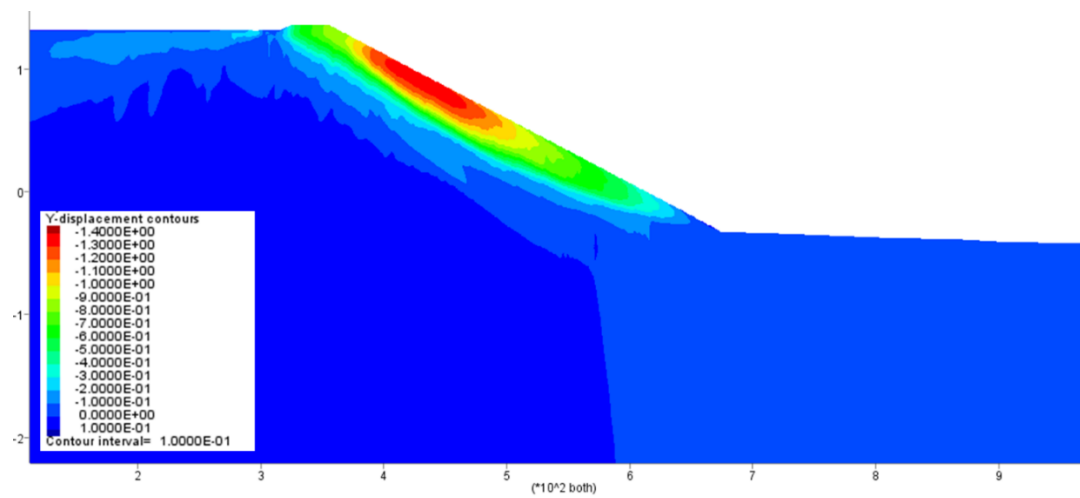


Figura VI-9: Desplazamientos verticales (m)

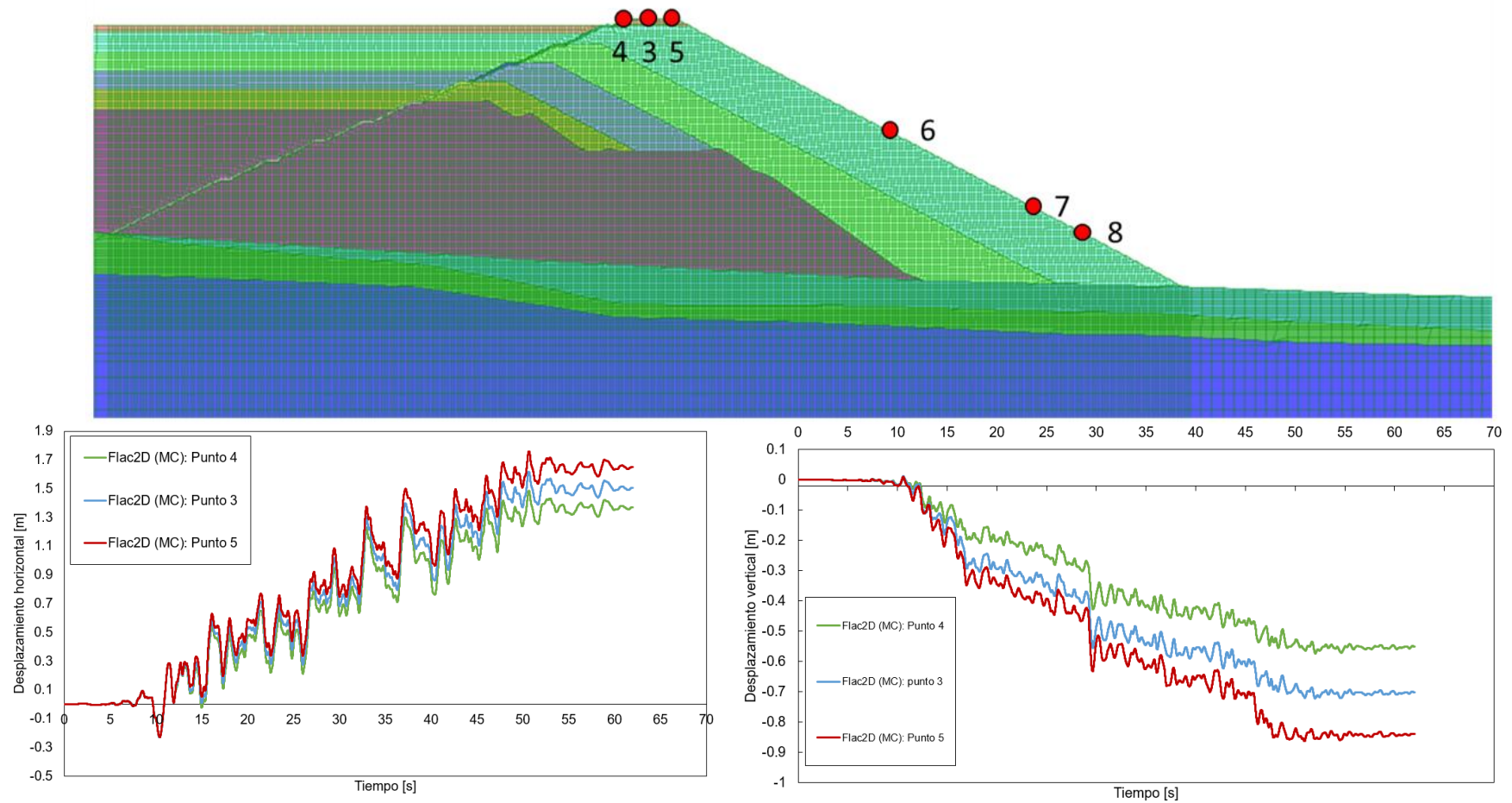


Figura VI-10: Desplazamiento horizontales y verticales coronamiento muro en Flac2D

VI.8.2. Aceleraciones horizontales

En la Figura VI-11 se muestra el detalle de las aceleraciones en el tiempo evaluadas en los PC en la base del modelo, base del muro, coronamiento y superficie libre en afloramiento rocoso

La aceleración horizontal máxima (PGA) registrada en el suelo de fundación bajo el Muro (PC 2) es de 0,56 g, mientras que, en el coronamiento, la aceleración máxima alcanza un valor de 1,16 g, es decir, se experimenta una amplificación de dos veces respecto al PGA.

En el PC 10, ubicado en afloramiento rocoso, la aceleración máxima es de 0,75 g. El resumen de los PGA y la razón de los PGA de cada PC con respecto al valor en el afloramiento rocoso (PC 10) se muestra en la Tabla VI-5.

Tabla VI-5: Resumen de aceleraciones máximas en PC-Flac2D

Punto de control	Ubicación	PGA (g)	Razón PGA/PGA Afloramiento Rocoso(-)
2	Base Muro	0,56	0,75
3	Coronamiento	1,11	1,48
10	Afloramiento Rocoso	0,75	1,00

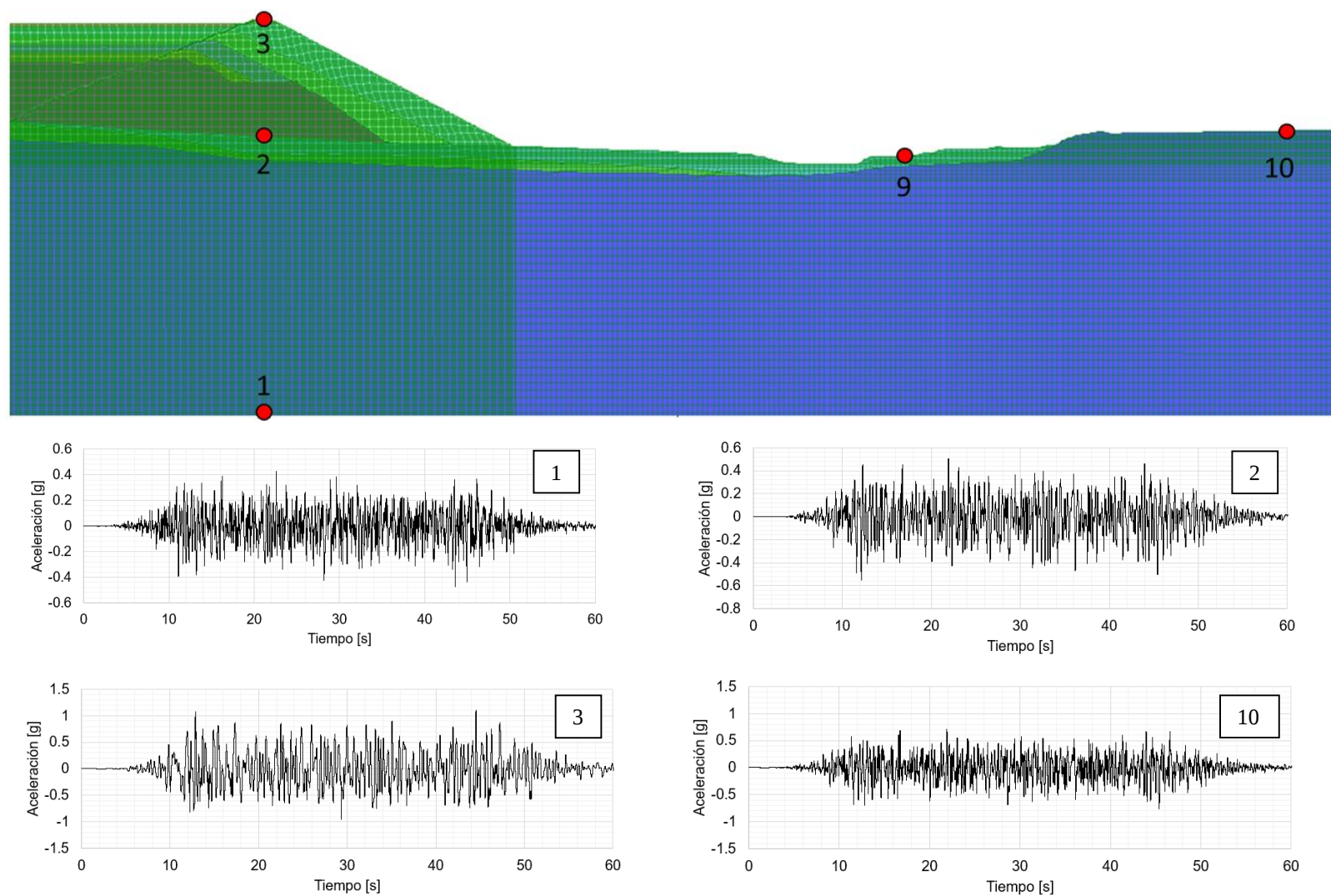


Figura VI-11: Aceleraciones horizontales en los puntos de control de interés

VI.8.3. Función de amplificación

Para evaluar la frecuencia predominante del depósito de relave, se calculó la función de amplificación del muro como la razón entre los espectros de respuesta de los registros de aceleración en el coronamiento (PC 3 en la Figura VI-11) y la base del Muro (PC 2 en la Figura VI-11). La función de amplificación se presenta en la Figura VI-12. De la misma forma, se calcularon las funciones de amplificación del coronamiento con respecto al afloramiento rocoso (PC 10 en la Figura VI-11).

De acuerdo con los resultados, se evidencia una frecuencia predominante en torno a 0,5 Hz (equivalente a un periodo de 2,0 s).

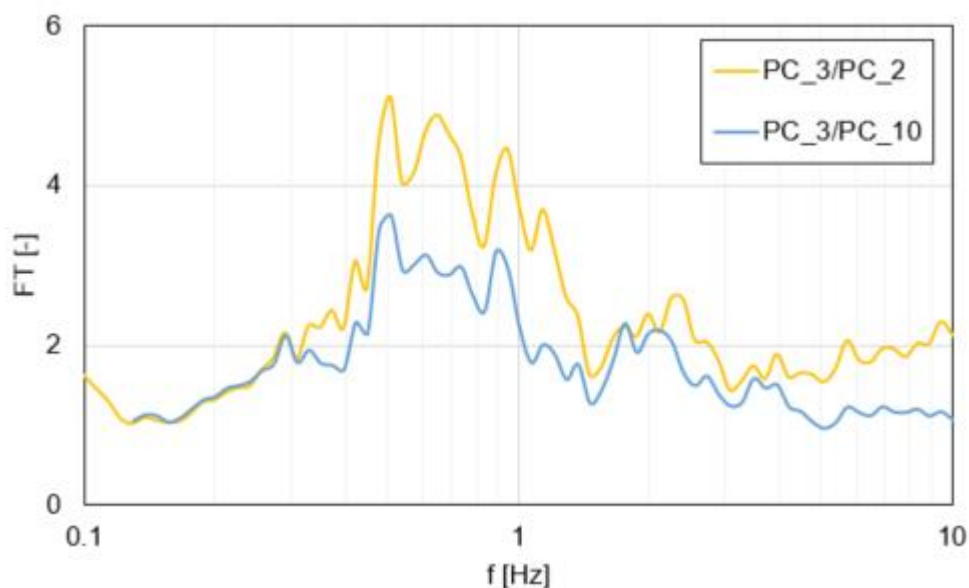


Figura VI-12: Función de amplificación muro depósito de relave en Flac2D

VII. MODELACIÓN EN PLAXIS2D

Para analizar las deformaciones del depósito de relaves bajo condiciones estáticas y sísmicas, se desarrollaron modelos numéricos en Plaxis 2D versión 2024.1.0.1060, un software basado en el método de los elementos finitos (FEM). Este enfoque permite modelar con precisión las respuestas dinámicas del depósito de relaves. En la modelización se emplearon tres modelos constitutivos: el modelo Mohr-Coulomb (MC) con Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSS), el modelo UBC3D-PLM para simular la licuefacción de los relaves, y para capturar el comportamiento no lineal del suelo. El proceso de análisis se divide en dos etapas fundamentales: análisis estático y dinámico, permitiendo evaluar tanto las deformaciones bajo condiciones de carga estática como la respuesta del depósito ante un evento sísmico.

- **Análisis estático:** El análisis estático se realiza para modelar la secuencia de construcción del depósito de relaves en distintas fases. En Plaxis2D, este proceso se lleva a cabo mediante un análisis incremental que simula las fases de crecimiento del depósito.

En este análisis estático, se simula la construcción del depósito de relaves en varias fases de crecimiento, similar a las 6 fases mencionadas en el análisis con Flac2D. Cada fase representa una etapa del llenado y compactación del material del depósito.

El análisis estático permite establecer las tensiones iniciales en los materiales que componen el depósito de relaves, considerando la geomecánica del terreno y las condiciones de carga aplicadas hasta ese punto. Este paso es crucial para establecer las condiciones previas antes de aplicar cargas dinámicas.

Durante esta fase, se analizan las deformaciones estáticas de la estructura del depósito, como asentamientos, desplazamientos y tensiones internas causadas por el propio peso del material del depósito y las condiciones del terreno.

- **Análisis de dinámico de deformaciones:** Una vez que se ha completado el análisis estático y se han definido las tensiones iniciales, se procede al análisis dinámico para evaluar la respuesta del depósito de relaves bajo la aplicación de cargas sísmicas.

Antes de aplicar el sismo, es necesario establecer las condiciones iniciales del análisis dinámico, como las tensiones internas de los materiales y la trayectoria de carga previa (proporcionada por el análisis estático).

En Plaxis2D, la solicitación sísmica se puede representar a través de un acelerograma o una carga dinámica que simula las vibraciones inducidas por un evento sísmico. Este acelerograma describe el movimiento del suelo a lo largo del tiempo, y se aplica para evaluar la respuesta dinámica del depósito.

Se analiza cómo la estructura del depósito responde a la carga sísmica, observando las deformaciones, desplazamientos y tensiones en las distintas fases de la estructura durante el evento sísmico. Es posible estudiar tanto los desplazamientos horizontales y verticales como las tensiones en los muros y el cuerpo del depósito.

Para lograr la configuración final proyectada del depósito de relave, se modela la secuencia constructiva según las fases de crecimiento (ver Anexo A), realizando un análisis estático para cada una de ellas. En la Figura VII-1 se muestra la última fase de crecimiento.

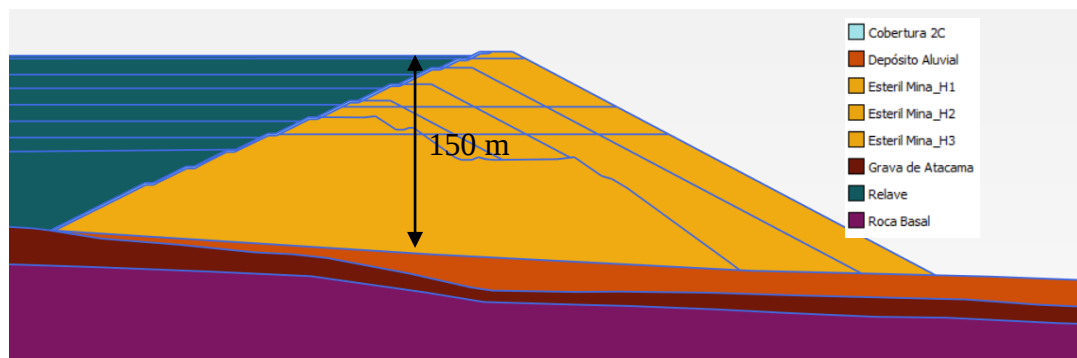


Figura VII-1: Depósito de relave modelado en Plaxis2D-Última Fase de crecimiento

VII.1. Modelos constitutivos de los materiales

Para el análisis estático y dinámico se consideran los modelos constitutivos mostrados en la Tabla VII-1.

Tabla VII-1: Modelos constitutivos utilizados en plaxis2D

Unidad	Modelo N°1	Modelo N°2
Basamento Rocoso	Elástico-Lineal	Elástico-Lineal
Relave	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb	No-Lineal: UBC3D-PLM
Estéril de Mina	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb	No-Lineal: Hardening Soil with Small Strain Stiffness
Cobertura	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb
Grava de Atacama	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb
Suelo Aluvial	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb	Elasto-Plástico: Mohr-Coulomb

VII.1. Parámetros geotécnicos adoptados en Plaxis2D

El software Plaxis 2D incorpora la herramienta denominada SoilTest, la cual permite simular diversos tipos de ensayos geotécnicos de laboratorio, como Triaxiales y Edométricos, facilitando así la calibración más precisa de los parámetros del modelo constitutivo seleccionado. Esta funcionalidad resulta especialmente útil para ajustar el comportamiento del material en función de condiciones reales obtenidas experimentalmente.

Para el caso del material Estéril Mina, se dispone de resultados provenientes de ensayos Triaxiales consolidados isotrópicamente y drenados (CID), los cuales fueron utilizados como base para la calibración dentro del entorno SoilTest. Dicha calibración fue aplicada al modelo constitutivo Hardening Soil with Small Strain Stiffness, que permite representar de manera más realista el comportamiento del suelo en rangos de deformaciones pequeñas.

De la Figura VII-2 a la Figura VII-9 se muestran los gráficos del ensayo Triaxial CID y la calibración en SoilTest.

Por otro lado, para el material relave, cuyo comportamiento es más complejo debido a su naturaleza altamente no lineal y también poder modelar licuación, se utilizó el modelo constitutivo UBC3D-PLM. En este caso, los parámetros geotécnicos empleados fueron obtenidos a partir de los valores presentados en el acápite IV, complementados con información proveniente de literatura

especializada y referencias bibliográficas pertinentes (Hernández, A., 2022), dada la limitada disponibilidad de ensayos directos.

Finalmente, en la Tabla VII-2 y Tabla VII-3 se presenta un resumen detallado de los parámetros geotécnicos adoptados para la Modelación N°2 en Plaxis2D, los cuales fueron seleccionados considerando criterios de validez técnica y coherencia con el comportamiento esperado de los materiales en condiciones de campo.

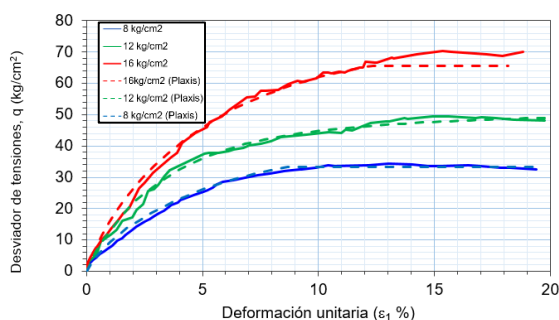


Figura VII-2: Desviador de tensiones vs Deformación unitaria

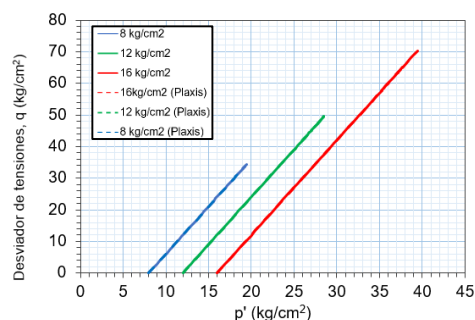


Figura VII-3: Desviador de tensiones vs presión efectiva media

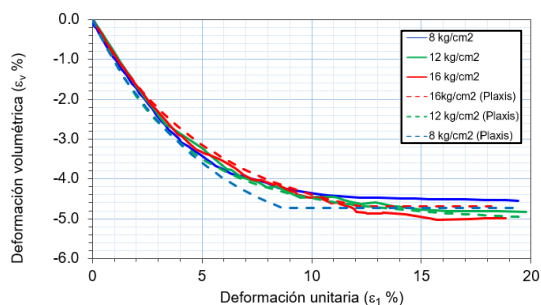


Figura VII-4: Deformación volumétrica vs deformación unitaria

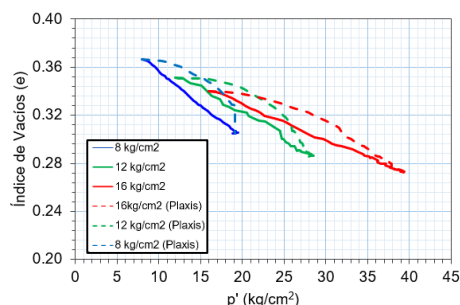


Figura VII-5: Índice de vacíos vs presión efectiva media

Tabla VII-2: Resumen parámetros modelo M-C

Parámetro	Unidad	Espesor Muro (m)		
		40,3	60,4	80,5
		Valor		
γ_{unsat}	kN/m ³	17,7	17,7	17,7
γ_{sat}	kN/m ³	17,7	17,7	17,7
E_{50}	kN/m ²	45.957	50.393	60.067
E_{oed}	kN/m ²	28.987	29.156	44.445
E_{ur}	kN/m ²	137.792	140.739	270.394
m	-	0,24	0,31	0,26
c	kN/m ²	20	20	20
ϕ_{cv}	°	42	42	42
ψ	°	0	0	0
K_o	-	0,34	0,34	0,34
p_{ref}	kN/m ²	100	100	100
R_f	-	0,76	0,95	0,78
v_{ur}	-	0,3	0,3	0,3
G_0^{ref}	kN/m ²	110.724	131.305	149.251
$\gamma_{0,7}$	-	0,00015	0,00013	0,00012

Tabla VII-3: Resumen parámetros material de relave con modelo UBC3D-PLM

Parámetro	Unidad	Valor
γ_{unsat}	kN/m ³	17,7
γ_{sat}	kN/m ³	17,7
K_B^e	-	90
K_G^e	-	60
K_G^p	-	60
m_e	-	0,5
n_e	-	0,5
n_p	-	0,2

Parámetro	Unidad	Valor
p_{ref}	kN/m^2	100
ϕ_{cv}	°	24
ϕ_p	°	25
c	kN/m^2	0
σ_t	kN/m^2	0
R_f	-	0,9
$(N_1)_{60}$	-	5
f_{dens}	-	0,35
f_{post}	-	0,10

Nota: Para los materiales del suelo de fundación y material filtro se consideraron los que se muestran en la Tabla III-1 y Tabla III-2

VII.2. Malla de elementos finitos

Para determinar la frecuencia máxima según el tamaño de los elementos, se utilizó las recomendaciones de Kuhlemeyer & Lysmer (1969), al igual que el modelo de Flac2D.

$$f_{max} \leq \frac{V_s}{8 \cdot L_m} \quad (18)$$

Para el mallado se utilizó la opción 15-node, representado en la Figura VII-6, donde se observa la distribución de los 15 nodos dentro de un elemento triangular. Dado que en las aristas del elemento hay 5 nodos, L_m se considera aproximadamente como una cuarta parte del tamaño de la arista del elemento de malla.

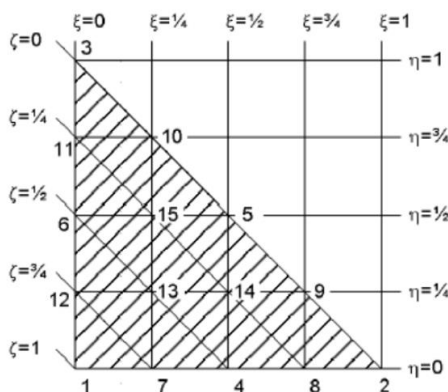


Figura VII-6: Elemento 15-node (Plaxis,2024)

Para calcular la frecuencia se utiliza una velocidad V igual a la velocidad de onda de corte V_s mínima del material. Según el reporte que entrega Plaxis2D, se tiene un tamaño máximo de elemento igual a 48,24 m, tamaño mínimo igual a 0,27 m y en promedio se tiene un tamaño igual a 10,50 m. en la Tabla VII-4 se muestra un resumen de las frecuencias máximas para cada material.

Tabla VII-4: Distancia promedio entre nodos y frecuencia máxima de propagación en los materiales de los modelos numéricos

Material	Distancia promedio entre nodos (m)	Velocidad de onda de corte (m/s)⁽¹⁾	Frecuencia máxima, f (Hz)
Estéril Mina	10,50	270	12,86
Cobertura (2C*)	10,50	280	13,33
Relave	10,50	145	6,90
Aluvial	10,50	440	20,95
Grava de Atacama	10,50	450	21,43
Roca	10,50	850	40,48

VII.3. Nivel freático

Para efectos de la modelación, se ha considerado que el nivel freático se encuentra a una distancia de 80 m desde el muro del depósito de relave. Este nivel freático ha sido modelado únicamente en la zona del relave, mientras que los demás materiales que componen el depósito de relaves se han supuesto en condiciones secas, sin la presencia de agua. En la Figura VII-7 se muestra el nivel freático correspondientes a la última fase constructiva, mientras que en el Anexo B se muestra el nivel freático para cada fase constructiva.

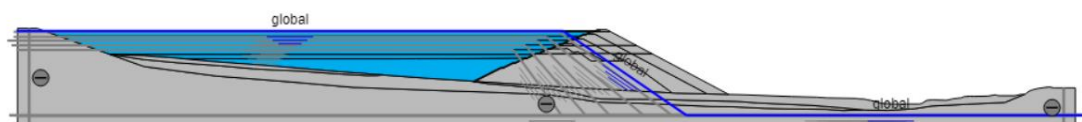


Figura VII-7: Nivel freático modelado en la última fase constructiva.

VII.4. Amortiguamiento de Rayleigh

Al igual que en el modelo realizado con Flac2D, en este estudio también se ha incorporado el amortiguamiento mecánico de tipo Rayleigh para reproducir adecuadamente el comportamiento dinámico del sistema. Este tipo de amortiguamiento, que combina componentes de amortiguamiento viscosa en bajas y altas frecuencias, es fundamental para simular las respuestas del depósito bajo cargas sísmicas. Las razones de amortiguamiento utilizadas en la modelación con Plaxis2D se detallan en la Figura VI-2 y la Tabla VI-3, proporcionando una visión clara de los valores aplicados en el modelo.

Asimismo, la frecuencia de interés (1,0 Hz) ha sido cuidadosamente considerada en el análisis, y esta frecuencia es captada por cada elemento de la malla, ya que las frecuencias máximas de los elementos están claramente representadas en la Tabla VII-4. Esta información es crucial para evaluar la respuesta dinámica de la estructura ante las solicitaciones sísmicas y garantizar la precisión del modelo numérico.

VII.5. Condiciones de borde

Las condiciones de borde de deformación aseguran los límites del modelo geométrico en las líneas que el software define como XMin, XMax, YMin e YMax, que representan respectivamente el valor mínimo definido en el eje horizontal, el valor máximo en el eje horizontal, el valor mínimo en el eje vertical y el valor máximo en el eje vertical.

Las opciones para las condiciones de borde de deformación, las cuales están definidas en el manual de referencia de Plaxis (Plaxis, 2024), son las siguientes:

- Free: El borde tiene la opción de moverse libremente.
- Normally fixed: El borde solo puede moverse en la dirección perpendicular.
- Horizontally fixed: El borde solo puede moverse en la dirección vertical.
- Vertically fixed: El borde solo puede moverse en la dirección horizontal.
- Fully fixed: El borde no puede moverse.

Para el modelo numérico se utiliza la condición “Normally fixed” para los límites XMin y XMax, “Fully fixed” para YMin y “Free” para YMax. Esto implica que los extremos laterales del modelo están fijos en la dirección horizontal, que la base de la fundación está completamente fija y que la superficie puede moverse libremente.

Para realizar cálculos dinámicos, es necesario emplear condiciones de borde adicionales a las de deformación para reducir el aumento de tensiones generadas por las reflexiones de ondas dentro del modelo. Al igual que con las condiciones de deformación, las condiciones se ubican en los bordes XMin, XMax, YMin e YMax. Las opciones para las condiciones de borde de dinámicas son las siguientes:

- None: Solo se aplican las condiciones de deformación a este límite.
- Viscous: Esta opción es pertinente para situaciones en las que la fuente dinámica reside dentro de la malla, cuyo propósito es absorber la energía de las ondas salientes.
- Free-field: Esta opción es preferible para análisis de terremotos, donde la carga dinámica se aplica a lo largo del límite inferior del modelo, simulando la propagación de ondas con una mínima reflexión en los bordes laterales. Esta opción requiere la creación de una interfaz en los límites donde se active, de lo contrario, la condición será ignorada.
- Compliant base: Simula la propagación de las ondas en el suelo profundo con una reflexión mínima en el límite inferior. Con esta condición, los registros sísmicos de entrada se transfieren al resto del modelo mediante la aplicación de fuerzas normales y de corte equivalentes. De igual forma que para la condición Free-field, se debe crear una interfaz para que la condición no sea ignorada.
- Para las fases dinámicas se utiliza la condición “Free-field” para los límites XMin y XMax, “Compliant base” para YMin y “None” para YMax.

VII.6. Acondicionamiento del sismo de diseño

Debido a que los registros sintéticos representativos de la amenaza sísmica se definen en la roca en superficie libre, es esencial realizar un proceso de acondicionamiento para obtener el registro de aceleraciones en profundidad. Este registro será aplicado en la base del modelo, tal como se ilustra en la Figura VI-3. De manera similar, en el modelo de Flac2D, se lleva a cabo el acondicionamiento necesario del sismo en la roca en superficie libre, lo que asegura que las condiciones de contorno sean representativas de las aceleraciones sísmicas. Este proceso es crucial para la precisión del análisis de las deformaciones y la simulación de la respuesta sísmica del modelo.

En la Figura VII-8 se muestra el sismo de diseño (a) y el sismo en la superficie de un afloramiento de roca en Plaxis2D (b).

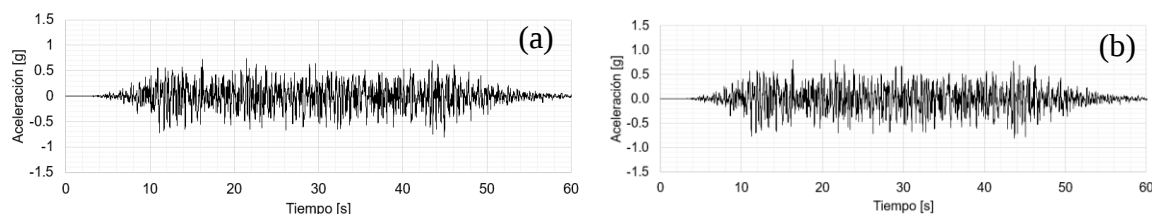


Figura VII-8: (a) Sismo de diseño; (b) Sismo en superficie de afloramiento rocoso (Plaxis2D)

Como se observa en la Figura VII-9 y Figura VII-10, los acelerogramas y espectros de respuesta en la roca en superficie libre del modelo en Plax2D coinciden con el espectro de diseño, presentando aceleraciones máximas y espectrales similares en el rango de periodos de interés. La Tabla VII-5 resume las características del sismo recuperado en superficie y el sismo de diseño, lo que valida que el depósito de relave se ajusta a las condiciones especificadas en el estudio de amenaza sísmica.

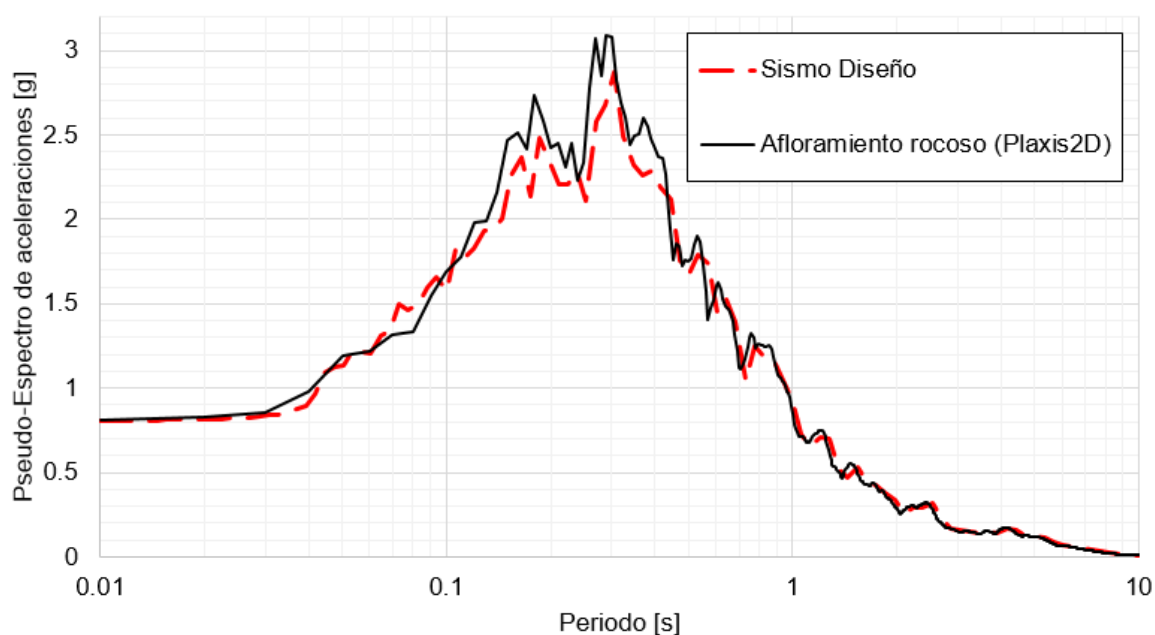


Figura VII-9: Comparación espectros de respuesta modelo en Plaxis2D y sismo de diseño

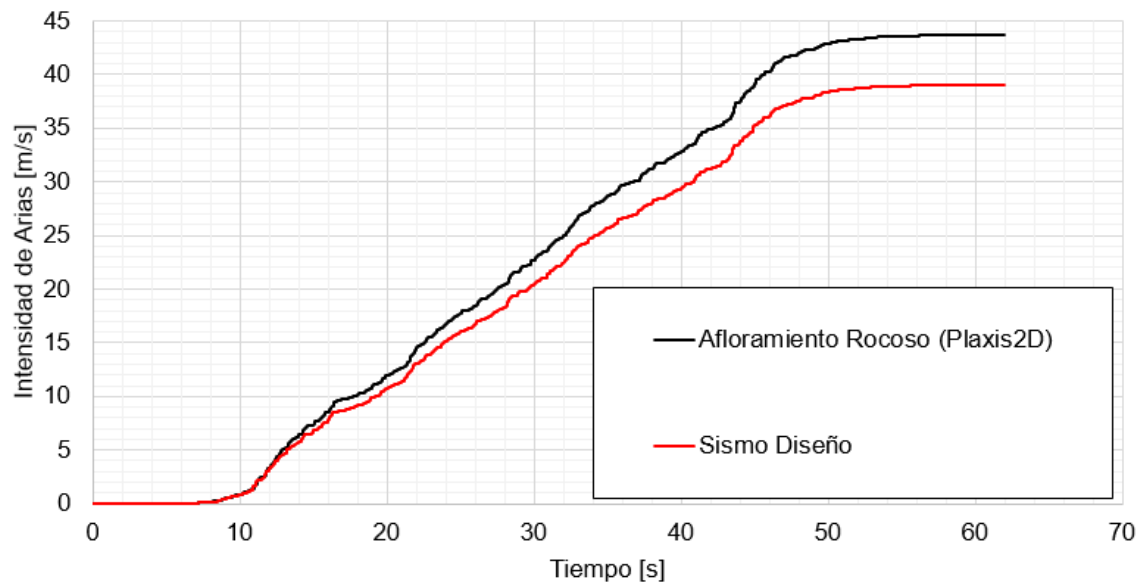


Figura VII-10: Comparación de Intensidad de Arias en Plaxis2D

Tabla VII-5: Verificación sismo recuperado en afloramiento rocoso en el modelo numérico (Plaxis2D)

Parámetros	Sismo de Diseño	Afloramiento Rocoso (Plaxis2D)
Aceleración máxima, PGA (g)	0,80	0,81
Intensidad de Arias (m/s)	39,03	43,7
Cruces por cero (1/s)	10,29	9,37
Potencial Destructivo (m·s)	0,37	0,50

VII.7. Resultados análisis dinámico en Plaxis2D

Los desplazamientos y aceleraciones obtenidos de la modelación se han considerado en los puntos de control (PC) señalados en la Figura VII-11 Los PC fueron ubicados en sectores de interés, como es el contacto suelo de fundación – Muro, talud aguas abajo, y coronamiento.

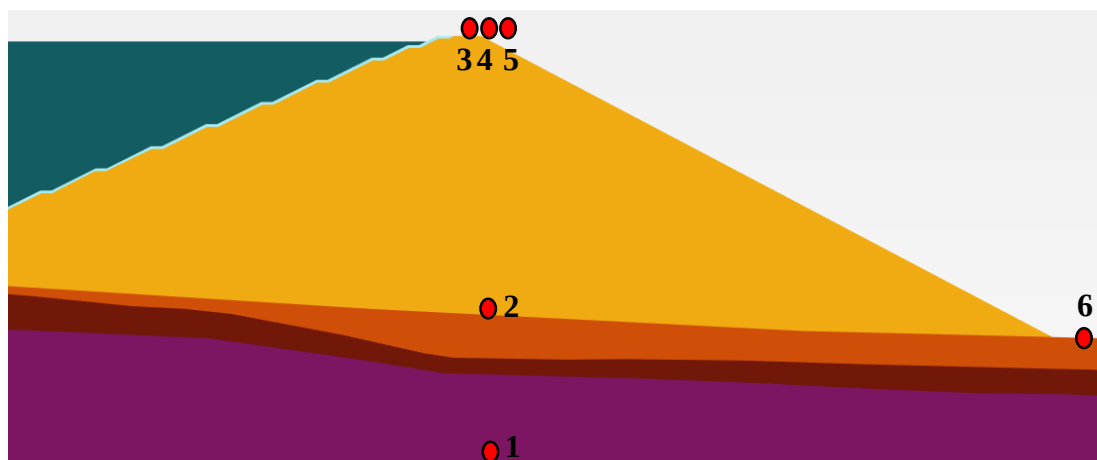


Figura VII-11: Puntos de control (PC) Plaxis2D

VII.7.1. Estimación de desplazamientos

En la Figura VII-14 se muestra los desplazamientos horizontales que se producen en el talud aguas arriba del depósito de relave para el modelo n°1, mientras que en la Figura VII-13 se muestra los desplazamientos horizontales en el modelo n°2. Se puede observar que en el modelo n°1 los desplazamientos máximos horizontales se concentran hacia el pie del talud el cual son aproximadamente 0,99 m, mientras que en el modelo n°2 los desplazamientos máximos horizontales se concentran hacia el coronamiento del muro aproximadamente 1,40 m.

En la Figura VII-14 se muestran los resultados de los desplazamientos verticales del talud aguas arriba del modelo n°1, en el cual se puede observar que los desplazamiento máximos se concentran en el talud cerca del coronamiento, estos desplazamientos máximos están alrededor de 0,4 m, mientras que en la Figura VII-15 se muestran los resultados de los desplazamientos verticales del modelo n°2, también se concentran los desplazamientos máximos en la zona del talud aguas arriba cerca del coronamiento, estos desplazamiento máximos verticales están alrededor de 1,0 m.

Finalmente, en la Figura VII-16 y Figura VII-17 se presentan los desplazamientos horizontales a lo largo del tiempo que dura el sismo del modelo n°1 y modelo n°2 respectivamente, en la Figura VII-18 y Figura VII-19 se presentan los desplazamientos verticales para los dos (2) modelos realizados a lo largo del tiempo para los distintos puntos de control del coronamiento del muro del depósito de relave (PC). En el caso de los desplazamientos horizontales, en el coronamiento se observa un valor máximo de 1,40 m para el modelo n°1. Mientras tanto, en el modelo n°2 se presenta un desplazamiento máximo en el coronamiento igual a 1,36 m.

En cuanto a los desplazamientos verticales, se evidencia que en el coronamiento el asentamiento máximo es de 0,51 m para el modelo n°1, y para el modelo n°2 se tiene un asentamiento máximo en el coronamiento igual a 0,79, indicando un mayor asentamiento en el modelo n°2 con respecto al modelo n°1.

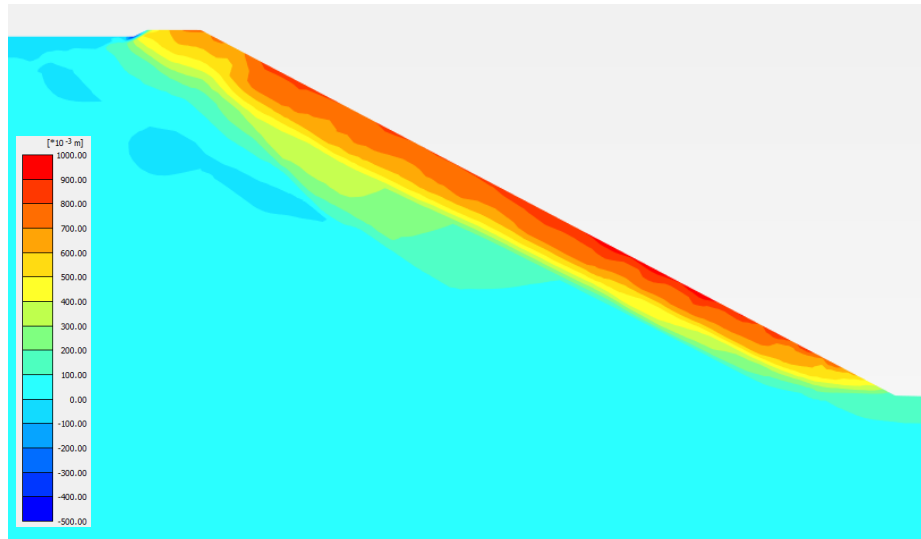


Figura VII-12: Desplazamientos horizontales (m) en Plaxis2D-Modelo N°1

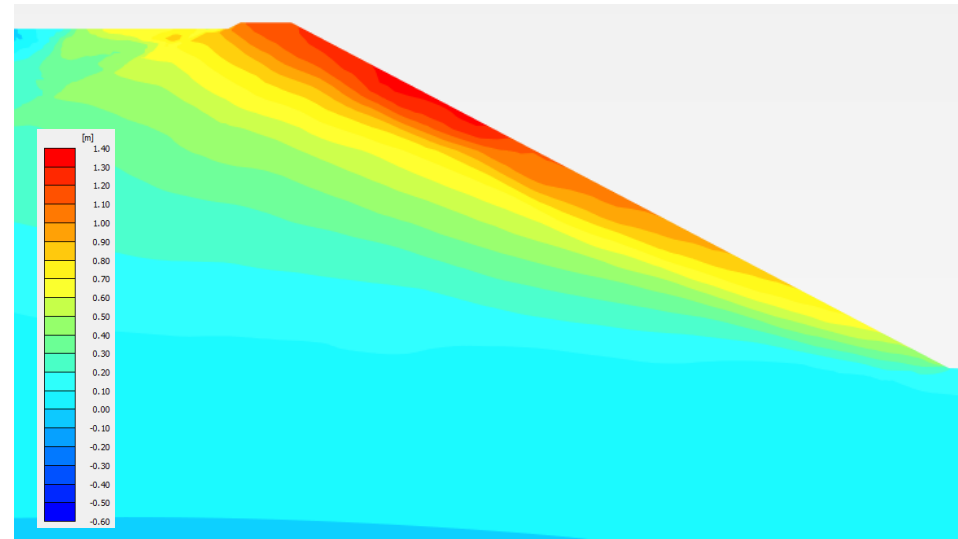


Figura VII-13: Desplazamientos horizontales (m) en Plaxis2D-Modelo N°2

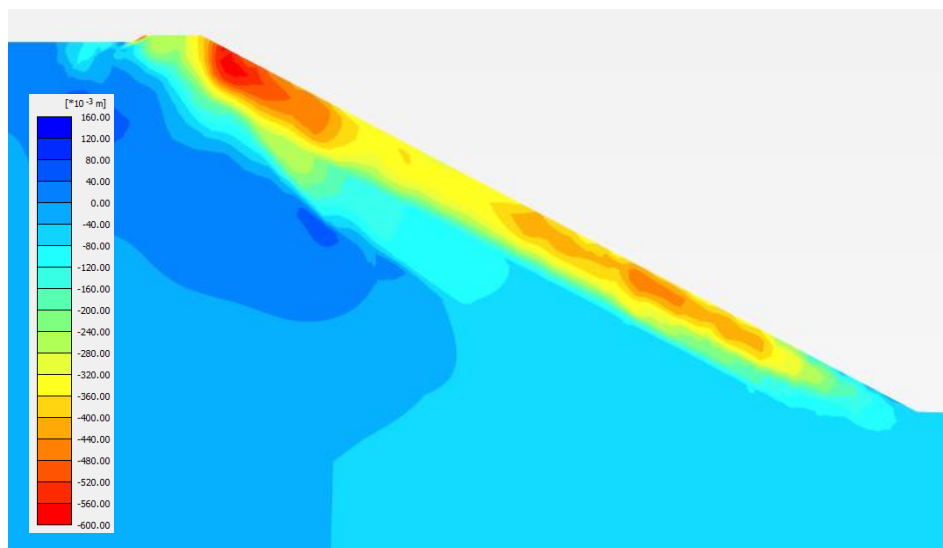


Figura VII-14: Desplazamientos verticales (m) en Plaxis2D-Modelo N°1

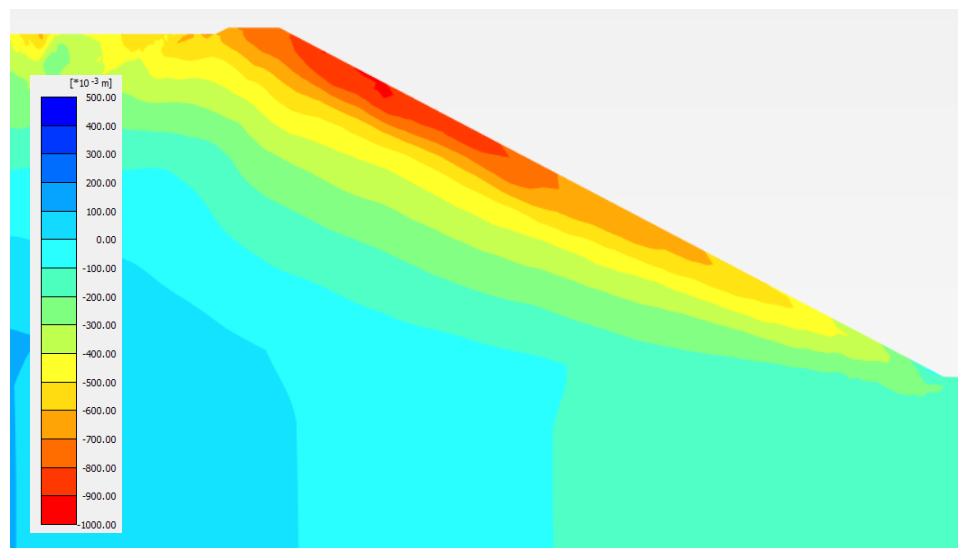


Figura VII-15: Desplazamientos verticales (m) en Plaxis2D-Modelo N°2

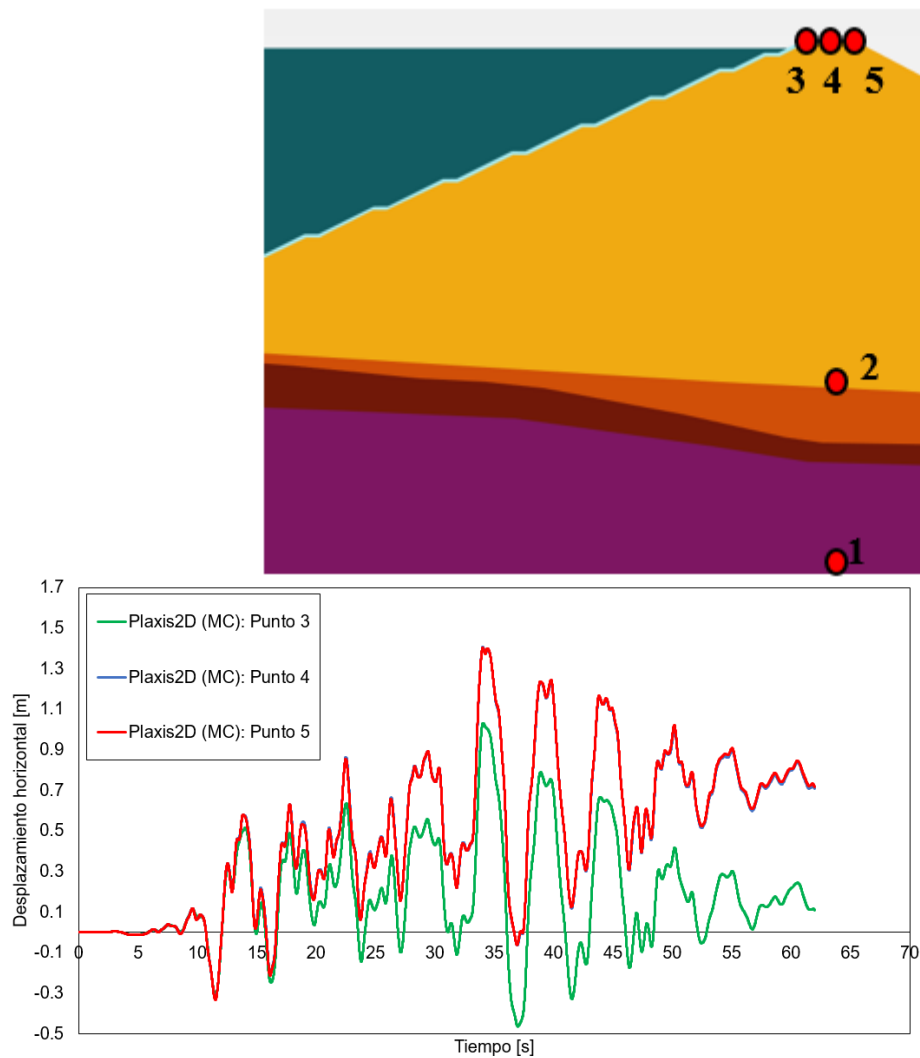


Figura VII-16: Desplazamientos horizontales (m) en Plaxis2D-Modelo N°1

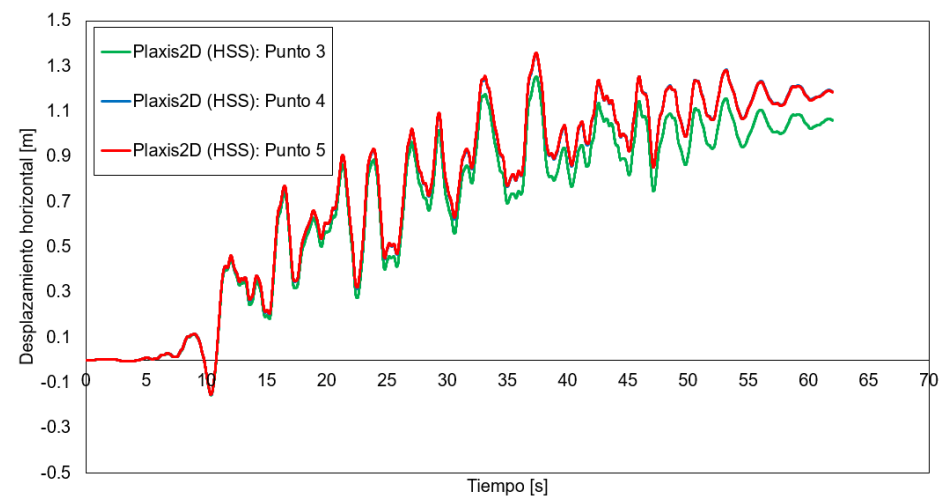


Figura VII-17: Desplazamientos horizontales (m) en Plaxis2D-Modelo N°2

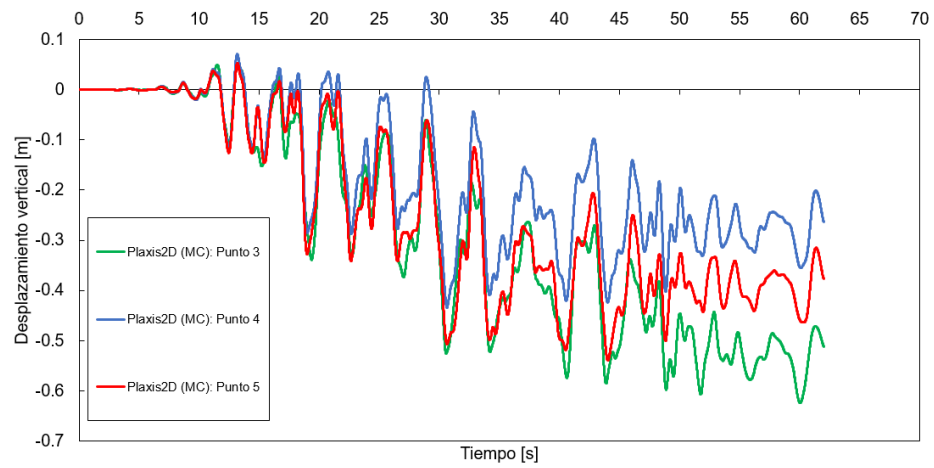


Figura VII-18: Desplazamientos verticales (m) en Plaxis2D-Modelo N°1

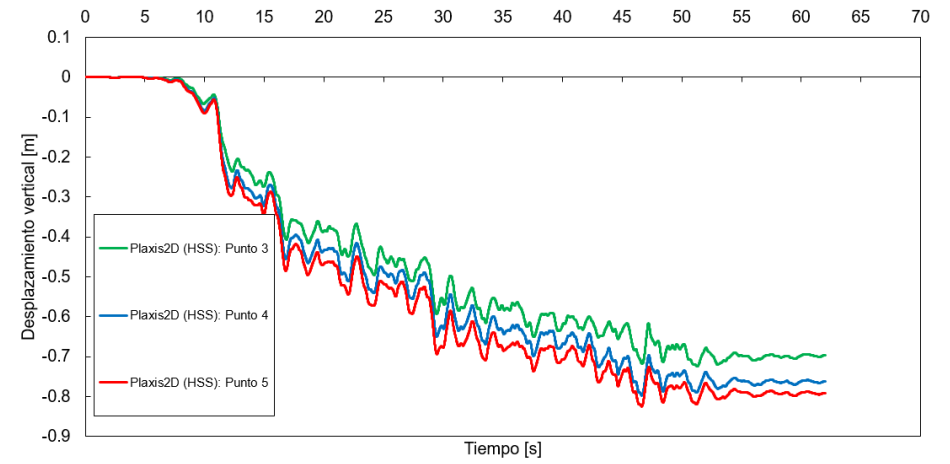


Figura VII-19: Desplazamientos verticales (m) en Plaxis2D-Modelo N°2

VII.7.1. Aceleraciones Horizontales

En la Figura VII-20 se presentan los resultados detallados de las aceleraciones a lo largo del tiempo, evaluadas en diversos puntos de control (PC) ubicados en distintas zonas del modelo, como en la base del muro, el coronamiento y la superficie libre en el afloramiento rocoso. Se observa que la aceleración horizontal máxima (PGA) registrada en el suelo de fundación bajo el Muro (PC 2) es de 0,61 g para el modelo n°1 y 0,37 g para el modelo n°2. Sin embargo, en el coronamiento del talud, la aceleración máxima alcanza un valor mayor de 0,76 g y 0,53 g, lo que indica una amplificación de aproximadamente de 1,2 veces para el modelo n°1 y 1,4 veces para el modelo n°2 en comparación con el valor registrado en la base.

En el caso del PC 4, situado sobre el afloramiento rocoso, la aceleración máxima registrada es de 0,81 g. Este valor muestra cómo las características geológicas y la ubicación del PC influyen en la intensidad de la aceleración experimentada en diferentes puntos del modelo. Además, en la Tabla VII-6 se presenta un resumen de los valores de la PGA y la relación entre las aceleraciones en cada PC con respecto a la aceleración registrada en el afloramiento rocoso (PC 4), proporcionando una comparación clara de las variaciones en la amplificación sísmica a lo largo de la estructura. Estos resultados permiten una evaluación detallada de cómo las diferentes zonas del talud responden a las fuerzas sísmicas y ayudan a entender mejor el comportamiento dinámico del modelo en función de su localización.

Tabla VII-6: Resumen aceleraciones máximas en los PC-Plaxis2D

Punto de control	Ubicación	PGA (g) Modelo N°1	PGA (g) Modelo N°2	Razón PGA/PGA Afloramiento Rcoso(-) Modelo N°1	Razón PGA/PGA Afloramiento Rcoso(-) Modelo N°2
2	Base Muro	0,61	0,37	0,75	0,46
3	Coronamiento	0,76	0,53	0,92	0,65
4	Afloramiento Rcoso	0,81	0,81	1,00	1,00

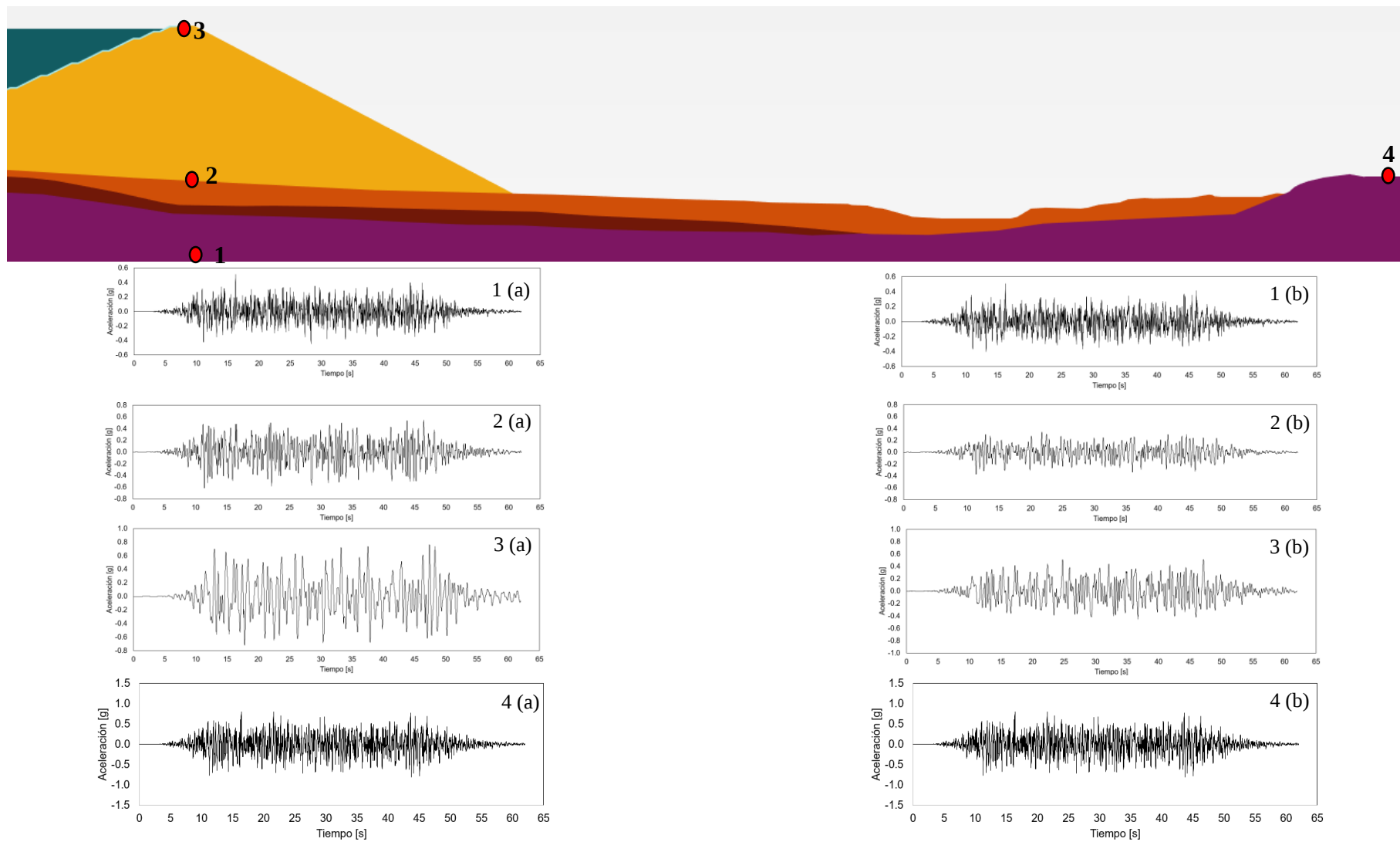


Figura VII-20: Aceleraciones horizontales en los puntos de control de interés; (a): Modelo N°1, (b): Modelo N°2

VII.7.1. Función de amplificación

Para determinar la frecuencia predominante del depósito de relave, se calculó la función de amplificación del muro, que se obtuvo al comparar los espectros de respuesta de los registros de aceleración en el coronamiento (PC 3, como se muestra en la Figura VII-20) y en la base del muro (PC 2, también en la Figura VII-20). La función de amplificación resultante se presenta en la Figura VII-21. De manera similar, se calcularon las funciones de amplificación del coronamiento en relación con el afloramiento rocoso (PC 4, representado en la Figura VII-20).

Según los resultados obtenidos, en comparación al resultado de en Flac2D se observa que la frecuencia predominante tiene una mayor variación, especialmente en el modelo n°2. La frecuencia predominante del modelo n°1 se encuentra entre los 0,2 Hz y 0,25, lo cual corresponde a un periodo entre de 4,0 s y 5,0 s, mientras que en el modelo n°2 la frecuencia predominante se encuentra entre 0,4 Hz y 0,8 Hz, lo cual corresponde a un periodo entre 2,5 s y 1,25 s.

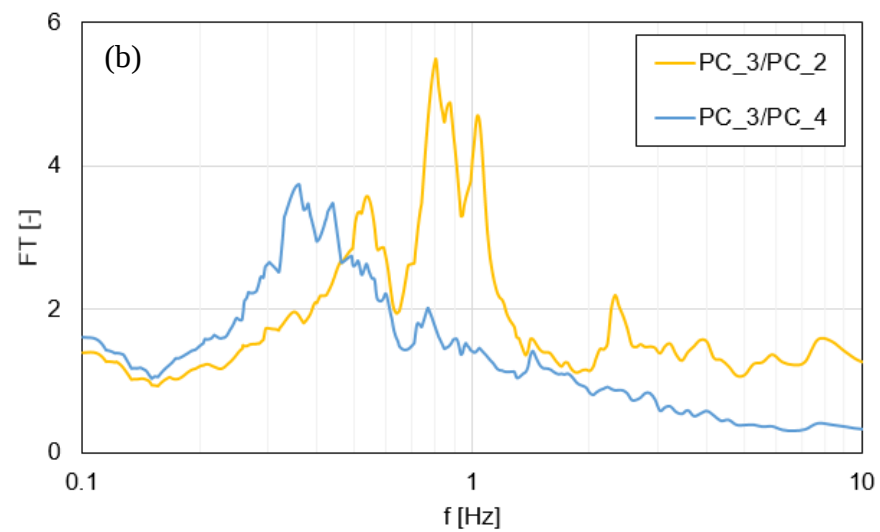
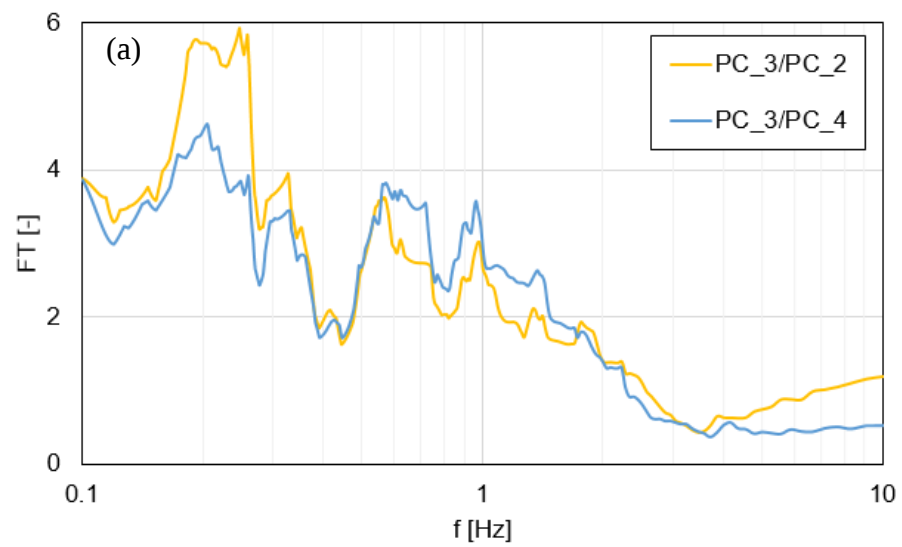


Figura VII-21: Función de amplificación muro depósito de relave en Plaxis2D: (a): Modelo N°1; (b): Modelo N°2

VII.7.2. Resultados licuefacción del relave en Plaxis2D

En el presente acápite se exponen y analizan los resultados obtenidos del modelo numérico realizado en Plaxis2D para evaluar el comportamiento del relave frente a fenómenos de licuefacción. El estudio se enmarca en la simulación de condiciones sísmicas mediante análisis dinámico acoplado, empleando diferentes modelos constitutivos, con el objetivo de capturar de forma realista los mecanismos de generación de presiones de poro, deformaciones y pérdida de resistencia en materiales susceptibles a licuefacción.

A través de esta modelación, se busca comprender el grado de vulnerabilidad del relave frente a sollicitaciones dinámicas, así como identificar las zonas críticas de desarrollo de licuefacción. Para ello, se utilizan parámetros geotécnicos, evaluando indicadores clave como el exceso de presión de poros, la reducción del esfuerzo efectivo, y la evolución de deformaciones plásticas durante y posterior al evento sísmico.

El análisis desarrollado con Plaxis2D permite visualizar el comportamiento espacio-temporal del relave, lo cual es esencial para evaluar la estabilidad del depósito de relave.

Para poder determinar licuefacción del relave, Plaxis2D considera como parámetro de medición la siguiente expresión:

$$r_{u,\sigma'_v} = \frac{\sigma'_{vo} - \sigma'_v}{\sigma'_{vo}} = 1 - \frac{\sigma'_v}{\sigma'_{vo}} \quad (18)$$

Donde:

σ'_v : Presión vertical efectiva durante el sismo.

σ'_{vo} : Presión vertical efectiva inicial.

Como criterio para evaluar la licuefacción del relave, se adoptó el valor del coeficiente de exceso de presión de poro $r_{u,\sigma'_v} \geq 0,75$ indican que el material ha alcanzado un estado de licuefacción plena, es decir, donde el esfuerzo efectivo se reduce de manera significativa y la resistencia al corte del suelo disminuye drásticamente.

En la Figura VII-22 se presenta el resultado general del análisis de licuefacción del relave. En esta figura, se aprecia con claridad que las zonas con gradientes de colores variables representan sectores que no han licuado. Por el contrario, las zonas con color uniforme o constante corresponden a sectores donde el valor de ha alcanzado el umbral crítico, reflejando que el material se encuentra

completamente licuado. Esta interpretación permite identificar visualmente las áreas afectadas por la pérdida de resistencia y aquellas que aún mantienen cierto nivel de estabilidad.

En la Figura VII-23, se detallan las secciones verticales analizadas en profundidad, las cuales permiten estudiar la evolución del proceso de licuefacción a lo largo del perfil del depósito. Estas secciones son fundamentales para identificar la ubicación y espesor de las capas más vulnerables dentro del relave.

Adicionalmente, desde la Figura VII-24 hasta la Figura VII-26, se presentan los perfiles en profundidad para las distintas secciones estudiadas. Estos gráficos permiten observar cómo varía el grado de licuefacción en función de la profundidad.

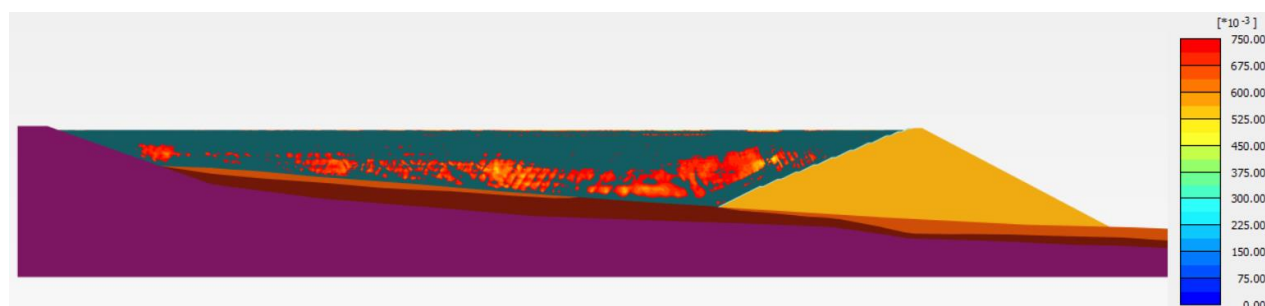


Figura VII-22 Licuefacción del relave

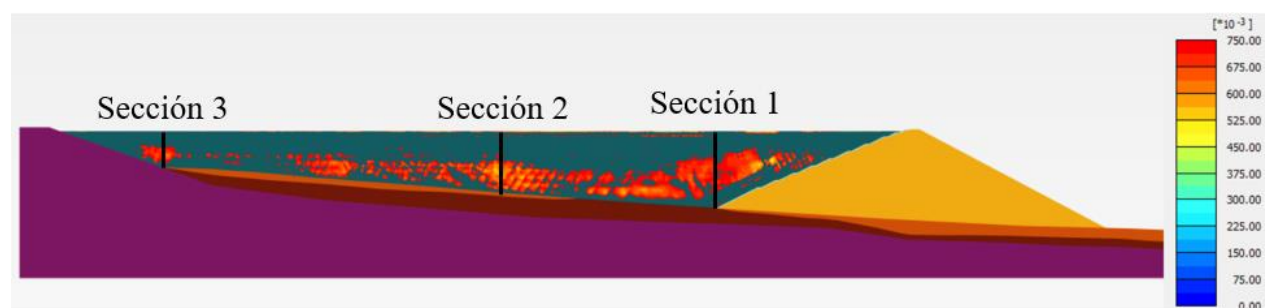


Figura VII-23: Secciones evaluando licuefacción del relave en profundidad

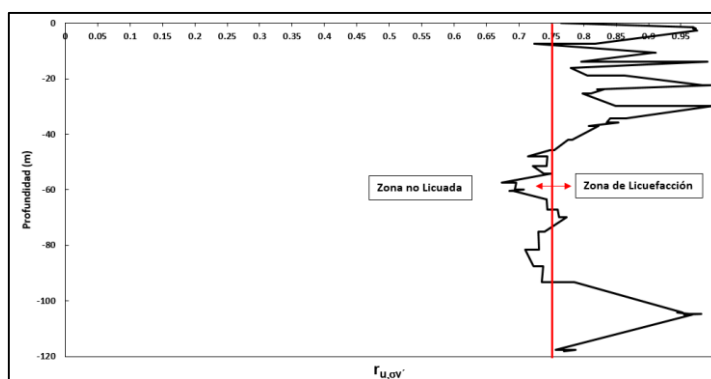


Figura VII-24: Licuefacción sección 1

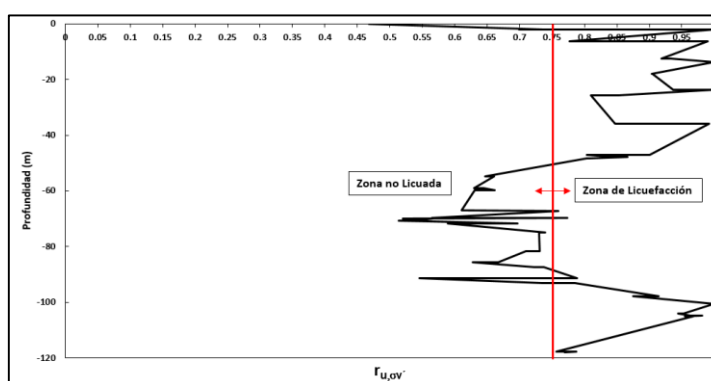


Figura VII-25 Licuefacción sección 2

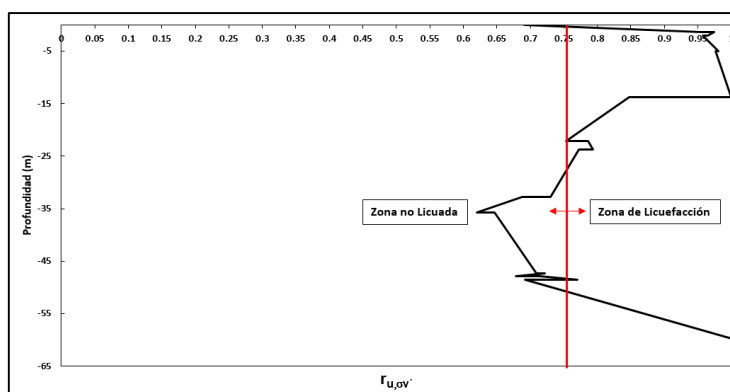


Figura VII-26: Licuefacción sección 3

VIII. COMPARACIÓN RESULTADOS FLAC2D VS PLAXIS2D

En el presente acápite se realiza una comparación entre los resultados obtenidos por Flac2D y Plaxis2D en cuanto a varios aspectos en el análisis geotécnico, como las deformaciones horizontales y verticales, las aceleraciones horizontales, la amplificación sísmica y los espectros de respuesta. La evaluación de estas variables es esencial para comprender el comportamiento dinámico de las estructuras ante un evento sísmico, así como para la predicción de deformaciones excesivas.

La comparación de los resultados permitirá identificar las principales similitudes y diferencias en cuanto a la predicción de las deformaciones de la estructura, los efectos de amplificación sísmica y la respuesta dinámica a las cargas sísmicas. Además, se analizarán las aceleraciones y los espectros de respuesta generados por ambos softwares, lo que ofrecerá una visión más clara sobre cuál de los dos métodos proporciona resultados más precisos o conservadores en diferentes condiciones. Esta comparación no solo ayudará a entender mejor las capacidades de cada herramienta, sino también a evaluar sus ventajas y limitaciones, lo cual es crucial para seleccionar el software adecuado en proyectos geotécnicos que requieren un análisis detallado de la respuesta sísmica.

VIII.1. Acondicionamiento del sismo

Como se ha mencionado en los acápites anteriores, es necesario acondicionar el sismo para obtener el registro sintético adecuado en la roca en superficie libre. En la Figura VIII-1 se presenta el sismo de diseño junto con el sismo acondicionado en Flac2D y Plaxis2D, permitiendo una visualización comparativa de los registros generados en ambos programas. Además, en la Figura VIII-2 y en la Figura VIII-3 se muestran las comparaciones de los pseudo-espectros de aceleraciones y la intensidad de Arias, respectivamente, lo que permite evaluar la respuesta sísmica de los modelos en términos de estos dos importantes parámetros dinámicos.

Para una evaluación más detallada, la Tabla VIII-1 proporciona una comparación de las características principales del sismo en cada uno de los modelos de simulación, incluyendo parámetros clave como la frecuencia, la amplitud y la duración de los registros acondicionados. Este análisis permitirá evaluar de manera más precisa cómo cada software refleja las condiciones sísmicas de diseño y cómo influye cada uno en la simulación de los efectos dinámicos en las estructuras y el terreno. Además, será posible identificar las ventajas de cada plataforma para el acondicionamiento y simulación de registros sísmicos en estudios geotécnicos y estructurales.

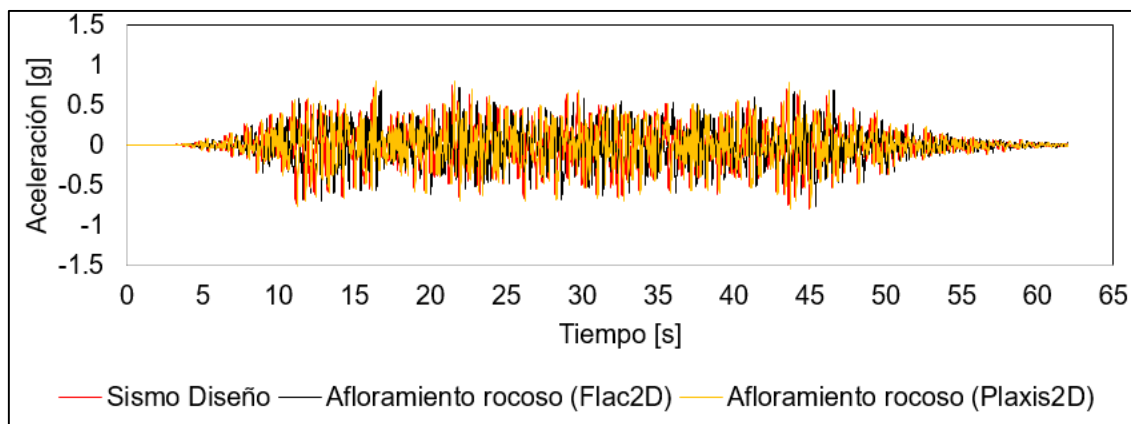


Figura VIII-1: Comparación aceleraciones horizontales

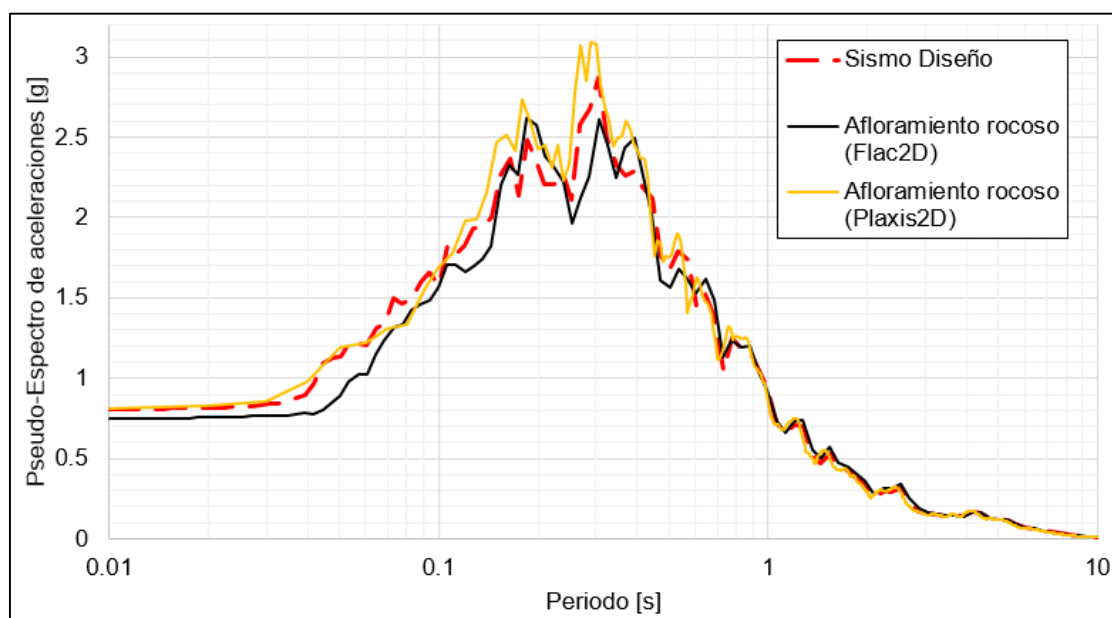


Figura VIII-2: Comparación pseudo-espectros de aceleraciones

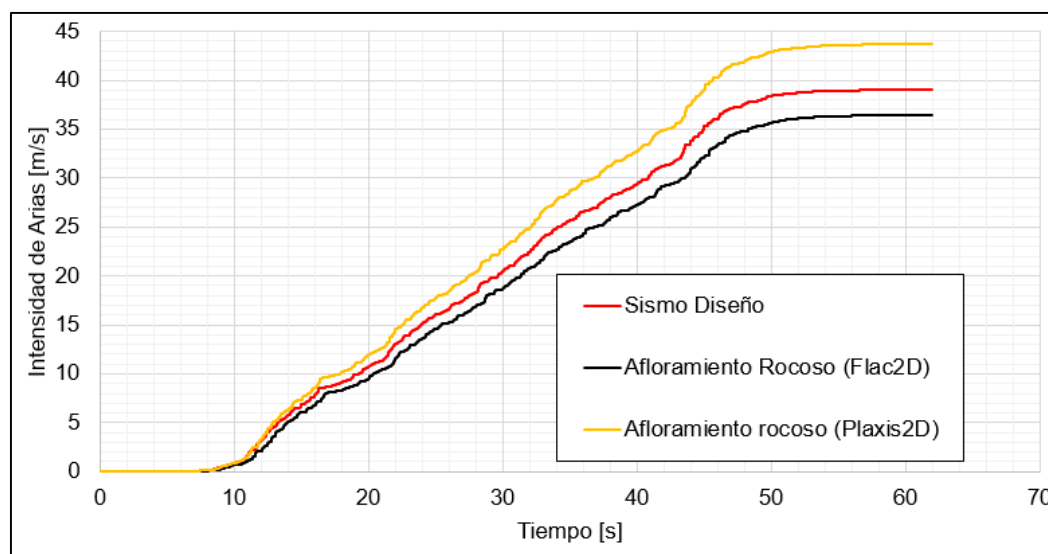


Figura VIII-3: Comparación Intensidad de Arias

Tabla VIII-1: Comparación de las características del sismo de entrada

Parámetro	Sismo de Diseño	Afloramiento Rocoso (Flac2D)	Afloramiento Rocoso (Plaxis2D)
Aceleración máxima, PGA (g)	0,80	0,75	0,81
Intensidad de Arias (m/s)	39,03	36,44	43,7
Cruces por cero (1/s)	10,29	8,64	9,37
Potencial Destructivo (m·s)	0,37	0,49	0,50

En cuanto a la aceleración máxima, tanto Flac2D como Plaxis2D muestran resultados cercanos al sismo de diseño. La diferencia más significativa se observa en el modelo de Plaxis2D, que supera ligeramente el valor del sismo de diseño, mientras que Flac2D presenta un valor algo inferior. Esto puede indicar que Plaxis2D modela una propagación sísmica más intensa en la roca, mientras que Flac2D presenta un comportamiento algo amortiguado. Sin embargo, la diferencia es pequeña y podría no tener un impacto significativo en los resultados globales de la simulación.

La intensidad de Arias, que mide la energía total del movimiento sísmico, muestra variaciones más notables entre los dos programas. Plaxis2D reporta una mayor intensidad de Arias (43,7 m/s) en comparación con el sismo de diseño (39,03 m/s), lo que sugiere que este modelo genera una mayor cantidad de energía en el afloramiento rocoso. Flac2D, por su parte, tiene un valor menor (36,44 m/s), lo que podría indicar que Flac2D simula un comportamiento menos energético en términos de la propagación sísmica a través del material rocoso.

Los cruces por cero, que reflejan la frecuencia de oscilación de la aceleración, son ligeramente menores en Flac2D (8,64 1/s) en comparación con Plaxis2D (9,37 1/s) y el sismo de diseño (10,29 1/s). Este comportamiento podría sugerir que el modelo de Flac2D presenta un movimiento más amortiguado en términos de cambios de dirección de la aceleración, mientras que Plaxis2D reproduce un movimiento más cercano al sismo de diseño en cuanto a las oscilaciones. Estas diferencias podrían reflejar variaciones en la forma de propagación de las ondas sísmicas en cada software.

El potencial destructivo, que es una medida de la energía sísmica que podría contribuir a daños estructurales, muestra que tanto Flac2D como Plaxis2D generan un mayor potencial destructivo en comparación con el sismo de diseño. En este caso, los valores de Flac2D (0,49 m·s) y Plaxis2D (0,50 m·s) son ligeramente superiores al valor de diseño (0,37 m·s), lo que podría indicar que ambos modelos de simulación generan un nivel de energía sísmica superior en el afloramiento rocoso. Sin embargo, la diferencia entre ambos programas es mínima.

VIII.1. Comparación de desplazamientos horizontales y verticales

En el presente acápite se comparan los desplazamientos horizontales y verticales en el coronamiento del muro. En los tres (3) puntos de control de más interés para el presente estudio: Coronamiento talud aguas arriba, centro coronamiento y coronamiento talud aguas abajo.

En la Figura VIII-4 se muestran los puntos de control en el modelo Flac2D y Plaxis2D, mientras que de la Figura VIII-5 a la Figura VIII-10 se muestran los desplazamientos durante el tiempo.

Flac2D muestra los desplazamientos horizontales más grandes en todas las ubicaciones, con valores máximos alcanzando hasta 1,76 m en el coronamiento talud aguas abajo, también en el modelo Flac2D muestra desplazamientos verticales con valores máximos que alcanzan hasta -0,86 m en el coronamiento del talud aguas abajo.

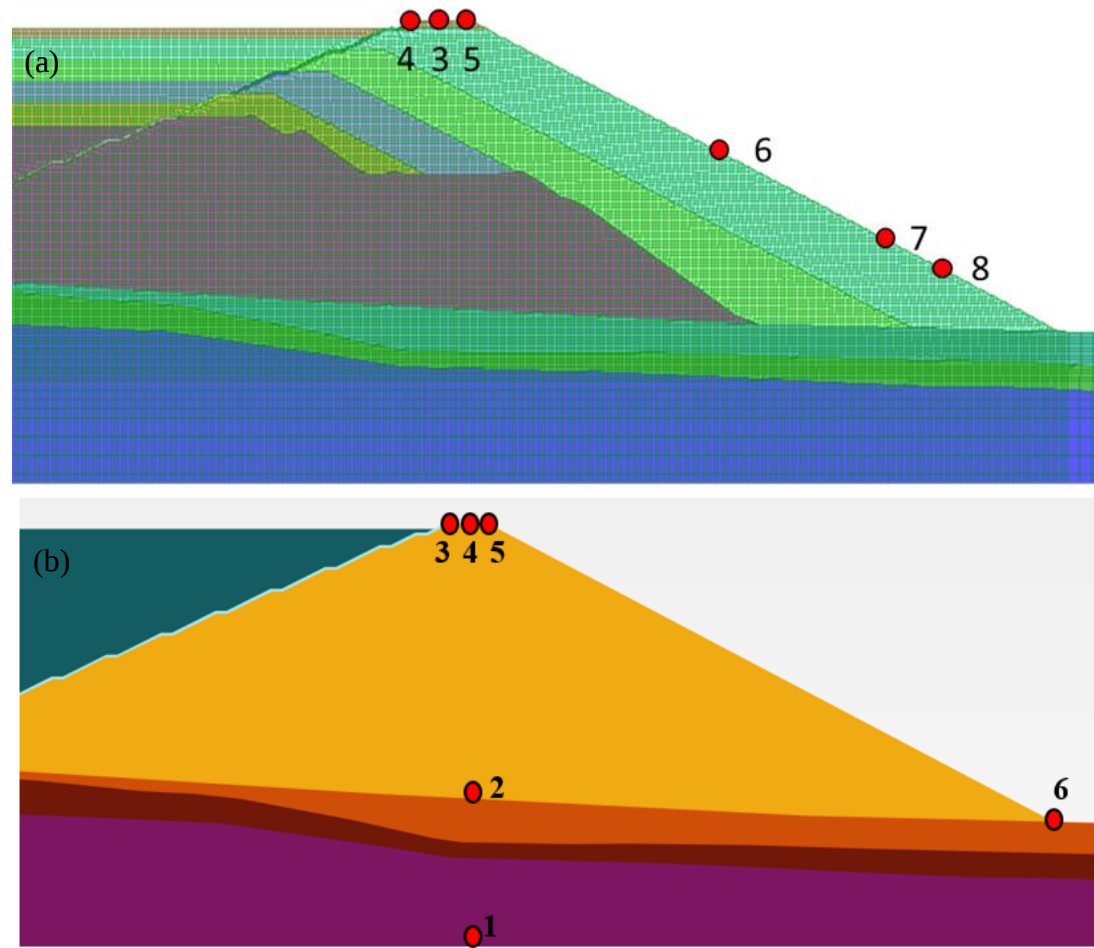


Figura VIII-4: Puntos de control (PC)-(a): Modelo Flac2D; (b): Modelo Plaxis2D

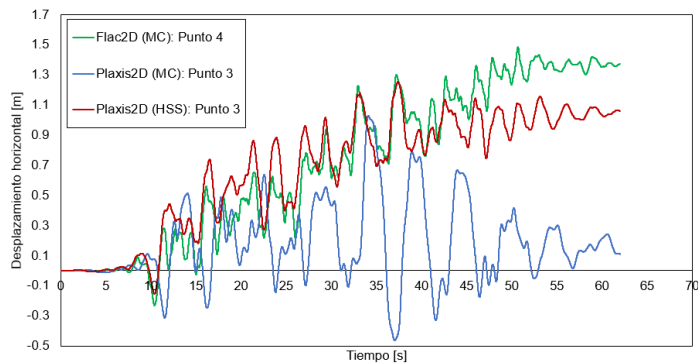


Figura VIII-5: Desplazamientos horizontales coronamiento talud aguas arriba

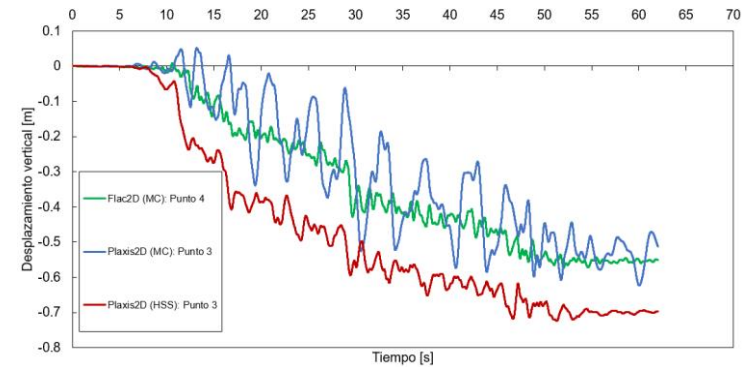


Figura VIII-6: Desplazamientos verticales coronamiento talud aguas arriba

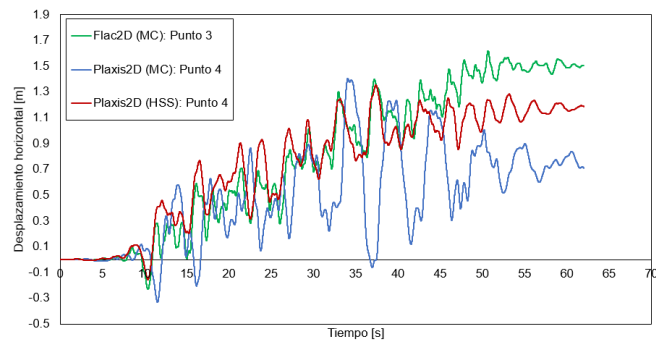


Figura VIII-7: Desplazamientos horizontales centro coronamiento

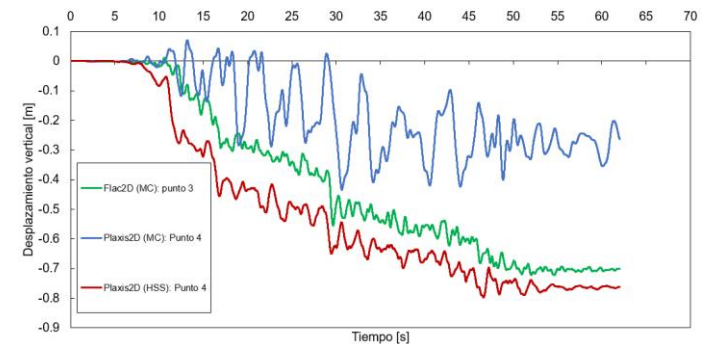


Figura VIII-8: Desplazamientos verticales centro coronamiento

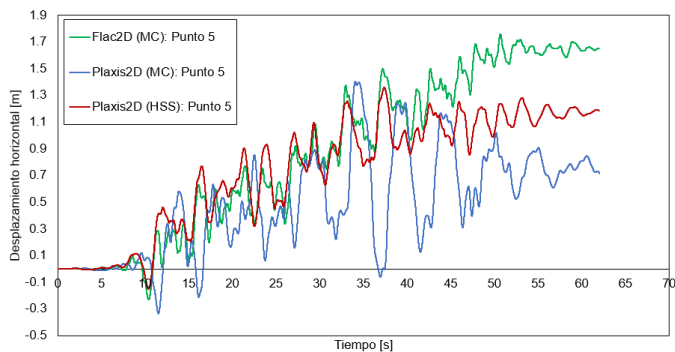


Figura VIII-9: Desplazamientos horizontales coronamiento talud aguas abajo

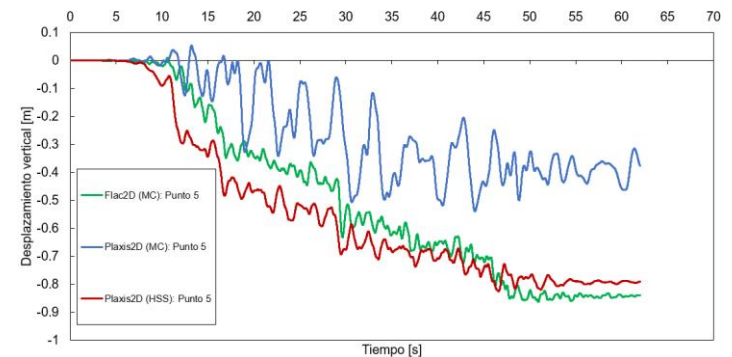


Figura VIII-10: Desplazamientos verticales coronamiento talud aguas abajo

Tabla VIII-2: Comparación desplazamientos horizontales

Modelo	Desplazamientos Horizontales (m)								
	Coronamiento talud aguas arriba			Centro coronamiento			Coronamiento talud aguas abajo		
	Min.	Max.	Rem.	Min.	Max.	Rem.	Min.	Max.	Rem.
Flac2D (MC)	-0,23	1,48	1,37	-0,23	1,62	1,51	-0,23	1,76	1,65
Plaxis2D (MC)	-0,47	1,03	0,11	-0,33	1,41	0,71	0,34	1,40	0,72
Plaxis2D (HSS)	-0,16	1,26	1,06	-0,15	1,35	1,19	-0,15	1,36	1,18

Nota: Los desplazamientos positivos es en dirección hacia aguas abajo y los desplazamientos negativos es en dirección hacia aguas arriba.

Tabla VIII-3: Comparación desplazamientos verticales

Modelo	Desplazamientos Verticales (m)								
	Coronamiento talud aguas arriba			Centro coronamiento			Coronamiento talud aguas abajo		
	Min.	Max.	Rem.	Min.	Max.	Rem.	Min.	Max.	Rem.
Flac2D (MC)	0,01	-0,57	-0,55	0,01	-0,72	-0,70	0,01	-0,86	-0,84
Plaxis2D (MC)	0,05	-0,62	-0,51	0,07	-0,44	-0,26	0,05	-0,54	-0,38
Plaxis2D (HSS)	0,00	-0,72	-0,70	0,00	-0,80	-0,76	0,00	-0,83	-0,79

Nota: Los desplazamientos negativos indica asentamiento, mientras que los desplazamientos positivos indica levantamiento.

VIII.2. Comparación de Aceleraciones horizontales y pseudo-espectros de repuestas

En la Figura VIII-11 se presentan los puntos de control seleccionados para la comparación de las aceleraciones y los pseudo-espectros de aceleración. Estos puntos de control son clave para evaluar la respuesta dinámica del sistema en diversas ubicaciones estratégicas, permitiendo una visión detallada de cómo las ondas sísmicas se propagan a través del modelo. A partir de la Figura VIII-12 hasta la Figura VIII-14, se muestran los resultados de las aceleraciones en cada uno de los puntos de control, proporcionando una representación gráfica de las variaciones de la aceleración en función del tiempo en las ubicaciones críticas.

Por otro lado, de la Figura VIII-15 a la Figura VIII-17, se presentan los resultados correspondientes a los pseudo-espectros de aceleración, los cuales permiten analizar la respuesta dinámica del sistema en términos de frecuencias y periodos de oscilación. Estos espectros son fundamentales para evaluar la amplificación de las vibraciones sísmicas en función de la frecuencia, y para identificar las características del movimiento sísmico que podrían influir en el comportamiento estructural del sistema modelado.

Finalmente, en la Tabla VIII-4 se realiza una comparación detallada de las aceleraciones máximas registradas en cada uno de los puntos de control, así como una comparación con la aceleración medida en la roca en superficie libre.

En el punto de control 1 (Base del Muro), Flac2D presenta un PGA de 0,56 g, mientras que los modelos Plaxis2D tienen valores de 0,61 g (Modelo N°1) y 0,37 g (Modelo N°2). La relación entre los PGAs muestra que el modelo Plaxis2D N°1 genera una mayor aceleración que Flac2D, y el modelo N°2 tiene una aceleración significativamente más baja.

En el punto de control 3 (Coronamiento), los valores de PGA son más altos, con Flac2D alcanzando 1,11 g, Plaxis2D Modelo N°1 0,76 g, y Plaxis2D Modelo N°2 0,53 g. Aquí, Flac2D genera la mayor aceleración

Los resultados indican que Flac2D tiende a generar mayores aceleraciones en el coronamiento, mientras que Plaxis2D muestra una mayor consistencia en los resultados del afloramiento rocoso.

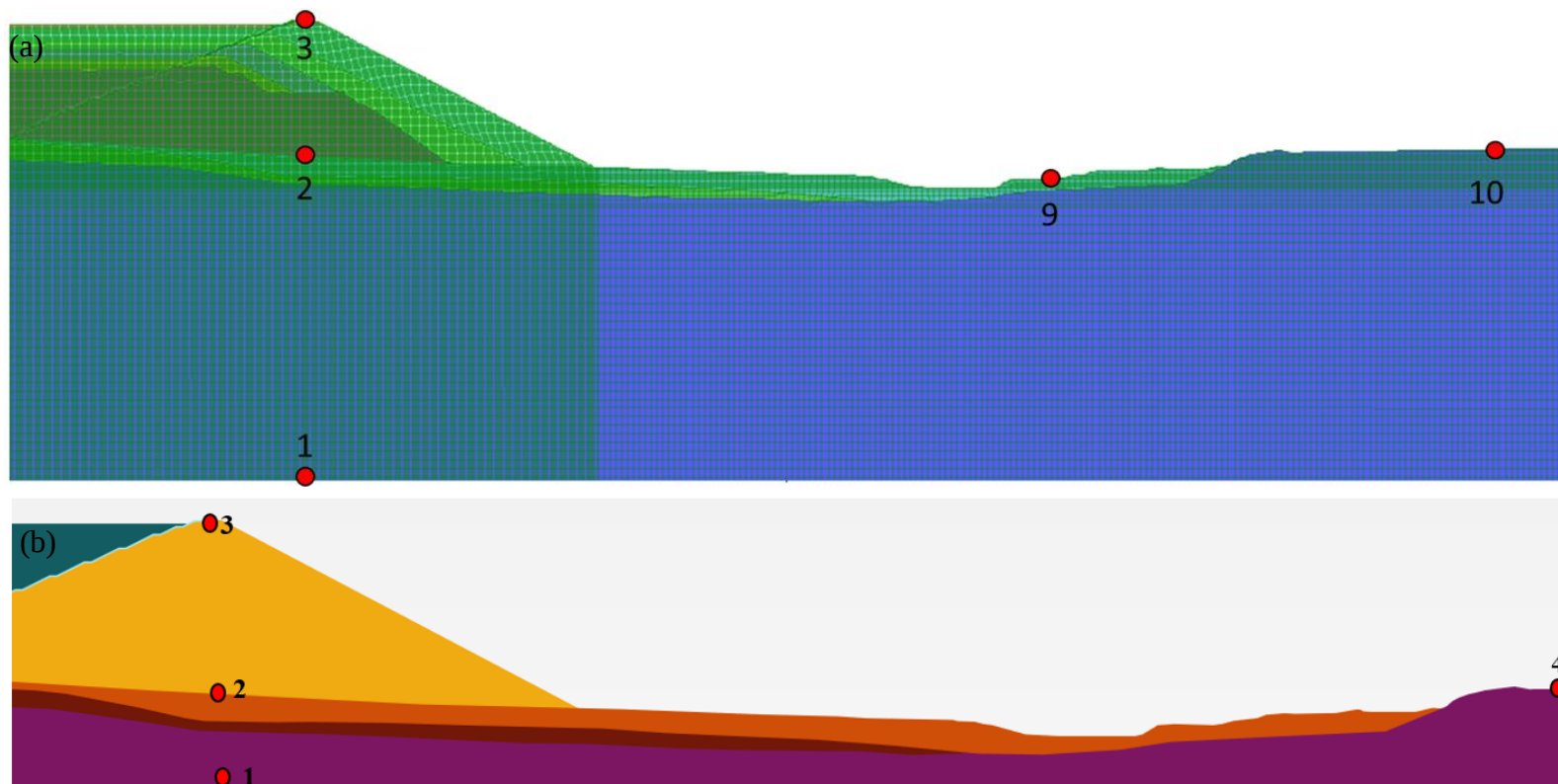


Figura VIII-11: Puntos de control (PC) aceleraciones horizontales- (a): Modelo en Flac2D; (b) Modelo en Plaxis2D

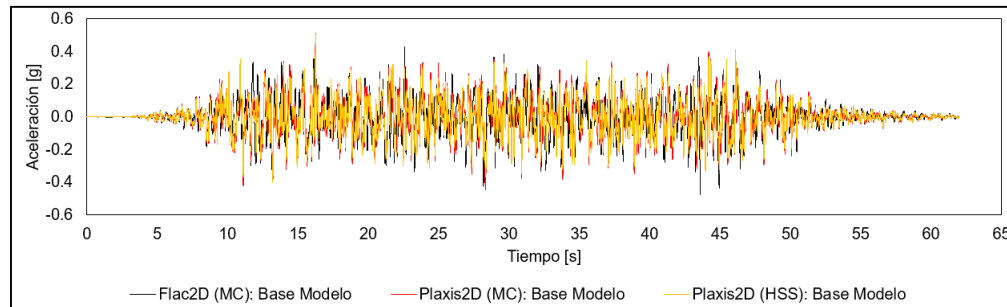


Figura VIII-12: Aceleraciones horizontales punto 1

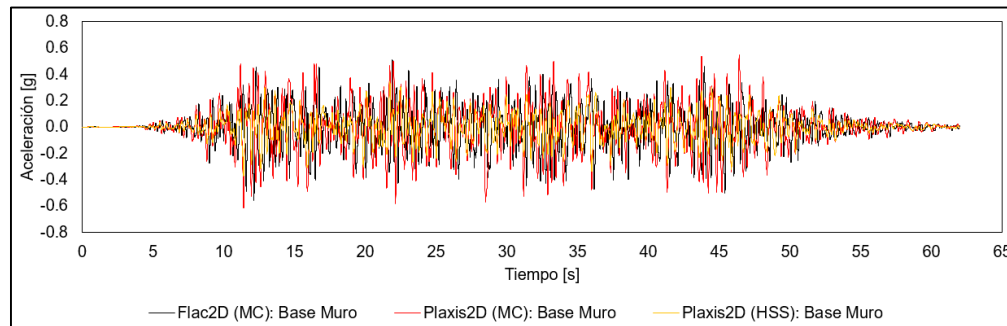


Figura VIII-13: Aceleraciones horizontales punto 2

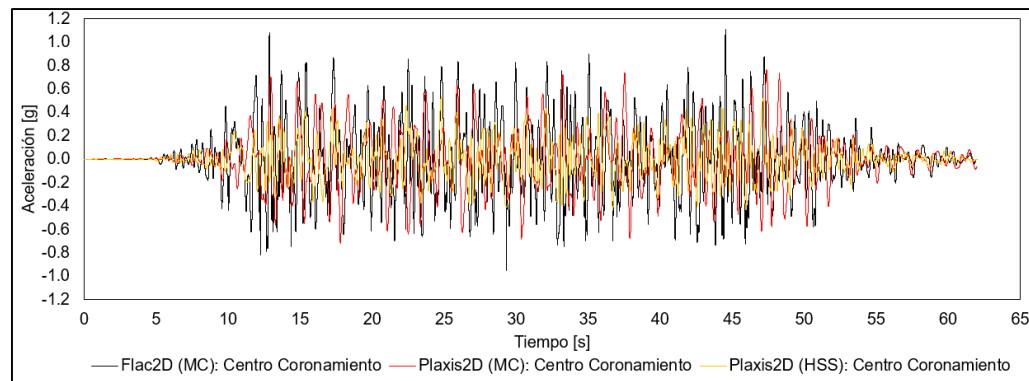


Figura VIII-14: Aceleraciones horizontales punto 3

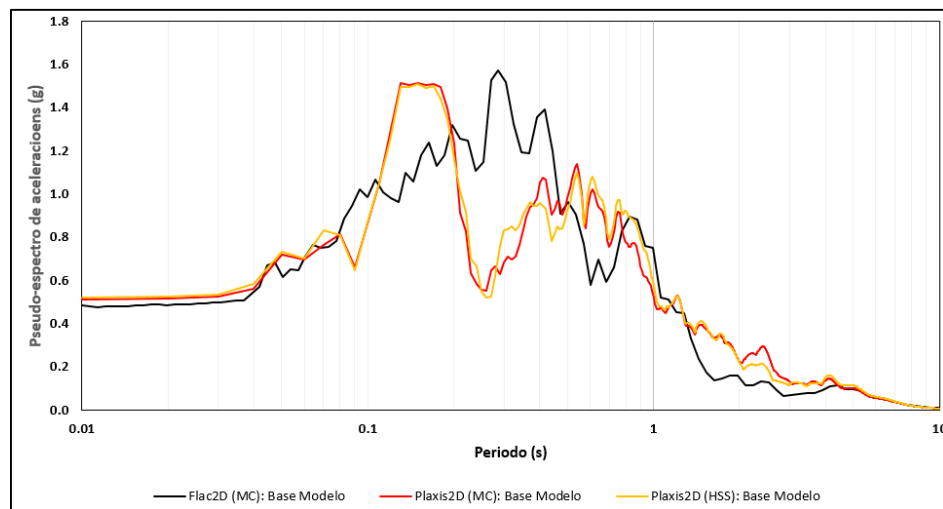


Figura VIII-15: Pseudo-espectro de aceleraciones horizontales punto 1

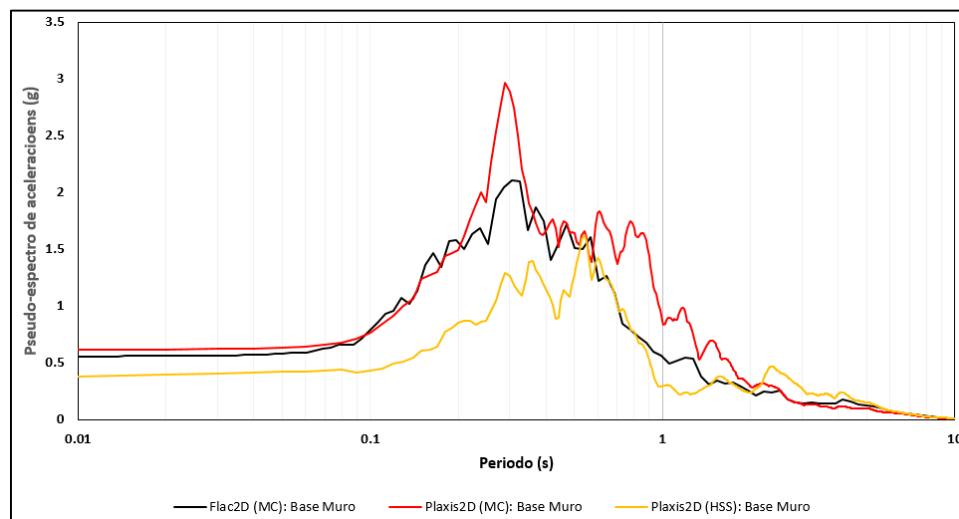


Figura VIII-16: Pseudo-espectro de aceleraciones horizontales punto 2

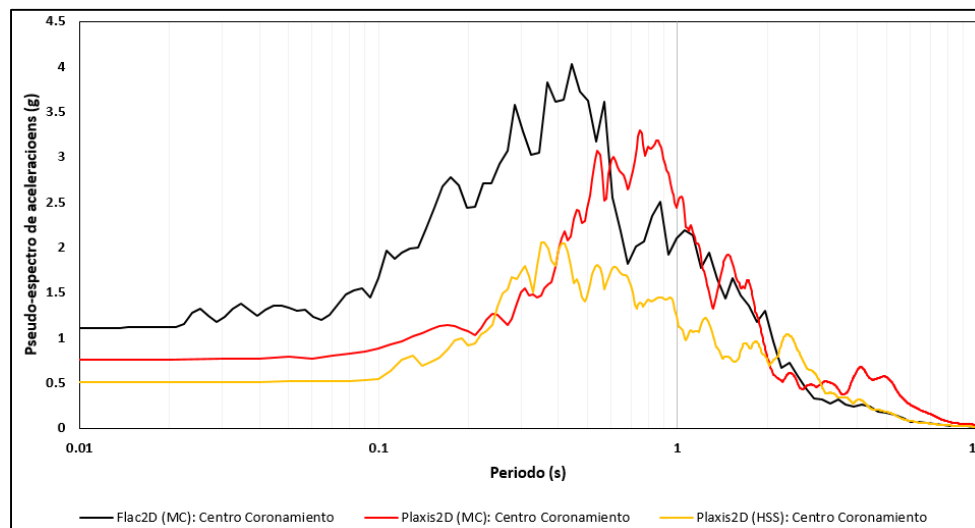


Figura VIII-17: Pseudo-espectro de aceleraciones horizontales punto 3

Tabla VIII-4: Comparación aceleraciones máximas en cada punto de control

Punto de control	Ubicación	PGA (g) Flac2D	PGA (g) Plaxis2D Modelo N°1	PGA (g) Plaxis2D Modelo N°2	Razón PGA/PGA Afloramiento Rocoso(-) Flac2D	Razón PGA/PGA Afloramiento Rocoso(-) Plaxis2D Modelo N°1	Razón PGA/PGA Afloramiento Rocoso(-) Plaxis2D Modelo N°2
2	Base Muro	0,56	0,61	0,37	0,75	0,75	0,46
3	Coronamiento	1,11	0,76	0,53	1,48	0,92	0,65
10/4	Afloramiento Rocoso	0,75	0,81	0,81	1,00	1,00	1,00

VIII.3. Comparación función de amplificación

En el presente acápite se realiza una comparación detallada de las funciones de amplificación obtenidas en los diferentes modelos, así como de las diferencias en la estimación de la frecuencia predominante. Este análisis es crucial para entender cómo cada modelo representa la propagación sísmica a través del suelo y cómo las características del sitio, como la velocidad de las ondas y la geometría del terreno, afectan la respuesta sísmica. Se evalúan tanto las funciones de amplificación como las frecuencias predominantes para determinar si existen discrepancias importantes entre los resultados obtenidos mediante los distintos enfoques, lo cual es esencial para una correcta interpretación de los efectos sísmicos. Asimismo, se profundiza en la influencia que la variabilidad en los parámetros de modelado tiene sobre la precisión y confiabilidad de las predicciones, permitiendo identificar posibles limitaciones y áreas de mejora en los métodos de análisis sísmico utilizados.

En la Figura VIII-18 se muestra la función de amplificación entre el coronamiento del muro y la base del muro, mientras que en la Figura VIII-19 se muestra la función de amplificación entre el coronamiento del muro y el afloramiento rocoso en superficie libre.

Como se puede observar, en el modelo Flac2D (MC) la frecuencia predominante se mantiene constante en torno a 0,5 Hz ($T = 2,0$ s), lo que indica una respuesta dinámica estable y una rigidez estructural que no se ve significativamente afectada por las condiciones de contorno evaluadas. Esto sugiere que el modelo, al utilizar el enfoque de diferencias finitas explícitas y un comportamiento elasto-plástico simplificado, tiende a conservar una rigidez global uniforme.

En contraste, el modelo Plaxis2D (MC) muestra una frecuencia predominante más baja y variable, con valores que van desde 0,26 Hz ($T = 3,86$ s) hasta 0,2 Hz ($T = 5,0$ s). Aunque también utiliza el modelo de Mohr-Coulomb, la formulación en elementos finitos permite una redistribución más detallada de esfuerzos y deformaciones, lo que se traduce en una mayor variabilidad de la respuesta.

Por otro lado, el modelo Plaxis2D (HSS) presenta una variación aún más significativa en la frecuencia predominante, que desciende de 0,8 Hz ($T = 1,25$ s) a 0,35 Hz ($T = 2,86$ s). Está marcada disminución sugiere que el modelo constitutivo Hardening Soil (HSS), al incorporar una rigidez no lineal dependiente del nivel de deformación, capta de manera más realista la pérdida de rigidez con el incremento de deformaciones. Como resultado, este modelo es capaz de reflejar con mayor precisión el

comportamiento dinámico real del suelo, especialmente bajo solicitaciones que provocan degradación progresiva de la rigidez.

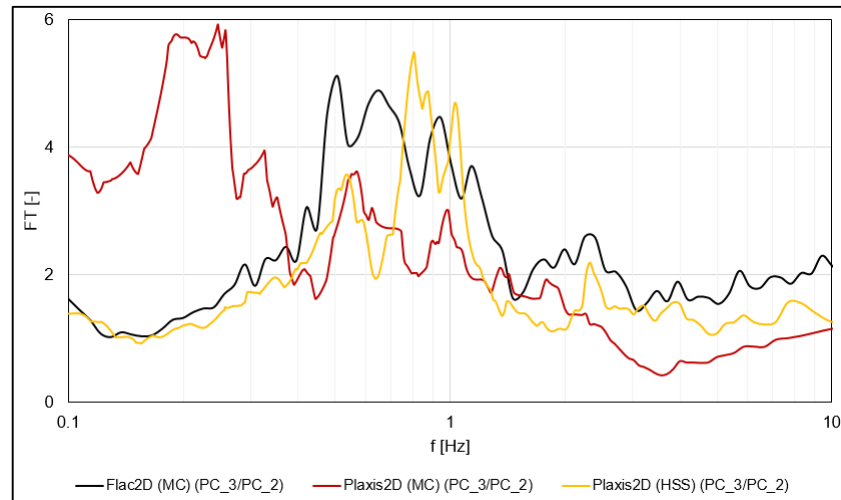


Figura VIII-18: Función de amplificación: Coronamiento-Base Muro

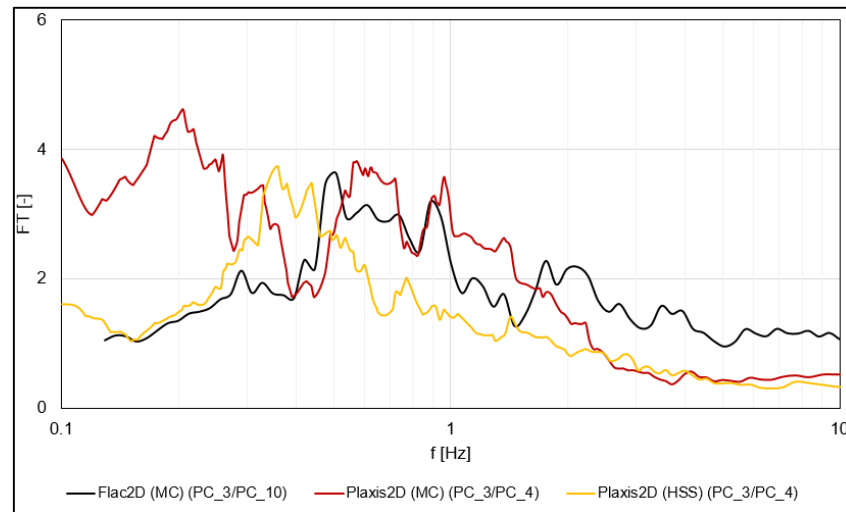


Figura VIII-19: Función de amplificación: Coronamiento-Afloramiento Rocoso

IX. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo analizó el comportamiento dinámico de un depósito de relaves mediante la aplicación de dos herramientas numéricas ampliamente reconocidas en geotecnia: Flac2D (basado en el método de diferencias finitas) y Plaxis2D (basado en el método de elementos finitos). El análisis se centró en la sección más desfavorable del Muro Principal, evaluando la respuesta de la estructura ante solicitaciones sísmicas representativas de un sismo máximo creíble.

En el caso de Flac2D, se modelaron los materiales mediante el modelo constitutivo elasto-plástico Mohr-Coulomb, incorporando la secuencia constructiva y el registro sísmico acondicionado. Los resultados mostraron desplazamientos máximos de hasta 1,76 m en dirección horizontal y 0,86 m en asentamiento vertical, principalmente concentrados en el talud aguas abajo.

Plaxis2D fue utilizado en dos configuraciones:

- Modelo N°1, utilizando también el modelo de Mohr-Coulomb.
- Modelo N°2, incorporando modelos avanzados como Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSS) para el estéril de mina y UBC3D-PLM para el relave, permitiendo capturar efectos no lineales y licuefacción.

Los desplazamientos en Plaxis2D fueron menores en comparación con Flac2D, aunque el modelo N°2 presentó valores cercanos a 1,4 m de desplazamiento horizontal y 0,79 m de asentamiento, reflejando una respuesta más realista bajo condiciones dinámicas debido a los modelos constitutivos empleados.

En cuanto a las aceleraciones máximas (PGA), se observó una amplificación de hasta 1,11 g en Flac2D y 0,76 g en Plaxis2D Modelo N°1, en comparación con el valor de base de 0,80 g.

Adicionalmente, Plaxis2D permitió evaluar el fenómeno de licuefacción del relave, identificando zonas críticas con valores del coeficiente de exceso de presión de poro

La comparación entre ambos programas evidenció que, si bien ambos entregan resultados coherentes, Plaxis2D, al incorporar modelos avanzados, permite una representación más detallada del comportamiento real del depósito ante eventos sísmicos complejos. Por otro lado, Flac2D resulta útil para análisis preliminares o evaluaciones conservadoras con menores requerimientos computacionales.

Recomendaciones:

Se recomienda emplear modelos constitutivos más sofisticados, como el Hardening Soil with Small Strain Stiffness (HSS) y UBC3D-PLM, especialmente en materiales como el relave, donde el comportamiento no lineal y fenómenos como la licuefacción pueden jugar un rol crítico en la estabilidad del depósito.

- Validación con datos experimentales adicionales:

Si bien se contó con ensayos Triaxiales CID para calibrar parte de los materiales, se sugiere ampliar la base experimental, incluyendo ensayos cíclicos y/o de columna resonante para mejorar la calibración de parámetros dinámicos, como el módulo de rigidez a pequeñas deformaciones

- Modelación tridimensional para escenarios más complejos:

La presente tesis se enfocó en un análisis bidimensional. Para futuras investigaciones, se recomienda considerar modelos 3D que puedan captar mejor la geometría real del depósito y la distribución espacial de los materiales.

- Monitoreo en terreno para retroalimentación del modelo numérico:

La implementación de un sistema de instrumentación en terreno (inclinómetros, piezómetros, acelerómetros) permitiría comparar resultados numéricos con mediciones reales, fortaleciendo la confiabilidad del modelo.

- Evaluación de otras condiciones sísmicas:

Se recomienda ampliar el análisis de la respuesta sísmica del depósito evaluando su comportamiento frente a distintos niveles de amenaza sísmica, incluyendo tanto el sismo de diseño como sismos de mayor magnitud, como los definidos por las guías de la ICOLD (International Commission on Large Dams), que consideran eventos extremos. Esta evaluación permitiría determinar la robustez del diseño y su desempeño estructural bajo escenarios más severos.

Asimismo, sería altamente beneficioso incorporar al análisis registros de sismos históricos ocurridos en la zona del proyecto, ya que estos reflejan las características locales del movimiento sísmico, como la directividad, duración, contenido frecuencial y efectos de sitio. Esto contribuiría a una evaluación más realista y contextualizada, fortaleciendo la confiabilidad del modelo numérico y permitiendo desarrollar

estrategias de mitigación de riesgo más efectivas. Además, este enfoque ayudaría a definir de manera más precisa los niveles de desempeño esperados en función de la peligrosidad sísmica regional.

- Inclusión del efecto de la componente vertical del sismo:

Aunque no se consideró en este estudio, incorporar la componente vertical podría aportar información adicional sobre el comportamiento estructural, especialmente en zonas cercanas al muro.

Dado que el comportamiento dinámico del relave está altamente influenciado por su nivel de saturación, futuros análisis podrían incorporar diferentes condiciones hidrogeológicas para evaluar su impacto en la estabilidad global.

Finalmente, se concluye que no es recomendable basar el análisis y la toma de decisiones exclusivamente en un único software de modelación numérica, ya que cada programa presenta sus propias limitaciones, supuestos teóricos y capacidades específicas. La comparación entre los resultados obtenidos con Flac2D y Plaxis2D evidenció diferencias en los desplazamientos, presiones de poro y aceleraciones, aun cuando se utilizaron condiciones similares de entrada. Estas variaciones destacan la importancia de utilizar más de una herramienta de simulación para validar resultados y obtener una visión más integral del comportamiento geotécnico del sistema estudiado. Complementar los análisis con diferentes plataformas permite identificar posibles desviaciones, fortalecer la confiabilidad de las conclusiones y reducir el riesgo asociado a decisiones de diseño basadas en un único enfoque numérico.

X. BIBLIOGRAFIA

Lysmer, J. & R.L. Kuhlemeyer. (1969). Finite dynamic model for infinite media. *Journal of the Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE*, Vol. 95, No. EM4, pp. 859-876.

Duku, P., Stewart, J., Whang, D. & Yee, E. (2008). Volumetric Strains of Clean Sands Subject to Cyclic Loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2008)134:8(1073).

Liu, A. H., Stewart, J.P., Abrahamson, N.A., & Moriwaki, Y. (2001). Equivalent number of uniform stress cycles for soil liquefaction analysis. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(12), pp. 1017-1026.

Deepsoil. (2022). 1-D Wave Propagation Program for Geotechnical Site Response. v. 7.0.

Ministerio de Minería. (2006). Decreto Supremo N°248. Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves.

Ministerio de Obras Públicas. (2015). Decreto N°50. Aprueba reglamento a que se refiere al artículo 395 inciso 2°, del Código de Aguas.

Hernández, A. (2022). Colapso del Tranque de Relaves Las Palmas Durante el Sismo del Maule 2010.

Ishihara, K. (1996). *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford, Clarendon Press.

Jefferies, M. (2006). *Soil liquefaction: A critical state approach*, Taylor and Francis.

Jinung, D., Seoung-Beom, H., Yeo-Won, Y. & Chang, I. (2016). Evaluating the Liquefaction Potential of Gravel Soils with Static Experiments and Steady State Approaches. *KSCE Journal of Civil Engineering* (2017) 00(0) (p.642-651).

Kayen, R., Moss, R., Thompson, E., Seed, R., Cetin, K., Kiureghian, A., Tanaka, Y. & Tokimatsu, K. (2013). Shear-wave velocity-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 139 (3) (p. 407-419).

Kondner, R. (1963). A hiperbolic stress strain formulation for sands. *Pan. Am. ICOSF Brazil*, 1 (p. 289-324).

Kramer, S. (1996). Geotechnical Earthquake Engineering. Upper Saddle River, N.J:Prentice Hall.

Olson, S. (2001). Liquefaction analysis of level and sloping ground using field case histories and penetration resistance, Ph.D. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.

Petalas, A. & Galavi, V. (2013). Plaxis liquefaction model UBC3D-PLM. Plaxis knowledge base.

Plaxis. PLAXIS 2D^R [Software].

PLAXIS CONNECT Edition V2024.1. Material Models Manual.

Puebla, H., Byrne, M.& Phillips, P. (1997). Analysis of CANLEX liquefaction embankments: prototype and centrifuge models, Can. Geotech. J., 34 (p. 641-657).

Robertson, P. (2010). Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 136, iss. 6 (p. 842 – 853).

Seed, H. & Idriss I. (1971). A simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. En Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, 97, 9 (p. 1249-1274).

Schanz, T., Vermeer, P. & Bonnier, P. (1999). The hardening soil model: formulation and verification. En Beyond 2000 in computational geotechnics. Balkema, Rotterdam. Singh S. (1994). Liquefaction characteristics of Silt. Geotech Geol Eng 14(1) (p.105–116).

Souliotis, C., Gerolymos, N. (2016). Seismic Analysis of quay wall in liquefiable soil with the ubc3d-plm model: Calibration methodology and validation. En 1th International Conference on Natural Hazards & Infrastructure.

Instituto Nacional de Normalización. (2012). Norma Chilena NCh 433 Of.1996 Modificada en 2012.

Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2011. Decreto N°61. Aprueba reglamento que fija el diseño sísmico de edificios y deroga Decreto N°117, de 2010.

XI. ANEXOS

XII. ANEXO A: FASES CONSTRUCTIVAS PLAXIS2D

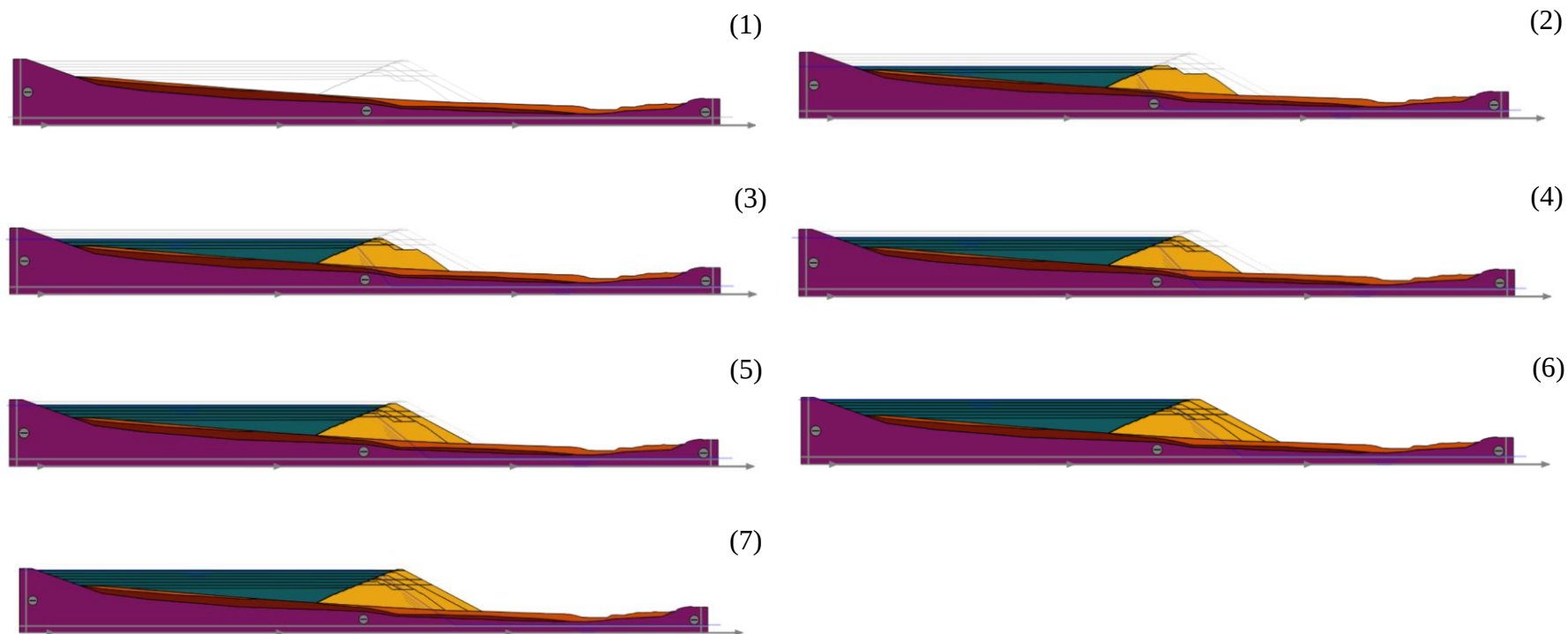


Figura XII-1: Fases constructivas Plaxis2D: (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase final.

XIII. ANEXO B: NIVEL FREÁTICO POR FASES PLAXIS2D

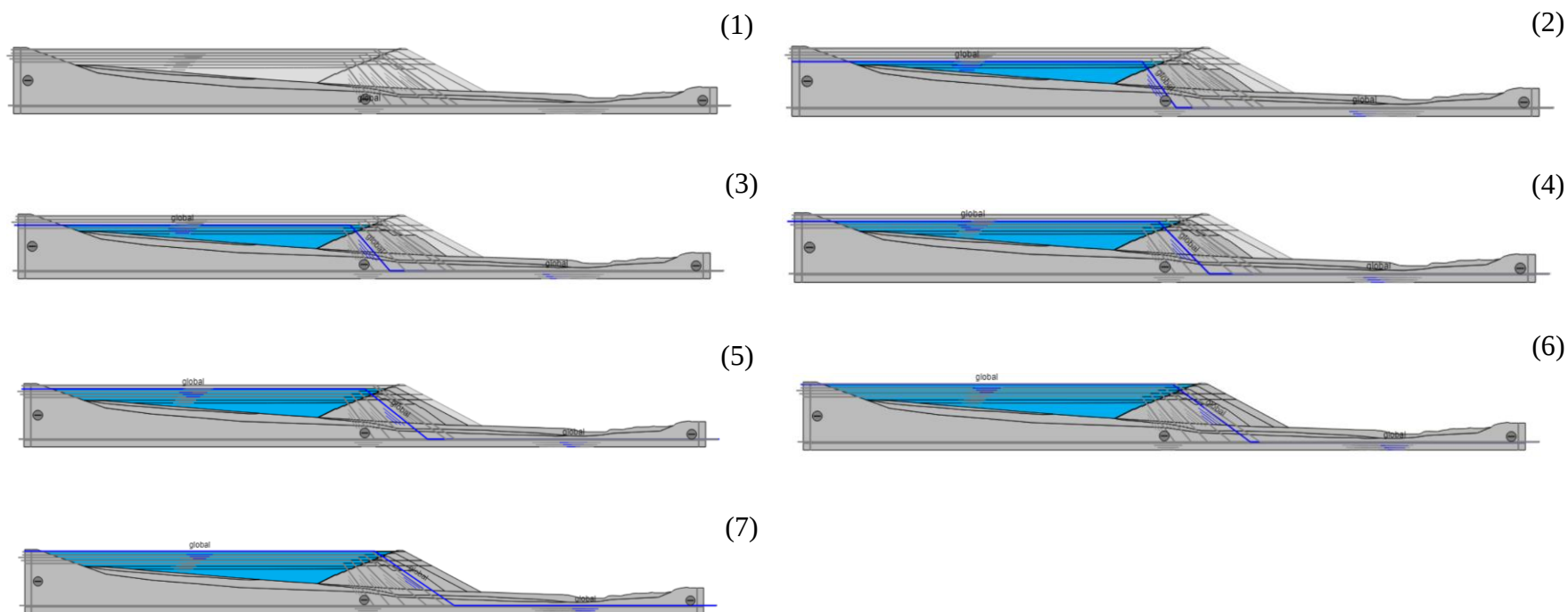


Figura XIII-1: Nivel freático por fases constructivas Plaxis2D: (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase final.

XIV. ANEXO C: RESULTADOS TENSIONES-EXCESO DE PRESIONES DE POROS PLAXIS2D (MC)

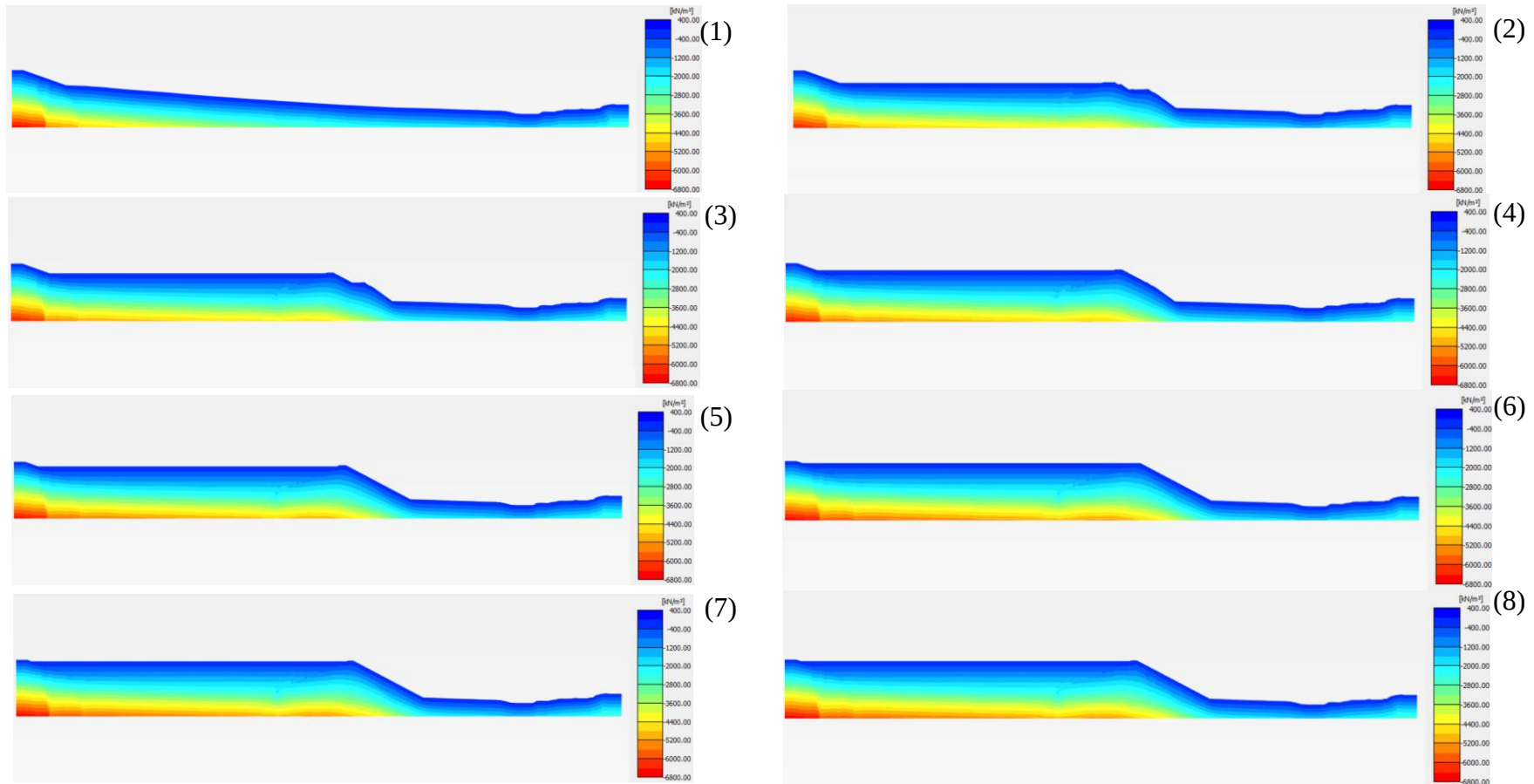


Figura XIV-1: Tensiones totales verticales Plaxis2D (MC): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo

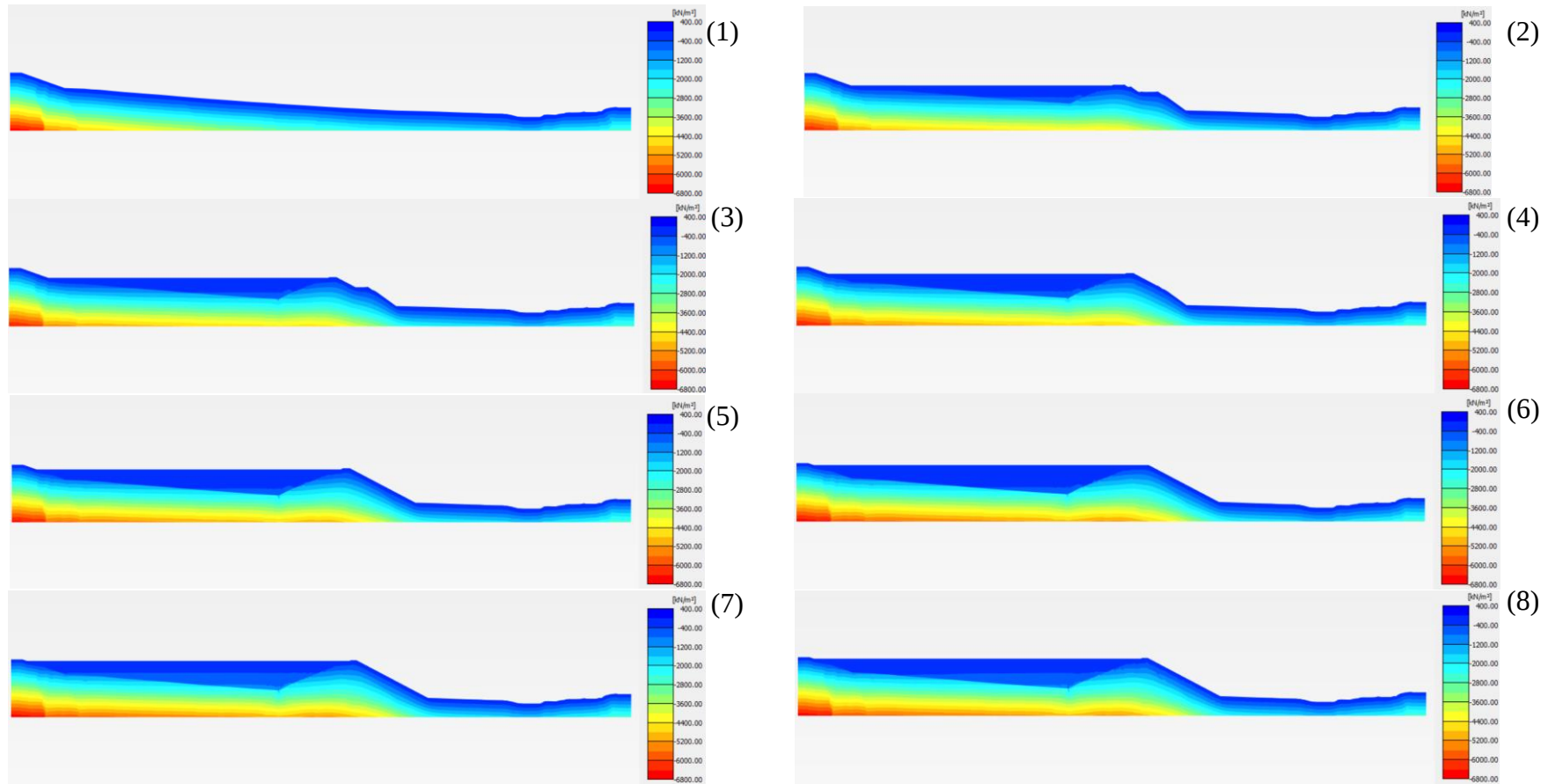


Figura XIV-2: Tensiones efectivas verticales Plaxis2D (MC): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo

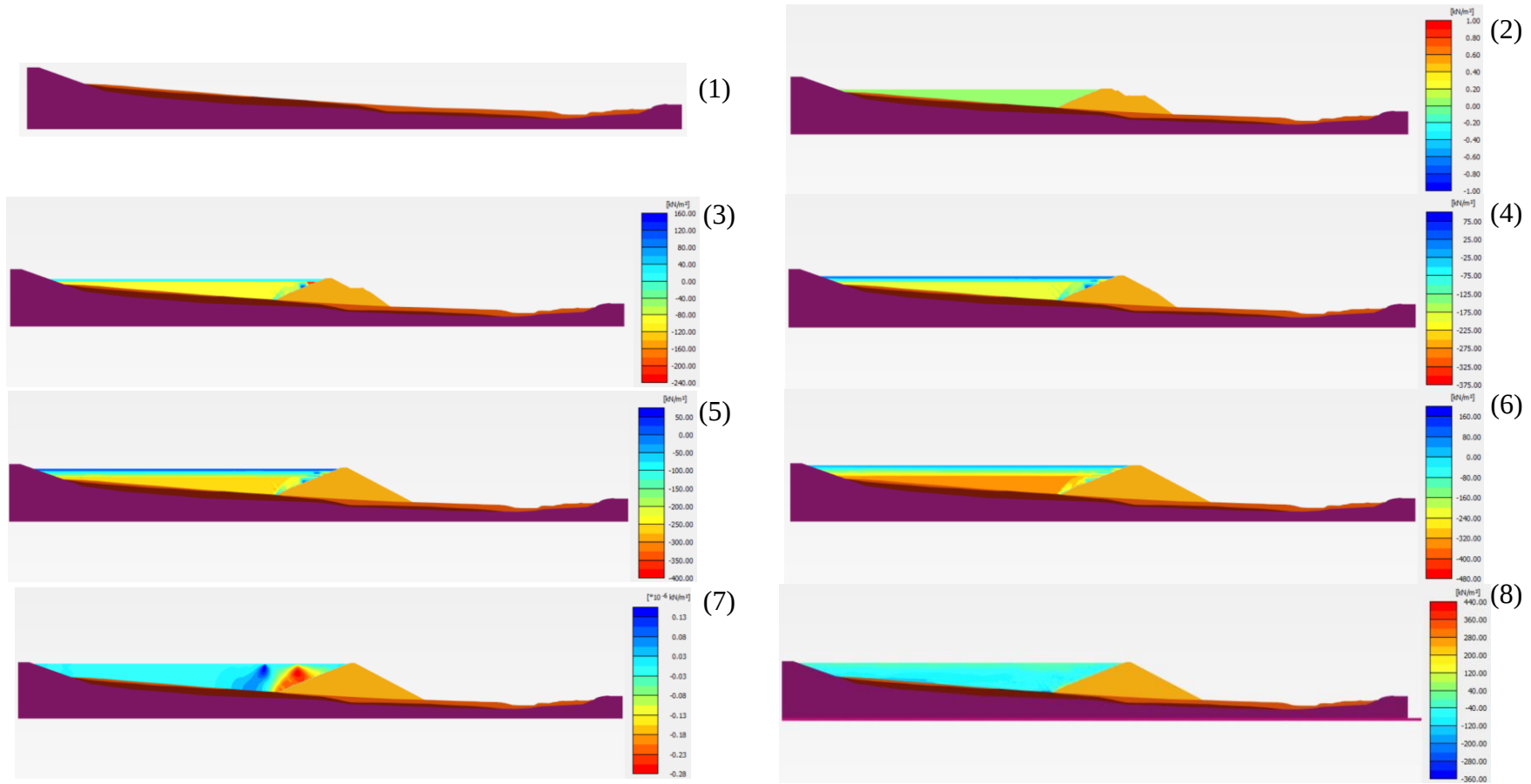


Figura XIV-3: Exceso de presión de poros Plaxis2D (MC): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo

XV. ANEXO D: RESULTADOS TENSIONES-EXCESO DE PRESIONES DE POROS PLAXIS2D (HSS)

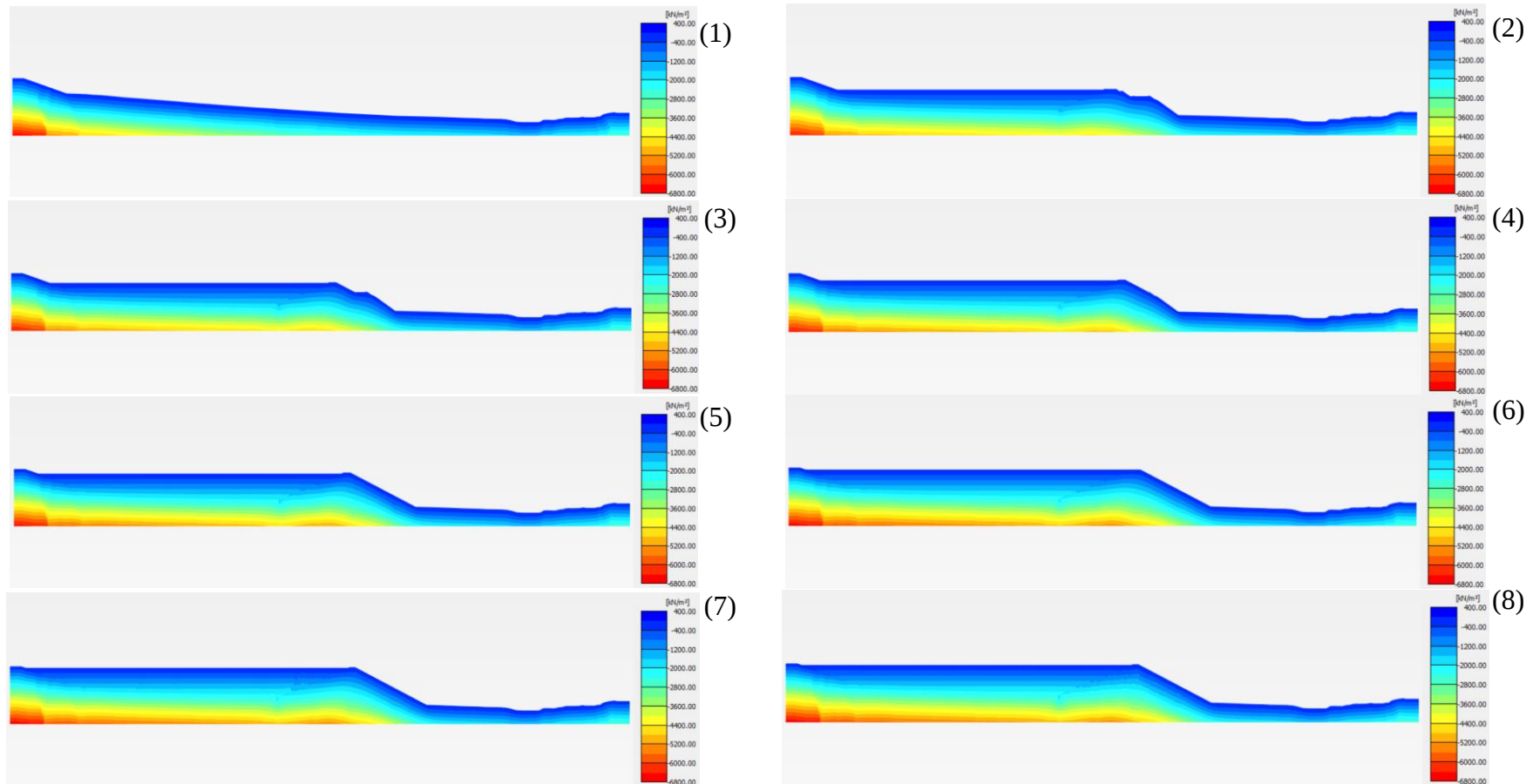


Figura XV-1: Tensiones totales verticales Plaxis2D (HSS): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo

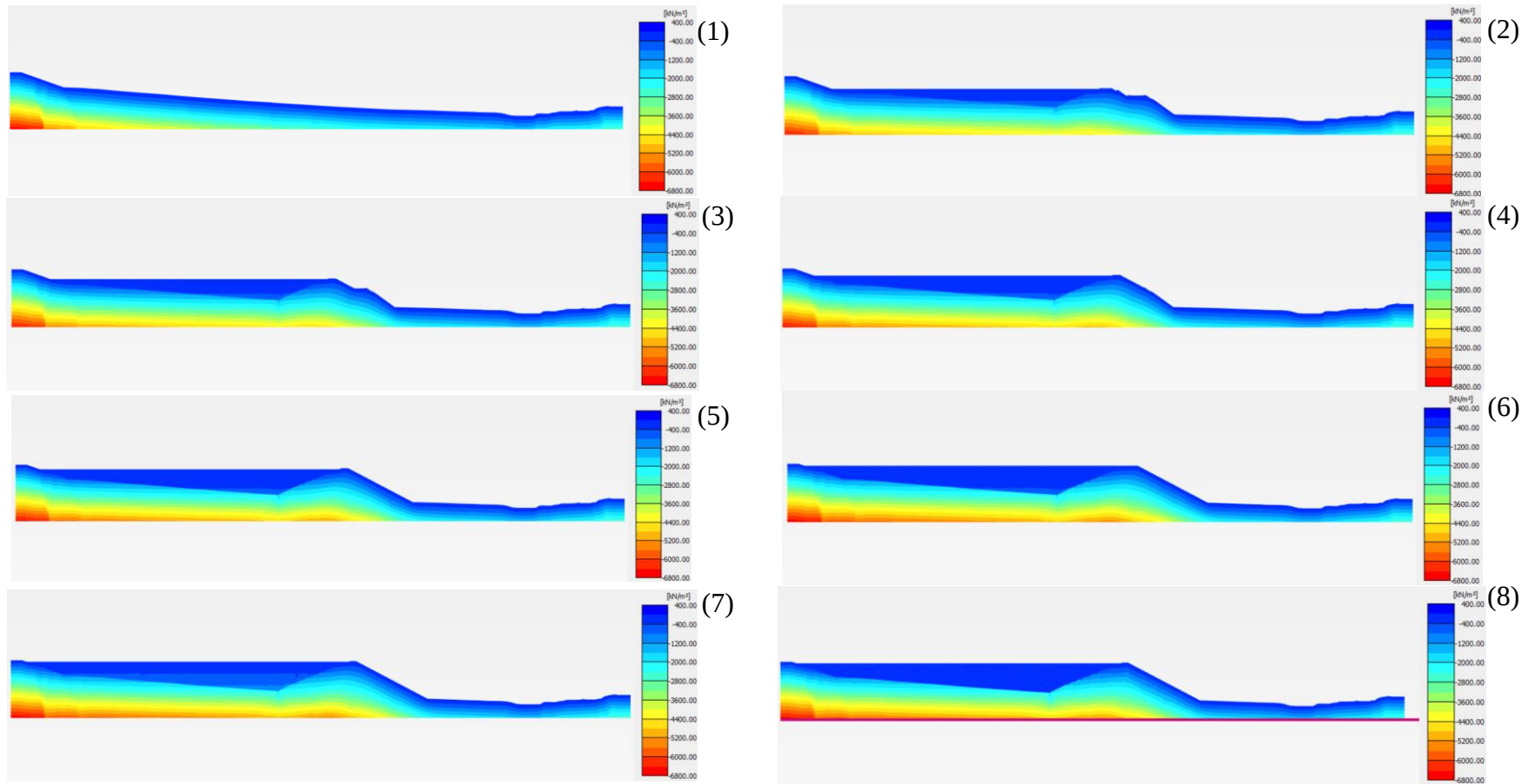


Figura XV-2: Tensiones efectivas verticales Plaxis2D (HSS): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo

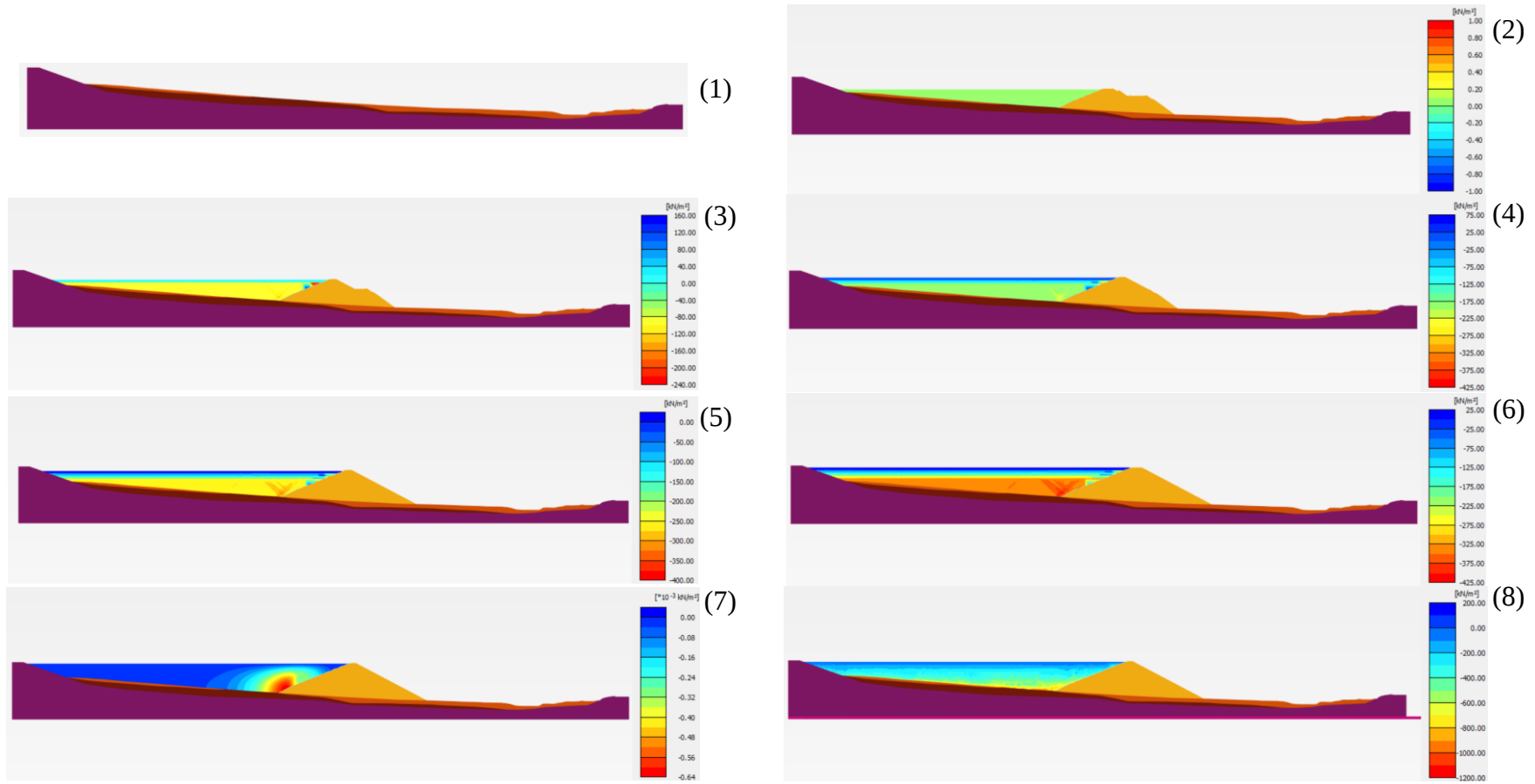


Figura XV-3: Exceso de presión de poros Plaxis2D (HSS): (1): Fase inicial; (2): Fase 1 (existente); (3): Fase 2; (4): Fase 3; (5): Fase 4; (6): Fase 5; (7): Fase de consolidación (antes del sismo); (8): Fase final sismo