



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

# **EFFECTO NUMÉRICO DE LA INCORPORACIÓN DEL SISMO VERTICAL EN ANÁLISIS TENSIÓN- DEFORMACIÓN DE UN DEPÓSITO DE RELAVES**

Memoria de Título presentada por

**Rodrigo Enrique Maluenda Alvarez**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

Profesor Guía  
Cristian Monje

Diciembre de 2025



## CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

### 1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

**Tipo de monografía (marcar una opción):**  Memoria o trabajo de título  Tesis de Postgrado

**Título del trabajo:** Efecto numérico de la incorporación del sismo vertical en análisis-tensión deformación de un depósito de relaves

**Nombre del candidato(a):** Rodrigo Enrique Maluenda Alvarez

**Carrera / Grado:** Ingeniería Civil

**Campus:** San Joaquín **Departamento:** Obras Civiles

### 2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, CRISTIAN MARCELO MONJE ROBLES, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

### 3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

6 meses  12 meses  2 años  3 años  5 años  10 años

**Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):**


---

---

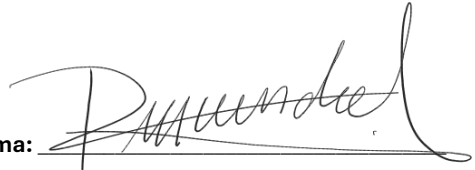
---

### 4.- FIRMAS

**Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:**

Fecha: 30/03/2026 Firma: 

**Estudiante o Candidato(a):**

Fecha: 30/03/2026 Firma: 

*Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.*

# EFFECTO NUMÉRICO DE LA INCORPORACIÓN DEL SISMO VERTICAL EN ANÁLISIS TENSION-DEFORMACIÓN DE UN DEPÓSITO DE RELAVES

Rodrigo Maluenda<sup>1</sup>, Cristian Monje<sup>2</sup>, Sergio Carrasco<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile

<sup>2</sup>WSP, Chile

## Resumen

En la práctica geotécnica chilena el análisis sísmico de los depósitos de relaves se realiza usualmente con la componente horizontal del sismo, desmereciendo el aporte que podría generar la componente vertical, aun cuando algunos registros nacionales la componente vertical alcanza amplitudes comparables o superiores. Esto genera la discusión sobre si la componente vertical se debe incorporar en los análisis de deformaciones.

En este estudio se desarrolló un modelo numérico en FLAC2D para una sección bidimensional de 80 metros de altura de un depósito de relaves construido aguas abajo, con el relave completamente saturado, se llevaron a cabo análisis tensión-deformación en condición no drenada para el relave particularmente, implementando un modelo constitutivo que permite generar exceso de presión de poros. Se aplicaron registros sísmicos reales (Maule 2010, Illapel 2015, Tarapacá 2005) dos de fuente interplaca y uno intraplaca, además de un sismo máximo creíble (SMC) de fuente sismogénica de tipo interplaca. Para cada evento sísmico se evaluaron 2 casos de análisis: el primero considerando solamente el registro horizontal y el segundo con el registro horizontal y vertical actuando es simultaneo.

Los resultados muestran que la zona crítica es el talud aguas abajo, donde se concentran los asentamientos y desplazamientos mayores, el mecanismo de falla es similar en todos los casos, pero para los sismos sintéticos tiene a aumentar la superficie de falla del talud debido a la gran sollicitación que representa un sismo máximo creíble, para todos los casos de igual manera al incorporar la componente vertical aumenta el exceso de presión de poros en el material de relave, debido a la sollicitación de las ondas P. No obstante, hubo casos puntuales donde los desplazamientos o asentamientos fueron menores al incorporar la componente vertical al análisis, lo que indica que la respuesta depende tanto del contenido espectral del sismo como la sincronía de los registros.

La componente vertical del sismo puede ser relevante en el análisis, pero su efecto no es universal ni monotónico. Por lo que su incorporación debe realizarse bajo estricta revisión y consideración ya que depende de la consideración de severidad del escenario sísmico, fase entre componentes y elementos saturados del modelo.

Palabras claves: Relaves, modelación, sismos.

## 1 Introducción

Los depósitos de relaves son estructuras en la industria minera diseñada para almacenar relaves generados durante los procesos para la obtención de mineral. En Chile existen actualmente 836 depósitos y tranque de relaves de los cuales 129 se encuentran activos y el resto está inactivo o abandonado según el catastro realizado por SERNAGEOMIN (2025). Teniendo en cuenta el contexto sísmico nacional se suelen tener eventos sísmicos de gran magnitud (Poblete, 2017) siendo el sismo del Maule 2010 de los más actuales, este evento causó que 4 depósitos de relaves fallaran (Veta del Agua, Chancón, Bellavista y Las Palmas), el fallo del tranque Las Palmas fue debido probablemente a la licuefacción de la parte inferior del muro (Hernandez, 2021) causando la muerte de 4 personas (Valenzuela, 2016) y un desplazamiento cercano a 231.660 metros cúbicos de material de relave (Moss et al., 2019). Por otra parte, uno de los fallos más significativos fue el del tranque El Cobre en la V región en 1965 debido al terremoto de la Ligua de 7,5 grados en la escala Richter, esta falla del tranque de relave ocasionó la muerte de 250 personas y liberando 1.500.000 metros cúbicos de relave (Calabrán, 2009).

La práctica geotécnica chilena realiza los análisis de estabilidad en base al Peak Ground Acceleration (PGA) horizontal del sismo, sin considerar el efecto que podría generar la componente vertical del sismo al análisis (Morales et al., 2022). En Chile debido al mecanismo de falla de las placas tectónicas que se produce suele generar sismos con desplazamiento vertical importante (Poblete, 2017) como en el terremoto del Maule 2010 se tienen que las componentes verticales son similares e incluso superiores al PGA horizontal, ocurriendo que en la estación de Llolleo la componente vertical es mayor a la horizontal (Saragoni & Ruiz, 2012). Esto genera la discusión sobre si, al considerar la componente vertical del sismo en el análisis de estabilidad, los desplazamientos cambiarán de manera considerable en comparación con el análisis que se realiza actualmente.

Un estudio reciente de Morales et al. (2022) investigó la relación entre  $K_v/K_h$  y el impacto que tiene para un análisis de equilibrio límite en condiciones pseudo-estáticas exigido por el Decreto Supremo N°248, que cabe mencionar que no obliga evaluar la componente vertical dentro del análisis. El estudio en cuestión fue de analizar si cambia el factor de seguridad en un depósito de relaves al considerar la componente vertical del sismo, obteniendo como resultado que dependiendo del sentido de  $K_v$  este factor aumentaría o bien disminuiría, o sea si  $K_v$  va en sentido de la gravedad este factor aumentará caso contrario a que si  $K_v$  tiene sentido contrario a la gravedad, siendo esto consecuente con lo obtenido por Sahoo & Shukla (2021) para un talud cohesivo-friccional sometido a los efectos de la carga vertical de un sismo. Cabe destacar que un factor importante en el estudio mencionado anteriormente de Morales et al. (2022), es que su modelo considera que el muro y el material de relave toma un comportamiento drenado lo cual no es lo que se estipula en la práctica de ingeniería porque debajo del nivel freático en el escenario no drenado el material puede desarrollar presión de poros o bien succión dependiendo si el material tiene comportamiento contractivo o dilatante cuando se ve solicitado sísmicamente, aclarando así que ese estudio es el primer paso para que se siga desarrollando el estudio.

Desde una perspectiva tensión-deformación, existen estudios que han abordado la respuesta sísmica de un depósito de relaves mediante análisis dinámicos no lineales, permitiendo estimar desplazamientos permanentes y evolución de presión de poros en materiales saturados bajo condición no drenada (Cerna-Díaz et al., 2023). Sin embargo, en este tipo de análisis no siempre incorpora la componente vertical del sismo, ya que en la práctica es común concentrarse en la componente horizontal. Estudios sobre este tema han demostrado que la inclusión simultánea de la componente vertical puede modificar la respuesta en cuanto a deformaciones, incrementos de asentamientos en el coronamiento del muro y los desplazamientos máximos respecto de considerar solo la componente horizontal (Lanzo et al., 2015). En este contexto, es pertinente evaluar el efecto de incorporar la componente vertical en el análisis dinámico tensión-deformación de un depósito de relaves, comparando el caso solo con el registro horizontal con el caso de registro horizontal y vertical actuando en simultáneo.

A partir de estos antecedentes, este trabajo desarrolla un modelo numérico bidimensional de un depósito de relaves utilizando el software de diferencias finitas FLAC2D para un análisis tensión-deformación, estudiando el comportamiento sísmico al comparar la respuesta ante distintos escenarios, los cuales son aplicar solamente al análisis el registro horizontal y el otro caso considera el registro horizontal y vertical en simultáneo, tanto en sismos reales como sintéticos. Para cada escenario se analizan: desplazamientos en el coronamiento, deformaciones de corte, exceso de presión de poros en materiales saturados con comportamiento no drenado y amplificación dinámica medida en el coronamiento del muro, este análisis estudió la propagación de onda de corte y de compresión en materiales saturados y secos, destacando que este estudio considerará el depósito en la situación más desfavorable con el relave completamente saturado.

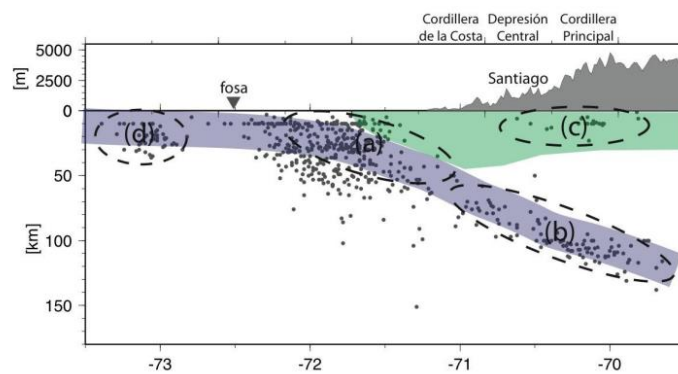
## **2 Marco teórico**

El marco teórico presenta los conceptos para la realización del análisis tensión-deformación en un depósito de relaves.

### **2.1 Contexto sísmico**

En Chile predominan sismos de origen interplaca como se presenta en la zona (a) de la Figura 1, producidos cuando el esfuerzo compresivo horizontal neto en la zona de acoplamiento entre la placa de Nazca y Sudamericana supera al acoplamiento mecánico que traba el movimiento de estas. Los sismos son de tipo compresionales con mecanismo de falla inversa, estos eventos suelen tener una gran magnitud y también está asociado un desplazamiento vertical importante (Poblete, 2017). Un ejemplo reciente es el sismo del Maule de 2010 ( $M_w = 8,8$ ) siendo el segundo de mayor magnitud registrado con instrumentos a nivel nacional y dentro de los diez más fuertes del mundo en cuanto a magnitud (Contreras y Winkler, 2013), Este evento presentó también altos valores de aceleración vertical, registrándose una aceleración máxima de 0,7 g en la estación de Llolleo, incluso mayor que la aceleración horizontal en dicha estación (Saragoni y Ruiz, 2012). Se observan a su vez, sismos de origen intraplaca (b) generados a raíz de una ruptura dentro de la placa de Nazca, alcanzando magnitudes  $M_w$  intermedias-altas, aunque menores a los sismos interplaca.

En menor medida, se observan sismos de origen cortical (c), caracterizados por su baja profundidad y están asociados a fallas en la corteza de la placa Sudamericana. Por último, eventos de tipo outer-rise (d), localizados en la placa oceánica cercana a la fosa, relacionados principalmente por flexión o falla de la placa de Nazca previo a la zona de subducción.



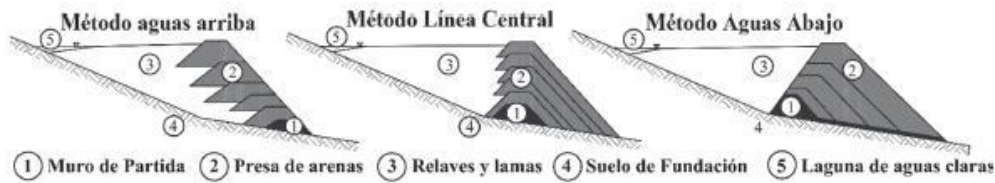
**Figura 1: Tipos de sismos** <https://www.csn.uchile.cl/tipos-de-sismos-chile>.

## 2.2 Depósitos de relaves

Según los datos de la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) (2025), la producción promedio de cobre es del orden de 440 mil toneladas métricas mensuales. En operación con concentración por flotación, solo una fracción menor del material extraído (del orden de 1%) corresponde a mineral de interés económico y tras el proceso, se obtiene un concentrado y el material remanente corresponde a relave (mezcla de sólidos finos y agua) los cuales según el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) (2025) se depositan aproximadamente 537 millones de toneladas anuales. En cambio, en operaciones con lixiviación en pilas el residuo típico corresponde a ripios, no a relaves. En términos de disposición, en Chile se distinguen tipologías convencionales como tranques y embalses y alternativas de mayor deshidratación como depósitos de relaves espesados, en pasta y filtrados.

### 2.2.1 Métodos constructivos

Existen tres métodos de crecimiento de muros: aguas arriba, eje central y aguas abajo (Figura 2). El método aguas arriba está prohibido en Chile según el Decreto Supremo N°248 debido a la vulnerabilidad de la presa a la licuefacción del material almacenado (Figueroa et al., 2017), el método de aguas abajo consta primeramente de la construcción del muro de partida y a medida que se va llenando se van haciendo las siguientes partes del muro lo que implica un mayor volumen de material y por ende, un prisma resistente de mayor ancho base aumentando su estabilidad global. Por último, el método de eje central también parte con el muro de partida pero este a medida que se va depositando y exista necesidad de seguir creciendo se va construyendo el muro siguiendo el mismo plano vertical inicial de la berma de coronamiento del muro de partida, en sí este muro necesita menor cantidad de material que el de aguas abajo permite lograr muros lo suficientemente estables.



**Figura 2: Secciones de crecimientos (Figuroa et al., 2017).**

### 2.2.2 Relaves no convencionales

En los últimos años la minería nacional ha incorporado nuevas tecnologías para la disposición del relave para así mejorar la eficiencia en el uso del agua mediante relaves con mayor grado de deshidratación:

- Relaves espesados: Relaves sometidos a sedimentación/espesamiento previo para aumentar la concentración de sólidos y reducir el agua.
- Relaves filtrados: Relaves sometidos a filtración antes de su disposición, con humedades típicamente inferiores al 20%.
- Relaves en pasta: Estado intermedio entre espesados y filtrados, con mayor consistencia y menor contenido de agua que un relave en pulpa.

### 2.3 Análisis de estabilidad

El análisis de estabilidad del muro tiene por objetivo evaluar la seguridad frente a falla global, determinando un factor de seguridad (FS). Dentro del marco normativo chileno para depósitos de relaves el Decreto Supremo N° 248 establece un valor mínimo de 1,2 bajo condiciones pseudoestáticas.

#### 2.3.1 Método equilibrio limite

El método de equilibrio limite evalúa el FS imponiendo el equilibrio estático de una masa potencialmente inestable por sobre una superficie de desplazamiento asumida, usualmente se divide el estrato en dovelas y se resuelve el equilibrio de fuerzas, obteniendo el FS asociado a la superficie evaluada. La superficie crítica corresponde a aquella que cuente con el menor factor de seguridad entre todas las superficies analizadas.

#### 2.3.2 Método de reducción de resistencia (SSR/SRF)

El factor de seguridad también puede estimarse mediante el método de reducción de resistencia. En este enfoque aplicando un factor de reducción SRF se disminuyen gradualmente los parámetros de resistencia al corte del material (cohesión y ángulo de fricción interna) hasta alcanzar la inestabilidad, donde el factor crítico (SRF) se interpreta como el factor de seguridad global (FS).

### 2.4 Análisis tensión-deformación

El análisis tensión-deformación permite evaluar la respuesta del depósito en términos de tensiones, deformaciones y desplazamientos, tanto para condiciones estáticas como dinámicas. En base al Decreto Supremo N°248 para tranques grandes (mayores a 15 metros de altura) se debe realizar este tipo de análisis. A diferencia del análisis de estabilidad, este enfoque entrega directamente variables como deformaciones de corte, desplazamientos, presiones de poros cuando se modelan materiales saturados.

Para este tipo de evaluaciones se emplean modelos numéricos, comúnmente basados en elementos finitos o diferencias finitas. En esta memoria se utiliza FLAC2D (Fast Lagrangian Analysis of Continua), software basado en diferencia finitas que permite abordar la no linealidad constitutiva, grandes deformaciones y procesos de falla progresiva.

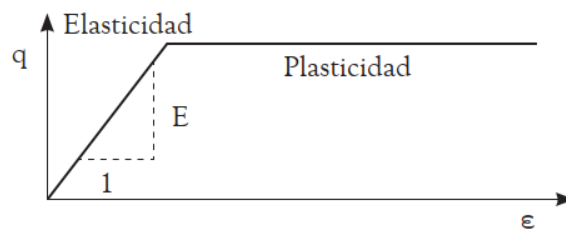
En cuanto al análisis dinámico, en la presente memoria realizara un análisis de tipo tiempo-historia, insertando tensiones a partir del registro de velocidades en la base del modelo y calculando la respuesta transitoria del modelo. En FLAC2D, esta respuesta se obtiene resolviendo ecuaciones diferenciales del movimiento mediante un esquema de diferencias finitas. (Panés, 2021)

## 2.5 Modelos constitutivos

Un modelo constitutivo corresponde a una descripción matemática del comportamiento físico de un sólido, formulada sobre un material idealizado que resulta de introducir hipótesis simplificadoras respecto a un sólido real. En este sentido, la formulación constitutiva representa una realidad aproximada y dependiente de los supuestos adoptados, por lo cual su utilización debe tener en cuenta dichas restricciones. (Pérez, 2005)

### 2.5.1 Mohr coulomb

El modelo constitutivo Mohr-coulomb, es considerado como una aproximación de primer orden al comportamiento no lineal del suelo (Nieto et al., 2019). Es de tipo elasto-plástico perfecto (Figura 3), el cual puede reproducir la acumulación de deformaciones irreversibles sin la disipación de energía en el rango elástico. Bajo carga cíclica, este tipo de formulación no captura disipación de energía por histéresis ni la degradación gradual de rigidez con el aumento de las deformaciones corte.



**Figura 3: Formulación del modelo elasto-plástico perfecto (Mohr-coulomb) (Nieto et al., 2019)**

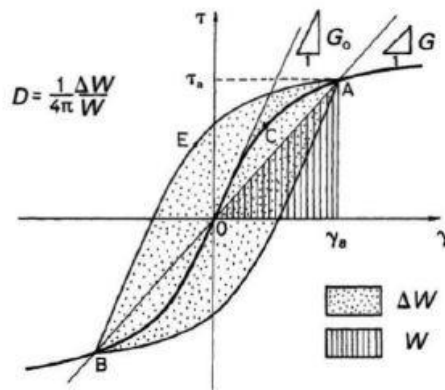
Se define esfuerzo desviador ( $q$ ), módulo de deformación ( $E$ ) y la deformación unitaria ( $\epsilon$ )

### 2.5.2 Mohr-coulomb con amortiguamiento histéretico

Con el fin de representar la degradación de rigidez y la disipación de energía bajo carga dinámica, el modelo constitutivo Mohr-coulomb se complementa con amortiguamiento histéretico, el cual consiste en recrear ciclos de histéresis (Figura 4) caracterizados por medio de las curvas de degradación del módulo de corte. Específicamente para el caso de la implementación en FLAC2D se incluye con la función interna de sigmoidal-3 la cual ajusta la curva  $G/G_{max}$  según la siguiente expresión.

$$\frac{G}{G_{max}} = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{\log_{10}(\gamma) - x_0}{b}\right)} \quad E.1$$

Donde  $a$ ,  $b$  y  $x_0$  representan los parámetros de ajuste,  $G_{max}$  el módulo de corte máximo y  $\gamma$  la deformación angular.



**Figura 4: Curva histéresis (Ishihara, 1996)**

Se define amortiguamiento ( $D$ ), módulo de corte ( $G$ ), módulo de corte secante  $G_0$ , deformación angular ( $\gamma$ ), energía disipada ( $\Delta W$ ) y energía elástica almacenada ( $W$ ).

### 2.5.3 PM4Silt 2018

Este modelo constitutivo PM4Silt (Boulanger & Ziotopoulou, 2023) corresponde a un modelo constitutivo complejo desarrollado para representar respuesta monótona y cíclica no drenada en aplicaciones de ingeniería geotécnica sísmica, con énfasis en fenómenos de degradación de rigidez debido a cargas cíclicas, presiones de poros, amortiguamiento histéretico.

El modelo está basado en el marco teórico de Bounding Surface Plasticity Model según lo realizado por Manzari & Dafalias (2004). Cabe destacar que este modelo se compatible con la teoría del estado crítico a través del control de razones de tensiones lo que permite capturar trayectoria de tensiones cíclicas de interés en dinámica de suelos.

Este modelo considera una totalidad de 19 parámetros, donde destacan los parámetros primarios: la resistencia no drenada normalizada por el esfuerzo efectivo, coeficiente del módulo de corte ( $G_0$ ), parámetro de la tasa de contracción ( $h_{po}$ ) y la presión atmosférica para este estudio el presente modelo constitutivo se utiliza solo en el análisis dinámico en FLAC2D para el relave.

## 3 Objetivos

El objetivo general de esta investigación es estudiar la respuesta sísmica de un depósito de relaves al incorporar la componente vertical, en términos de desplazamientos y deformaciones.

Objetivos específicos:

- Desarrollar modelo numérico bidimensional en software de diferencias finitas FLAC2D.
- Estudiar comportamiento y contraste en distintos escenarios.

## 4 Modelación numérica

### 4.1 Descripción del depósito de relaves

#### 4.1.1 Geometría y materiales del modelo

La sección del modelo corresponde a un depósito de relaves con crecimiento aguas abajo. El muro cuenta con una altura de 80 metros de ancho y un coronamiento de 20 metros de ancho, más una revancha de 5 metros, talud aguas abajo se desarrolla con una pendiente 2H:1V implicando una base de 340 metros. El modelo incluye suelo de fundación de espesor de 40 metros sobre la roca basal de ancho 80 metros.

En la Figura 5 se expone gráficamente la sección del muro y en la Figura 6 el modelo para el análisis tensión-deformación.

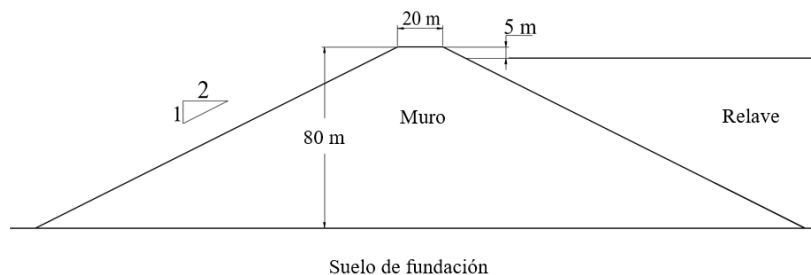
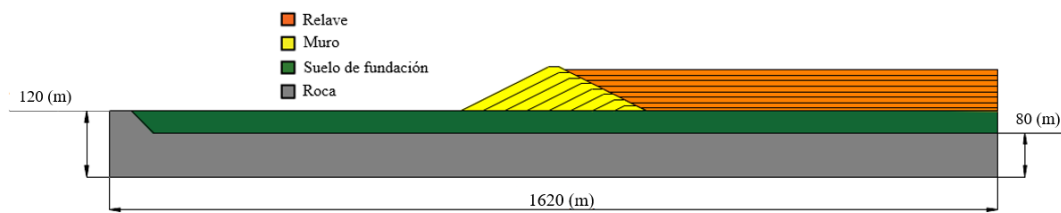


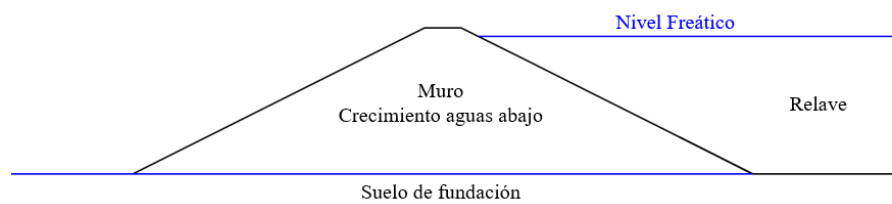
Figura 5: Parámetros geométricos de la sección de análisis.



**Figura 6: Materiales del depósito y descripción constructiva.**

#### 4.1.2 Nivel Freático

El nivel freático adoptado en el modelo satura completamente el relave, mientras que el cuerpo del muro se modela de manera impermeable, representado en la Figura 7.



**Figura 7: Nivel Freático de la sección.**

#### 4.2 Impacto de la componente vertical en análisis equilibrio limite

Se realizó un análisis de equilibrio limite en el software GeoStudio, para exponer el impacto que tiene la componente vertical en estos tipos de análisis. Las propiedades geotécnicas del modelo (Tabla 1) se definieron a partir de información confidencial proporcionada por WSP, correspondiente a un depósito de relaves en el norte de Chile. Cabe destacar que la roca se modela de carácter impenetrable.

**Tabla 1: Modelo constitutivo y propiedades utilizadas en el análisis de equilibrio limite en el depósito.**

	Unid.	Suelo de fundación	Muro	Relave
Modelo constitutivo	-	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	SHANSEP
Peso unitario	kN/m <sup>3</sup>	18,6	19,0	15,8
Cohesión efectiva	kPa	0	0	0
Ángulo de fricción efectivo	°	39	39	32
Resistencia mínima al corte	kPa	-	-	0
$S_u/\sigma'_v$ residual	-	-	-	0,09

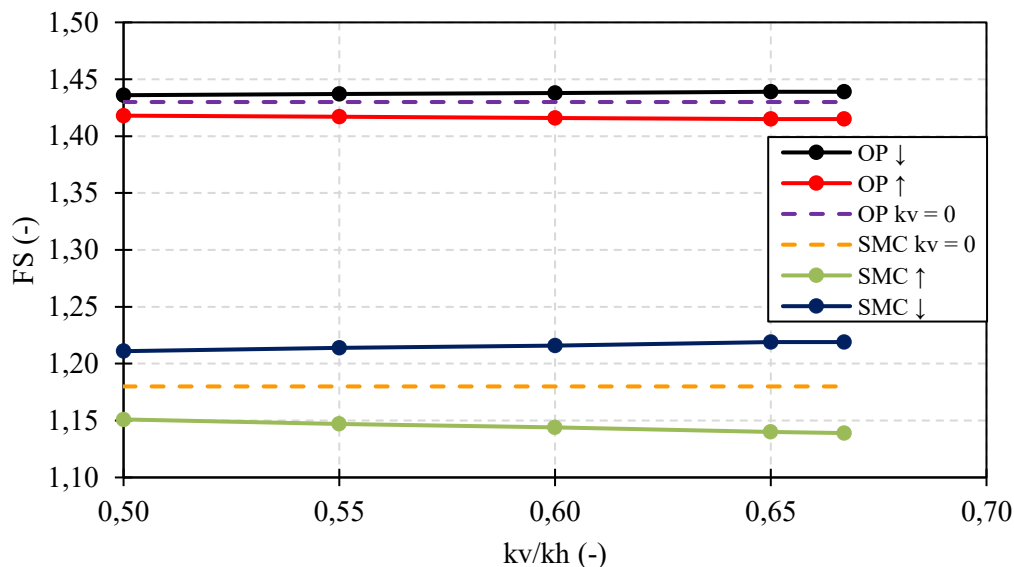
Los coeficientes sísmicos presentados en la Tabla 2 fueron proporcionados de un proyecto de carácter confidencial de WSP

**Tabla 2: coeficientes sísmicos utilizados para el análisis de equilibrio limite.**

Sismo	Kh (-)
Operacional (OP)	0,08
Máximo creíble (SMC)	0,17

En la práctica, se recomienda considerar la componente vertical como una fracción de la componente horizontal, adoptando valores entre 1/2 y 2/3 (Kehoe & Attalla, 2000; Wu & Marshall, 2017). Por este

motivo, en la Figura 8 se expone la variación del factor de seguridad al modificar la componente vertical en ese rango y en la Tabla 3 se resume el escenario más conservador.



**Figura 8: Factor de seguridad en función de la razón entre kv y kh.**

**Tabla 3: Resultados para kv=2/3kh.**

	OP	SMC
FS kv=0	1,43	1,18
FS kv ↓	1,44	1,22
FS kv ↑	1,42	1,14
Dif. (%) ↓	0,7	3,1
Dif. (%) ↑	1,1	3,8

Los resultados arrojan que el factor de seguridad depende del sentido en el cual se aplique esta componente vertical. Este factor aumenta cuando el sentido es a favor de la gravedad, llegando a aumentar en un 0,7% para un sismo operacional y un 3,1% para un sismo máximo creíble cuando se toma el caso más desfavorable de kv=2/3kh, esto se puede interpretar como una compresión adicional aumentando el confinamiento del muro y caso contrario, la componente tiene dirección contraria a la gravedad el factor tiende a disminuir en un 1,1 y 3,8% para sismo operacional y máximo creíble respectivamente cuando kv=2/3kh, estos resultados reflejan una reducción del confinamiento del muro. Siendo esto es consecuentes con el estudio realizado por Morales et al. (2022), cabe señalar que el caso con aceleración contraria a la gravedad constituye una condición conservadora dado que el enfoque de este análisis asume implícitamente que la componente horizontal y vertical actúan en fase, lo cual no ocurre en registros reales. Si bien en este análisis se adopta una resistencia no drenada residual para representar simplificada el estado degradado del relave, el enfoque pseudoestático no reproduce la evolución de presión de poros, ni deformaciones permanentes inducidas por la sollicitación sísmica. En consecuencia, los resultados se interpretan como primera aproximación de análisis y se complementa con un análisis tensión-deformación

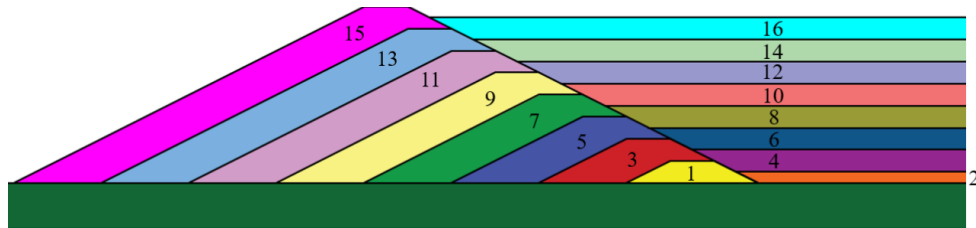
### 4.3 Modelo tensión deformación (FLAC2D)

#### 4.3.1 Análisis estático

El análisis estático consiste en la simulación del crecimiento del muro con la finalidad de tener un estado tensional lo más apegado a la realidad para la condición final del depósito. Se utilizó el siguiente procedimiento:

- Desarrollo de malla de diferencias finitas en función de la geometría del depósito de relaves.
- Aplicación de condiciones de bordes en el depósito, restringiendo desplazamientos tanto verticales como horizontales en la base del modelo y también impedir desplazamientos horizontales en los bordes laterales.
- Asignar parámetros de los modelos constitutivos al suelo de fundación y luego resolver el modelo de roca y suelo de fundación hasta alcanzar el equilibrio.
- Inicializar los desplazamientos y velocidades en 0 en la fundación.
- Simular la construcción del depósito por etapas a su vez actualizando los parámetros dependientes del esfuerzo medio efectivo ( $p'$ ).

En la Figura 9, se presenta cómo se modelaron las etapas constructivas en el modelo.



**Figura 9: Descripción de etapas constructivas.**

#### 4.3.2 Análisis dinámico

En el análisis dinámico se utilizó el siguiente procedimiento:

- Inicializar los desplazamientos obtenidos del análisis estático.
- Asignar parámetros de modelos constitutivos dinámicos a utilizar para cada material.
- Asignar condiciones de borde para el análisis, siendo estos la condición de campo libre en los bordes del modelo y borde absorbente en la base.
- Definir puntos de control en zonas de interés para registro de desplazamientos tanto verticales como horizontales y también las aceleraciones en los mismos casos.
- Aplicar registros sísmicos al depósito.
- Para el análisis de este trabajo se considerará primeramente la corrida del sismo con el registro horizontal, se obtendrán desplazamientos y deformaciones. Luego se toma en simultáneo el registro horizontal y vertical del sismo obteniendo de igual manera desplazamientos y deformaciones.

### 4.4 Modelos constitutivos

En la Tabla 4, se presentan los modelos constitutivos a utilizar dentro de la modelación para condiciones estáticas y dinámicas.

**Tabla 4: Modelos constitutivos para cada material y tipo de análisis.**

Material	Análisis Estático	Análisis Dinámico
Roca	Elástico	Elástico con Amortiguamiento de Rayleigh
Suelo de Fundación	Mohr - Coulomb	Mohr - Coulomb con Amortiguamiento Histerético
Muro	Mohr - Coulomb	Mohr - Coulomb con Amortiguamiento Histerético
Relave	Mohr - Coulomb	PM4Silt

#### 4.5 Propiedades de los materiales

Las propiedades expuestas a continuación exceptuando las utilizadas en el relave en su análisis dinámico, son de carácter confidencial proporcionadas por WSP. Cabe destacar que para la Roca el módulo de corte fue calculado a partir de la siguiente expresión:

$$G_{m\acute{a}x} = \rho * V_s^2 \quad E.2$$

Se define módulo de corte máximo ( $G_{m\acute{a}x}$ ), densidad ( $\rho$ ) y velocidad de onda de corte ( $V_s$ ).

Es importante señalar que el módulo de corte máximo ( $G_{m\acute{a}x}$ ) representa la rigidez del material medida en el régimen de muy pequeñas deformaciones (Very small strain) Donde el comportamiento es prácticamente lineal y la rigidez presenta su valor máximo. Sin embargo, en un análisis estático las solicitaciones asociadas a peso propio, etapas constructivas, entre otras. Implican deformaciones mayores que aquellas bajo las que determina  $G_{m\acute{a}x}$ . En consecuencia, tal como se observa en la Figura 10, el módulo tiende a degradarse a medida que aumentan las deformaciones. Por lo tanto, utilizar el módulo de corte máximo implica una sobreestimación de la rigidez, motivo por el cual se adopta un módulo reducido respecto a  $G_{m\acute{a}x}$ , coherente con los niveles de deformaciones esperados en la condición estática.

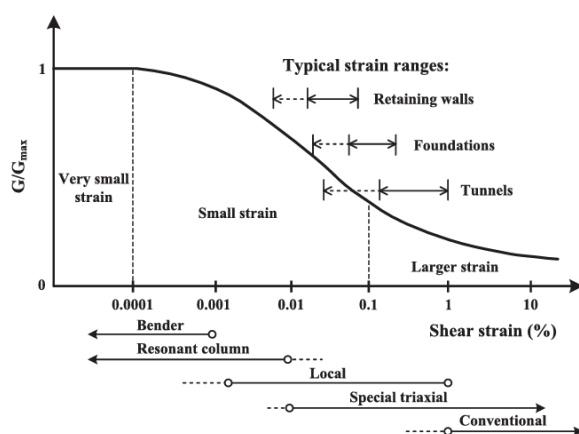


Figura 10: Curva normalizada de degradación de rigidez (Likitlersuan et al., 2013)

##### 4.5.1 Roca

La Tabla 5 expone los parámetros implementados de la roca basal al aplicar modelo elástico, para sus análisis estáticos y dinámicos.

Tabla 5: Propiedades Geotécnicas de modelo Elástico, para la roca.

Propiedad	Unid.	Análisis Estático	Análisis Dinámico
Densidad seca, $\rho$	t/m <sup>3</sup>	2,5	2,5
Velocidad de Onda de Corte	m/s	1.200	1.200
Coefficiente de Poisson	-	0,25	0,25
Módulo de Corte Máximo	kPa	3,60 x 10 <sup>6</sup>	3,60 x 10 <sup>6</sup>
Módulo de Corte, G	kPa	3,42 x 10 <sup>6</sup>	3,60 x 10 <sup>6</sup>
Módulo Volumétrico, B	kPa	5,70 x 10 <sup>6</sup>	6,00 x 10 <sup>6</sup>

##### 4.5.2 Suelo de fundación

En la Tabla 6 se presenta los parámetros geotécnicos asociados al suelo de fundación obtenidos de un proyecto de un depósito de relaves en el norte de Chile, cabe destacar que para los parámetros dinámicos se considera amortiguamiento histerético con la función de FLAC2D sigmoidal-3 con amortiguamiento de referencia los resultados propuestos para gravas de Rollins et al. (1998) mediante un proceso iterativo

buscando calibrar la curva de degradación del módulo de rigidez manteniendo la concordancia con la curva de amortiguamiento. El ajuste se expone en el Anexo 7.1.1.

**Tabla 6: Propiedades geotécnicas para el suelo de fundación, en su análisis estático y dinámico.**

Propiedad	Unid.	Análisis Estático	Análisis Dinámico
Densidad seca, $\rho$	t/m <sup>3</sup>	1,86	1,86
Velocidad de Onda de Corte	m/s	800	800
Coefficiente de Poisson	-	0,30	0,30
Módulo de Corte Máximo	kPa	$1.270,0 * Pa * (p'/Pa)^{0,84}$	$1.270,0 * Pa * (p'/Pa)^{0,84}$
Módulo de Corte, G	kPa	$127,0 * Pa * (p'/Pa)^{0,84}$	$1.270,0 * Pa * (p'/Pa)^{0,84}$
Cohesión, c	kPa	0	0
Porosidad	-	0,3	0,3
Saturación	-	0,789	0,789
Ángulo de fricción interna	°	39	39
Parámetro de Ajuste Función Sigmoidal, a	-	-	1,05
Parámetro de Ajuste Función Sigmoidal, b	-	-	-0,63
Parámetro de Ajuste Función Sigmoidal, $x_0$	-	-	-1,33

Donde  $p'$  es el esfuerzo medio efectivo.

#### 4.5.3 Muro

En la Tabla 7, se reportan las propiedades para el muro de empréstito de un depósito de relaves en el norte de Chile. Cabe destacar que los parámetros para el amortiguamiento histeréticos se realizaron ajustando las curvas para Rockfill de Gazetas et al. (1992), a través del mismo proceso iterativo mencionado para el suelo de fundación, el ajuste se incorpora en el anexo 7.1.2.

**Tabla 7: Propiedades geotécnicas para el muro, en su análisis estático y dinámico.**

Propiedad	Unid.	Análisis Estático	Análisis Dinámico
Densidad seca, $\rho$	t/m <sup>3</sup>	1,90	1,90
Coefficiente de Poisson	-	0,30	0,30
Módulo de Corte Máximo	kPa	$2.987,0 * Pa * (p'/Pa)^{0,42}$	$2.987,0 * Pa * (p'/Pa)^{0,42}$
Módulo de Corte, G	kPa	$181,0 * Pa * (p'/Pa)^{0,72}$	$2.987,0 * Pa * (p'/Pa)^{0,42}$
Cohesión, c	kPa	0	0
Porosidad	-	0,3	0,3
Saturación	-	0,36	0,36
Ángulo de fricción interna	°	39	39
Parámetro de Ajuste Función Sigmoidal, a	-	-	1,05
Parámetro de Ajuste Función Sigmoidal, b	-	-	-0,65
Parámetro de Ajuste Función Sigmoidal, $x_0$	-	-	-1,63

Considerando  $Pa = 100$  kPa y  $p'$  como el esfuerzo medio efectivo.

#### 4.5.4 Relave

Los parámetros considerados para relaves espesados en su condición estática son obtenidos de un proyecto de la empresa, expuesto en la Tabla 8.

**Tabla 8: Propiedades geotécnicas para el Relave, en su análisis estático.**

Propiedad	Unid.	Análisis Estático
Densidad seca, $\rho$	t/m <sup>3</sup>	1,58
Coefficiente de Poisson	-	0,33
Módulo de Corte, G	kPa	$203,0 \cdot Pa \cdot (p'/Pa)^{0,40}$
Cohesión, c	kPa	0
Porosidad	-	0,43
Saturación	-	0,36
Ángulo de fricción interna	°	32

Considerando  $Pa = 100$  kPa y  $p'$  como el esfuerzo medio efectivo.

Para el análisis dinámico se emplea el modelo constitutivo avanzado PM4Silt, los parámetros para la implementación de este modelo son obtenidos de una investigación de relaves espesados de Bellido & Mendoza (2024), cuyas propiedades se presentan en la Tabla 9.

**Tabla 9: Propiedades geotécnicas para el Relave, en su análisis dinámico.**

	Propiedad	Unid.	Análisis Dinámico
Primarias	Coefficiente del Módulo de corte, $G_0$	-	602
	Resistencia No Drenada al Corte en el Estado Crítico, $S_{u,cs}/\sigma'_{vc}$	-	0,134
	Parámetro de la Tasa de Contracción, $h_{po}$	-	8
	Presión atmosférica	kPa	101,3
Secundarias	Relación de Vacíos inicial, $e_0$	-	0,8
	Exponente del Módulo de Corte, $n_G$	-	0,716
	Ángulo de Fricción del Estado Crítico, $\phi_{cv}$	°	33
	Compresibilidad en el espacio e – $\ln p'$ , $\lambda$	-	0,061
	Límite inferior Esfuerzo Medio Efectivo, $r_{u,max}$	-	0,98
	Parámetro Superficie Limite, $n^{b,wet}$	-	0,8
	Parámetro Superficie Limite, $n^{b,dry}$	-	0,5
	Parámetro de la Superficie de Dilatación, $n^d$	-	0,3
	Parámetro de Dilatación, $A_{do}$	-	0,8
	Razón Módulo Plástico, $h_o$	-	0,5
	Término Referido a la Estructura Interna, $Z_{max}$	-	$10 \leq 40(S_u/\sigma'_{vc}) \leq 20$
	Parámetro de Crecimiento de la Estructura Interna, $c_z$	-	100
	Factor de la Tasa de Acumulación de Deformación, $c_\xi$	-	$0,5 \leq (1,2S_u/\sigma'_{vc} + 0,2) \leq 1,3$
	Factor de Degradación del Módulo, $C_{GD}$	-	3
Factor de Módulo Plástico, $C_{kaf}$	-	4	

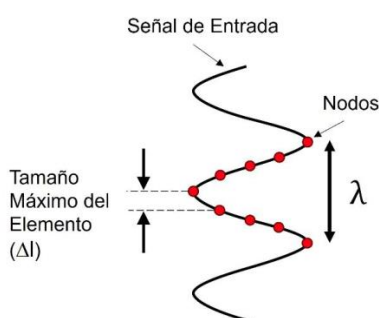
Según el estudio de Bellido & Mendoza (2024), la calibración del modelo constitutivo se realizó mediante ensayos de corte directo simple en un elemento singular siguiendo la recomendación de Boulanger & Ziotopoulou (2023). Se emplearon ensayos de corte cíclicos no drenados con control de deformaciones para calibrar la degradación del módulo de rigidez y el amortiguamiento, utilizando como

referencia las relaciones de Darandeli (2001) y ensayos de corte cíclicos no drenado con control de razón de esfuerzos (esfuerzo de corte normalizado por el esfuerzo vertical efectivo) para calibrar relaves espesados respecto a una razón de corte cíclico (CSR) requerido para alcanzar una deformación de corte de 3,75%.

En este marco, se estimó la resistencia no drenada al corte en estado crítico ( $S_{u,cs}/\sigma'_{vc}$ ) a partir de ensayos triaxiales monotónicos no drenados, coeficiente del módulo de corte ( $G_0$ ) y exponente del módulo de corte ( $n_G$ ) se calcularon desde ensayos de columna resonante y corte torsional, mientras que el ángulo de fricción en del estado crítico ( $\phi_{cv}$ ) y  $\lambda$  se obtuvieron a partir de la línea de estado crítico. Los parámetros restantes a excepción de  $h_{po}$ , adoptaron valores por defecto recomendado por Boulanger & Ziotopoulou (2023). Por parte del  $h_{po}$  se ajustó mediante simulaciones cíclicas no drenadas en FLAC tomando como objetivo las curvas experimentales de resistencia a la licuefacción. Finalmente, se revisó la respuesta esfuerzo-deformación y la trayectoria de esfuerzos para el ajuste de parámetros secundarios, de modo de ajustar a la curva de resistencia a la licuefacción y generar la respuesta de esfuerzo-deformación y exceso de presión de poros observadas experimentalmente. En el anexo 7.2 se encuentra la calibración

#### 4.6 Discretización del continuo

La discretización de la malla depende de la propagación de la sollicitación sísmicas en el rango de frecuencias predominantes del registro de aceleración, según Kuhlmeier & Lysmer (1973) (Figura 11) esta premisa se cumple cuando la subdivisión vertical media del medio continuo es a lo menos 1/8 de la longitud de onda.



**Figura 11: Tamaño máximo de nodos, Kuhlmeier & Lysmer (1973).**

Al asociar la longitud de onda con la frecuencia y velocidad de propagación finalmente queda la siguiente expresión que relaciona la velocidad de onda de corte del material con la frecuencia y tamaño del elemento.

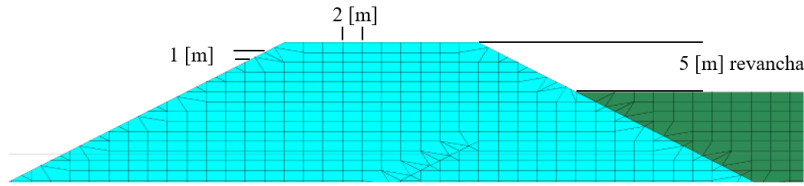
$$f = \frac{v_s}{8 * \Delta l} \quad E.3$$

Considerando una frecuencia de 18 [Hz] debido a que se utilizara un sismo máximo creíble en el estudio, los tamaños máximos para los elementos quedan resumidos en la Tabla 10.

**Tabla 10: Tamaño máximo de los elementos.**

Material	Velocidad onda de corte promedio [m/s]	Tamaño máximo del elemento [m]
Roca	1.200	8,3
Suelo de Fundación	800	5,5
Muro	400	2,7
Relave	300	2,1

La Figura 12, presenta un acercamiento a la malla en la cual se aprecia las distancias horizontales y verticales en el muro.



**Figura 12: Discretización del muro.**

#### 4.7 Sismos

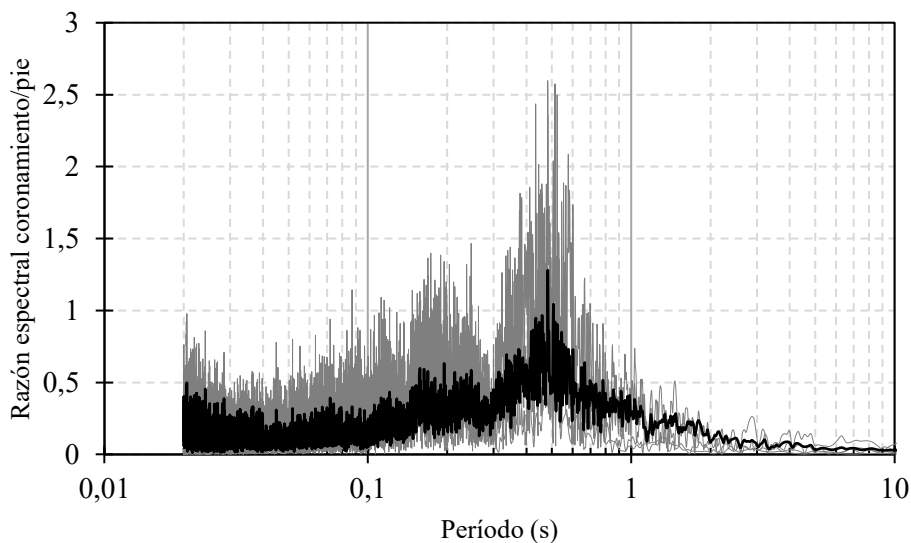
Se analizaron cuatro registros sísmicos: Maule 2010 ( $M_w = 8.8$ ; estación Talca, Renadic), Tarapacá 2005 ( $M_w=7.9$ ; estación Pisagua, Centro Sismológico Nacional), Illapel 2015 ( $M_w = 8.4$ ; estación El Pedregal, Centro Sismológico Nacional) y un sismo máximo creíble (SMC) obtenido de un estudio de amenaza sísmica para un depósito de relaves en el norte de Chile (Tabla 11). En cuanto a los registros horizontales de los sismos de tipo interplaca e intraplaca, se escogió la dirección que tuviera un mayor valor Intensidad de Arias, este criterio privilegia la energía sísmica liberada más que solo el valor peak de aceleración instantáneo que podría representar el PGA. Para el registro vertical del caso de sismo sintético, se utilizó el de la misma fuente sismogénica.

Cabe destacar que cuando se habla de horizontal y vertical se hace referencia al registro de aceleraciones horizontales y verticales correspondientemente.

**Tabla 11: Sismos**

	Unid.	Maule 2010	Tarapacá 2005	Illapel 2015	SMC
Fuente sismogénica	-	Interplaca	Intraplaca	Interplaca	Interplaca
Intensidad de Arias horizontal	cm/s	1.133,06	135,95	361,05	5.474,15
Intensidad de Arias vertical	cm/s	284,73	78,03	199,98	2.359,69
Razón Intensidad de Arias V/H	-	0,25	0,57	0,55	0,43
PGA horizontal	g	0,47	0,35	0,35	0,88
PGA vertical	g	0,22	0,24	0,20	0,59
Razón PGA V/H	-	0,47	0,69	0,57	0,67

En la Figura 13 se presenta el espectro de Fourier para los registros utilizados, destacando la curva promedio.



**Figura 13: Espectro de Fourier de los registros sísmicos.**

Cabe destacar que los registros fueron reducidos a una duración del 99% de Intensidad de Arias y corregidos por línea base, para la disminución del tiempo de procesamiento. Esto fue realizado mediante la utilización de SeismoSignal.

#### 4.8 Resultados análisis estáticos

Se exponen los resultados para el caso de análisis estático, en los cuales se obtiene el estado tensional previo a las corridas dinámicas.

##### 4.8.1 Presión de poros

La Figura 14 expone que la presión de poros es nula en el cuerpo del muro, lo que es consistente con la modelación de un muro de carácter impermeable. En contraste, el relave que se encuentra saturado en su totalidad muestra una correcta distribución de poros. Bajo el talud aguas arriba se considera un decrecimiento paulatino de la presión de poros debido a la interacción del muro en el nivel freático.

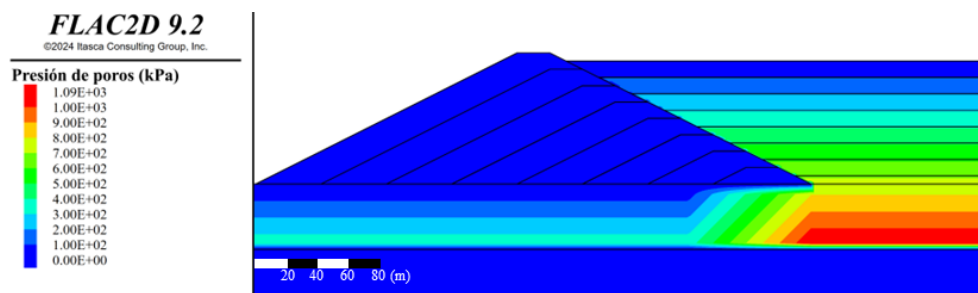


Figura 14: Presión de poros, análisis estático.

##### 4.8.2 Esfuerzos verticales efectivos

En la Figura 15 se presentan los esfuerzos verticales efectivos para el estado tensional previo a las corridas dinámicas, las zonas saturadas se encuentran esfuerzos efectivos menores como consecuencia de la presión de poros expuesta en la Figura 14, bajo el pie del muro aguas arriba se muestra una disminución de los esfuerzos verticales lo cual es consecuente con lo modelado como nivel freático.

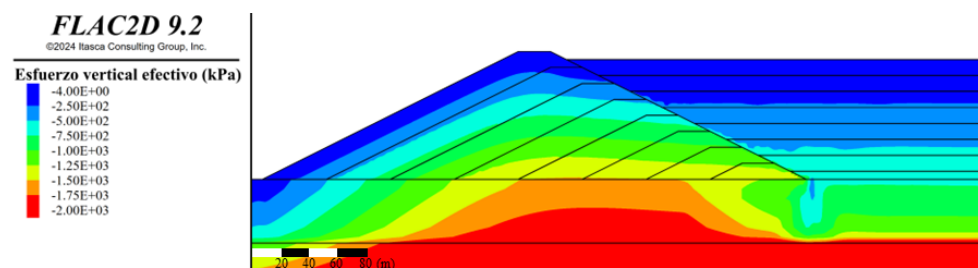
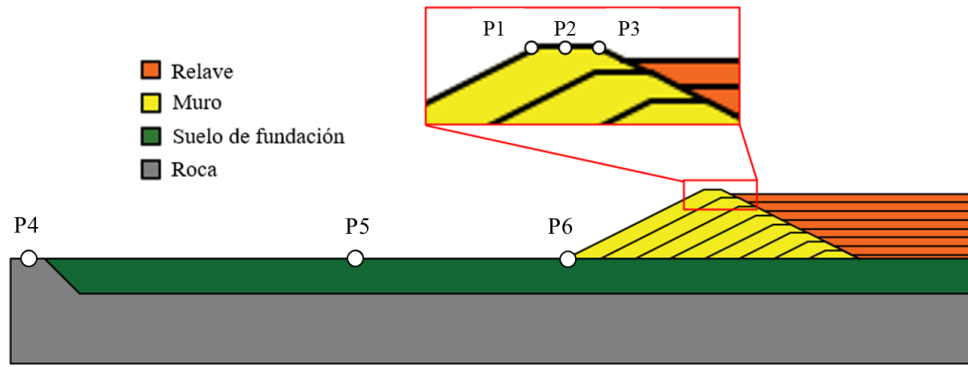


Figura 15: Esfuerzos verticales efectivos, análisis estático.

#### 4.9 Resultados análisis dinámico

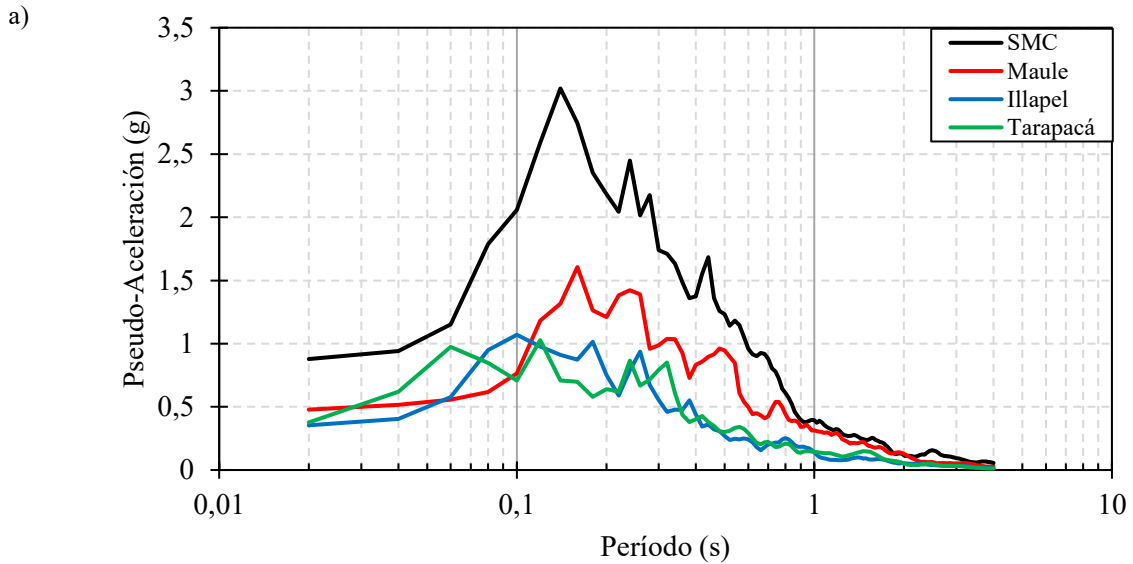
Para el análisis dinámico se definieron puntos de control en el modelo, donde los puntos en el coronamiento captaran los desplazamientos tanto horizontales como verticales durante el evento sísmico y aceleraciones horizontales. Por otra parte, los puntos 4, 5 y 6 se utilizan para captar las aceleraciones horizontales y verticales para poder generar los espectros de respuesta y obtener la función de transferencia entre el pie y el coronamiento del muro. La Figura 16 muestra la ubicación de estos puntos de control

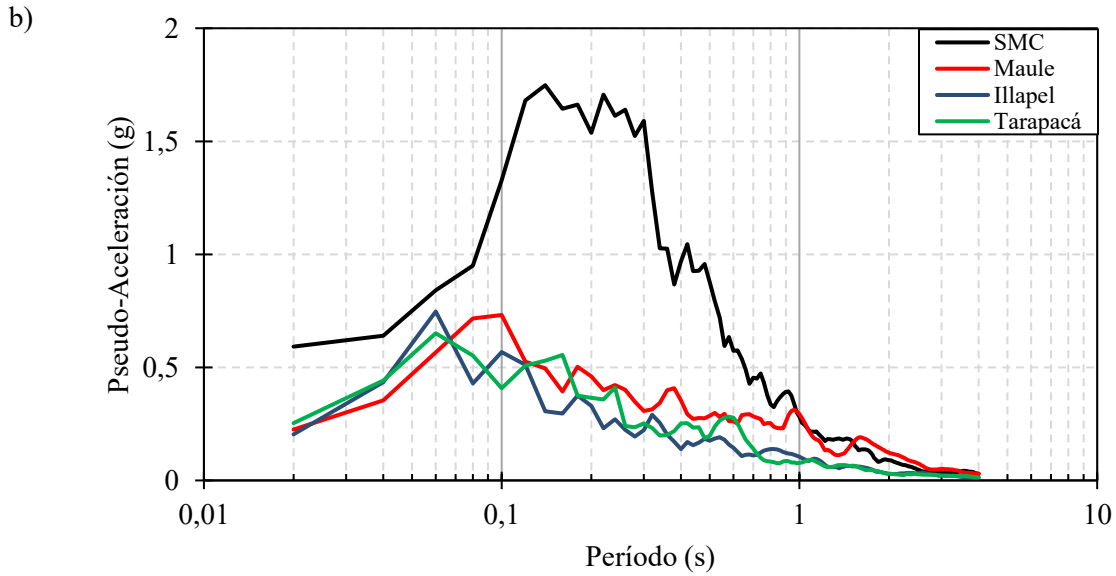


**Figura 16: Ubicación de puntos de control.**

#### 4.9.1 Espectros de respuesta

La Figura 17 presenta los espectros de respuesta en el afloramiento rocoso (P4) de los sismos aplicados al modelo, se expondrán los resultados del análisis tensión deformación asociados a los 2 sismos con mayor respuesta espectral.





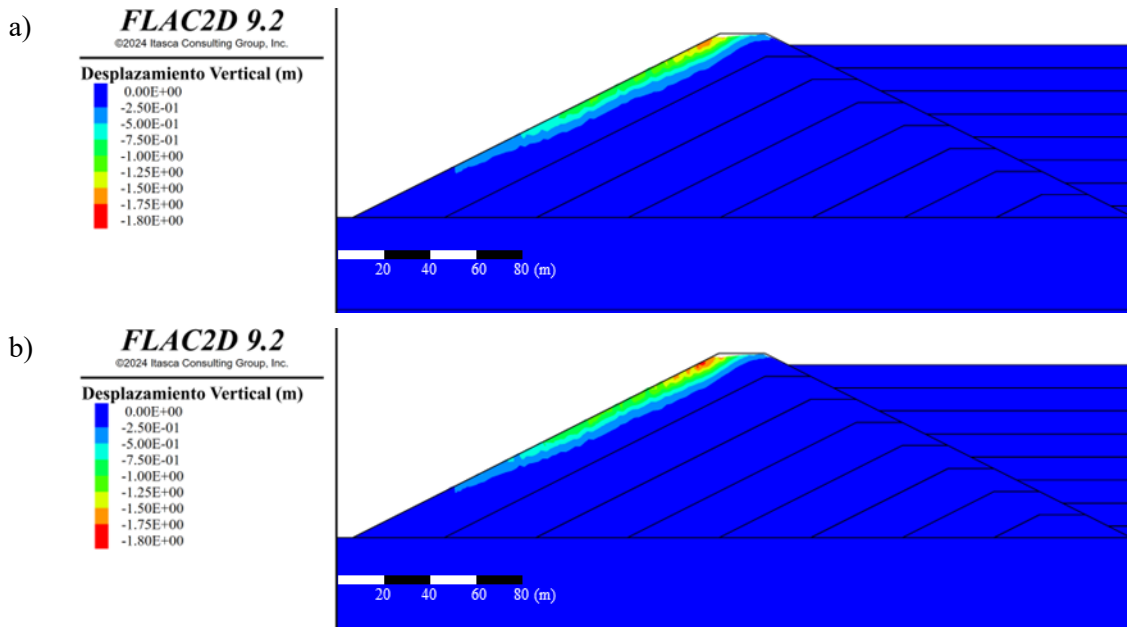
**Figura 17: Espectros de respuesta en roca para distintos sismos, pseudo-aceleraciones horizontales (a) y psuedo-aceleraciones verticales (b).**

#### 4.9.2 Maule 2010 (Mw=8.8)

Se presentan a continuación los resultados al final del sismo de tipo interplaca, considerando 2 casos de análisis: uno cuando se somete solo a aceleraciones horizontales y otro cuando se aplican en simultaneo las componentes horizontales y verticales del sismo.

##### 4.9.2.1 Desplazamientos

Se exponen los desplazamientos verticales, horizontales, totales y los puntos de control en el coronamiento del modelo sometido al sismo para ambos casos propuestos.



**Figura 18: Perfil de desplazamientos verticales: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).**

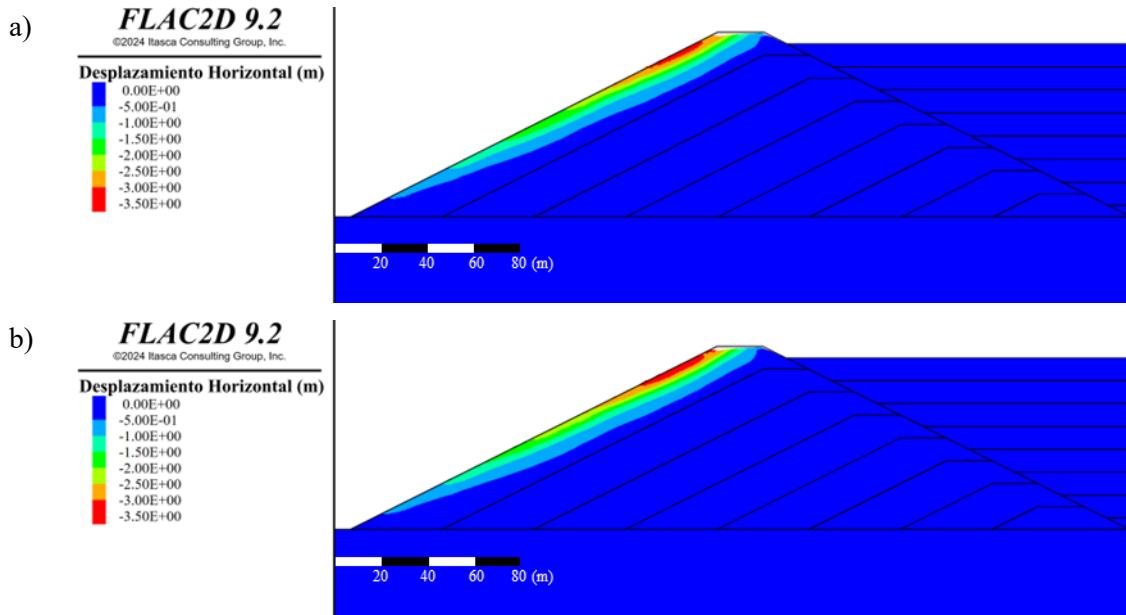


Figura 19: Perfil de desplazamientos horizontales: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).

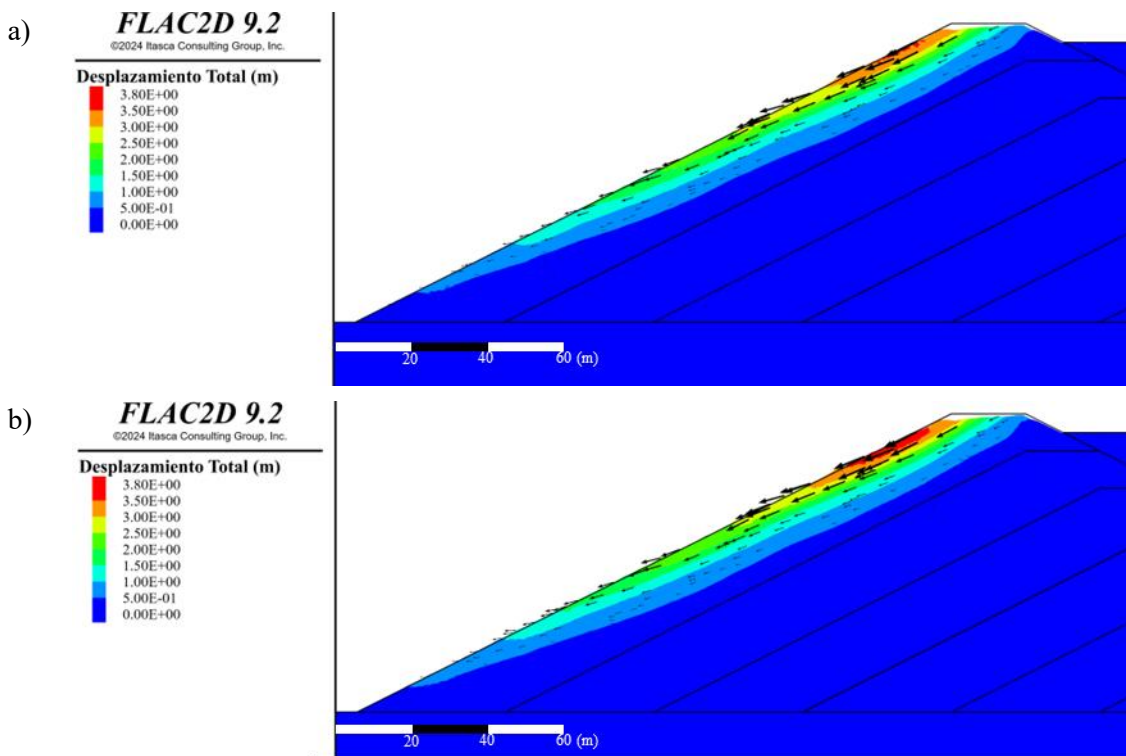
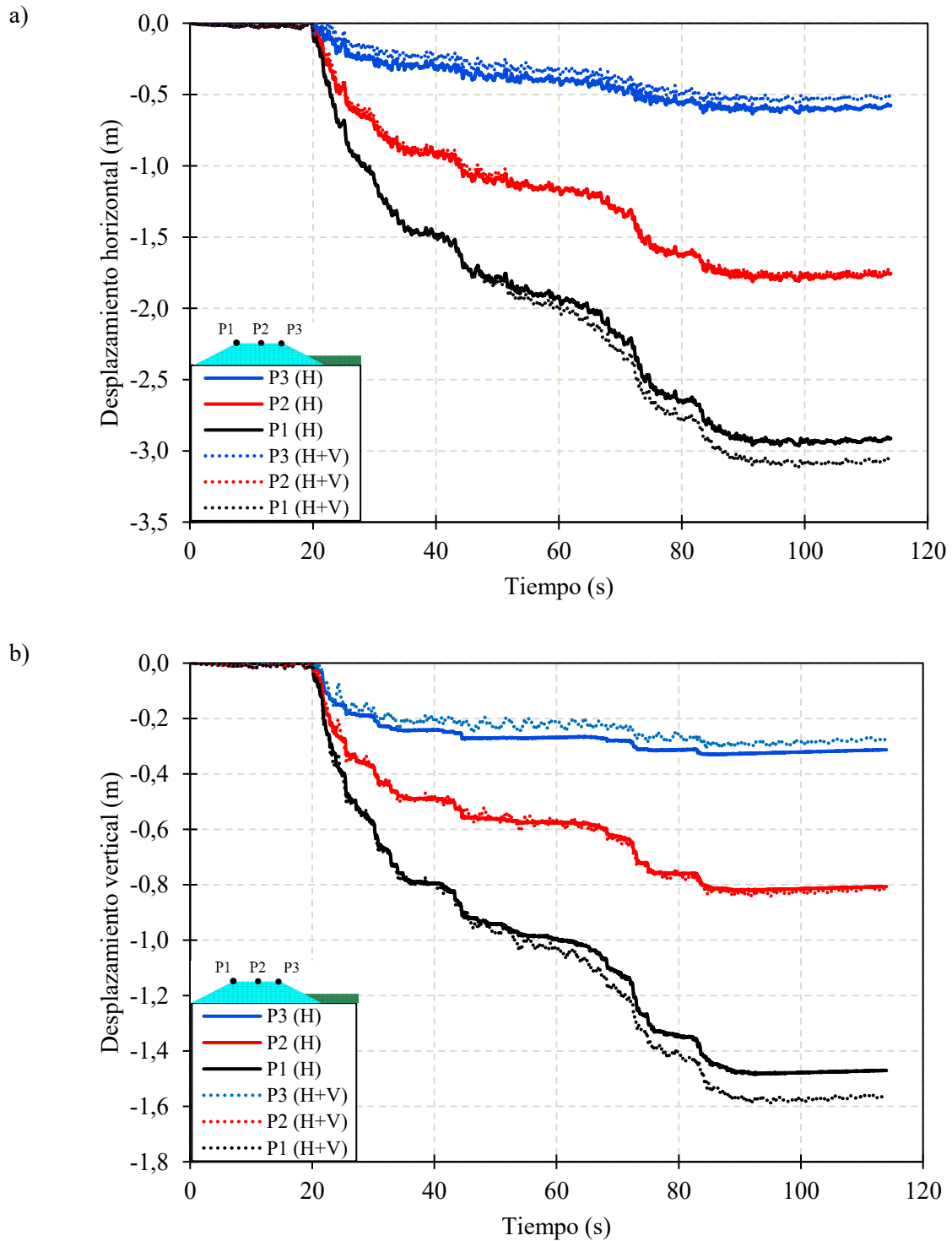


Figura 20: Desplazamiento total incluyendo vectores de desplazamientos: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).

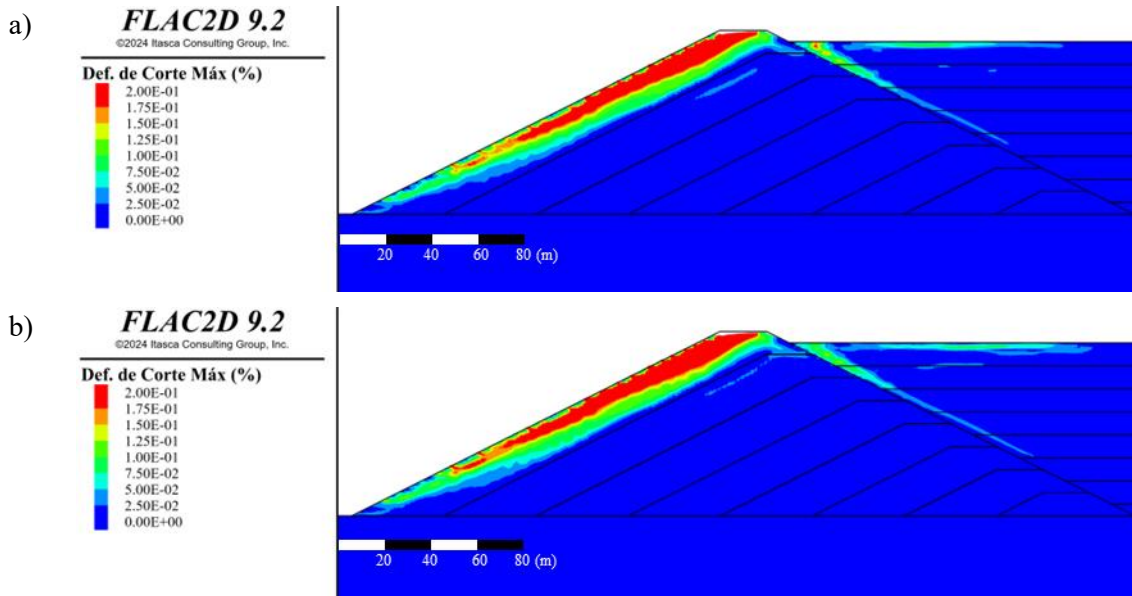


**Figura 21: Desplazamientos en el coronamiento para casos considerando solo la componente horizontal (H) y ambas componentes en simultaneo (H+V): Desplazamientos horizontales (a), desplazamientos verticales (b)**

En base a los contornos de desplazamientos obtenidos, se puede ver que para ambos casos expuestos los desplazamientos verticales comprometen a la zona del talud aguas abajo y principalmente la zona del coronamiento aguas abajo (Figura 18), de igual manera como sucede para los desplazamientos horizontales (Figura 19), obteniendo para ambos desplazamientos contornos similares entre los casos expuestos, como también se verifica en los desplazamientos totales (Figura 20). Por último, en el

desplazamiento de los puntos de control en el coronamiento se puede ver nuevamente que los desplazamientos en el punto de control aguas abajo es el más afectado al añadir la componente vertical del sismo, mas no así el centro del coronamiento ya que para ambas direcciones de desplazamientos se obtienen valores similares y el punto de control aguas arriba al incorporar la componente vertical del sismo sufre desplazamientos y asentamientos menores (Figura 21).

#### 4.9.2.2 Deformaciones por corte

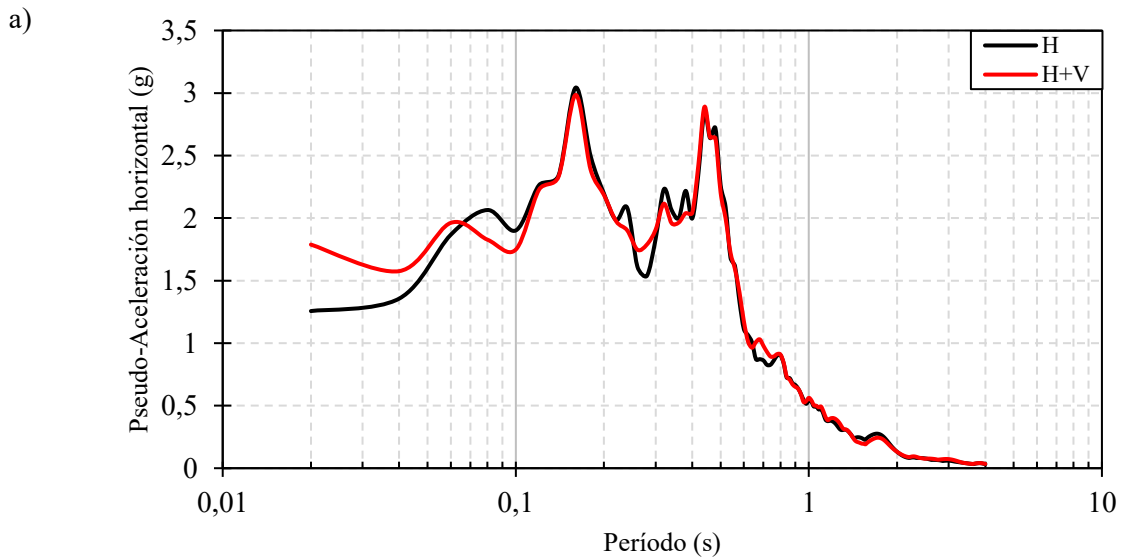


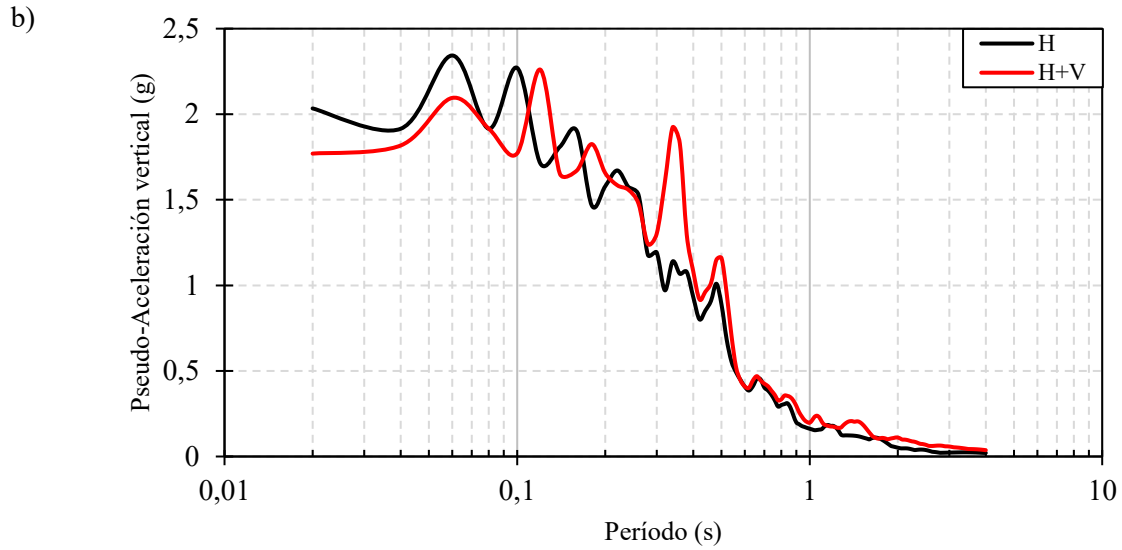
**Figura 22: Deformaciones de corte máximas: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).**

La Figura 22 expone los contornos obtenidos de deformaciones de corte obtenidos del análisis, se observa que la zona más afectada se concentra en el talud aguas abajo, alrededor de unas deformaciones de corte máximo de un 20%. Sin embargo, no presentan diferencias en el mecanismo de falla del talud, este no varía en función de las componentes utilizadas dentro del análisis tensión-deformación.

#### 4.9.2.3 Espectros de respuesta

Se presentan los espectros de respuesta tanto para pseudo-aceleraciones horizontales como verticales del punto de control P2 el cual se ubica en el centro del coronamiento del muro.





**Figura 23: Espectro de respuesta en el centro del coronamiento, pseudo-aceleraciones horizontales (a) y pseudo-aceleraciones verticales (b).**

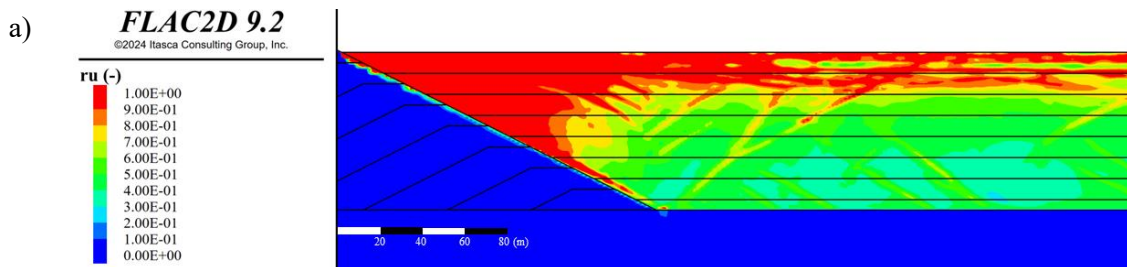
En la Figura 23 (b) se aprecia que a pesar de que se el modelo este sometido al registro horizontal, existe un espectro de respuesta para pseudo-aceleraciones verticales debido a que existe un rebote de ondas en las superficies existentes en el modelo tensión-deformación, al añadir la componente vertical queda expuesto que se tiene una amplificación del espectro de respuesta en un peak entre periodo de 0,3 y 0,4 segundos. Por otra parte, se expone en la Figura 23 (a) que la incorporación del registro vertical no afecta al espectro de respuesta de pseudo-aceleraciones horizontales.

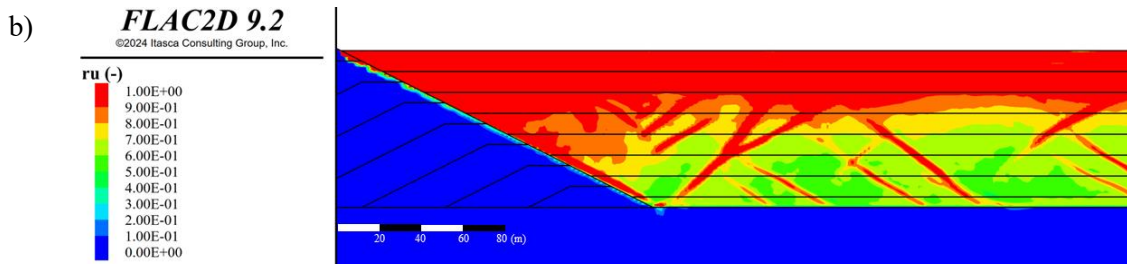
#### 4.9.2.4 Exceso de presión de poros

El exceso de presión de poros se representa con el coeficiente  $ru$ , el cual se define mediante la siguiente razón.

$$ru = \frac{\Delta u}{\sigma'_{v0}} \quad E.4$$

Donde  $\Delta u$  es el exceso de presión de poros y  $\sigma'_{v0}$  representa la tensión vertical efectiva antes del sismo, con esto valores de  $ru$  de 1,0 implica un 100% de presión de poros, generando una pérdida de rigidez del material, lo que es considerado como licuación (Booker et al., 1976). Cabe destacar que para valores mayores también a 0,85 se considera de igual manera una pérdida significativa de la rigidez del material debido a que ese valor implica una tensión vertical efectiva de un 15% con respecto a la inicial y a medida que  $ru$  se acerca a 1, el valor de la tensión vertical efectiva disminuye.





**Figura 24: Exceso de presión de poros: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).**

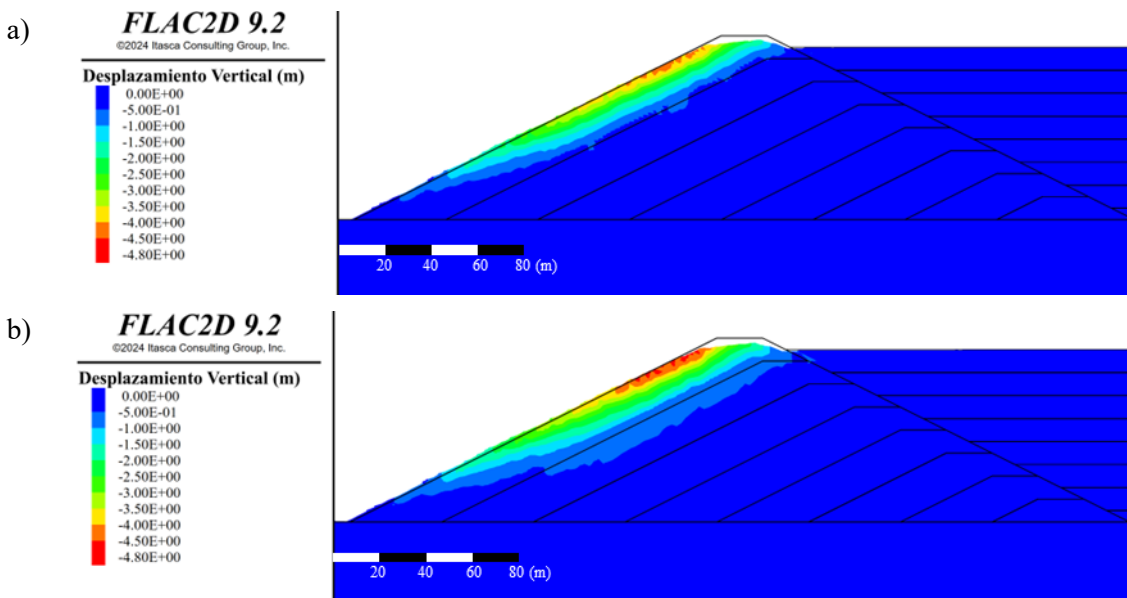
La Figura 24 presenta la distribución del coeficiente  $r_u$  en la cubeta, dado que el relave se encuentra completamente saturado. En ambos casos se identifican zonas con valores cercanos a 1 de  $r_u$ , asociándolo a una pérdida de rigidez del material. En comparación, el escenario (b) exhibe una mayor extensión de superficie con exceso de presión de poros respecto al caso (a). Cabe destacar que en ambos escenarios se evidencia un incremento en el exceso de presión de poros en la zona cercana al muro. Este comportamiento es consistente con el contraste de rigidez entre el muro y el relave. Por otra parte, al incorporar la componente vertical del registro incrementa la superficie en la que se genera exceso de presión de poros.

#### 4.9.3 Sismo máximo creíble

Se exponen los resultados al final del sismo de tipo sintético de un análisis de amenaza sísmica para un depósito de relaves ubicado en el norte de Chile. Considerando 3 casos de análisis primeramente cuando se somete solo a aceleraciones horizontales, luego cuando se somete a las aceleraciones horizontales y utilizando el registro vertical del sismo y por último, ambos registros en simultaneo considerando el registro vertical como  $2/3$  del horizontal.

##### 4.9.3.1 Desplazamientos

Se presentan los desplazamientos verticales, horizontales, totales y los puntos de control en el coronamiento del modelo sometido al sismo para ambos casos de análisis.



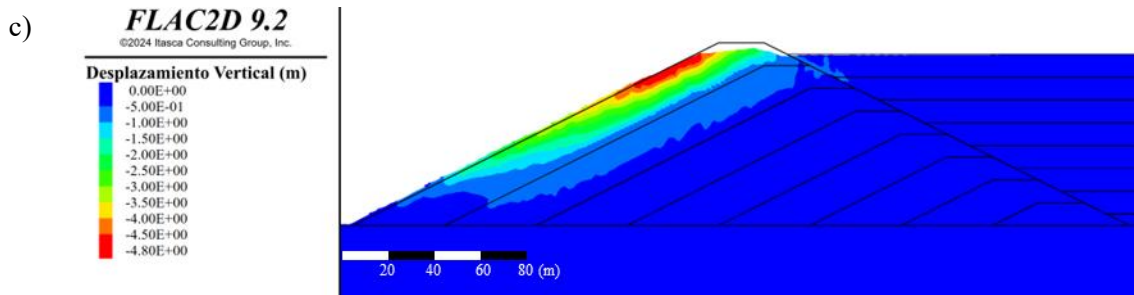


Figura 25: Perfil de desplazamientos verticales: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b), componente horizontal y vertical considerandola como 2/3 de la horizontal (c).

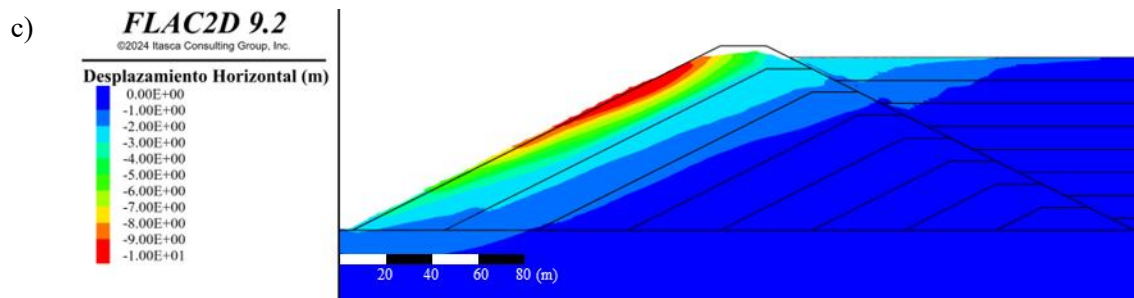
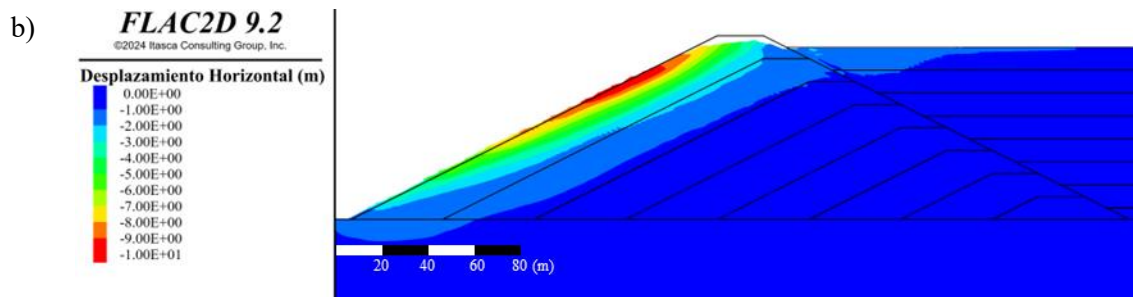
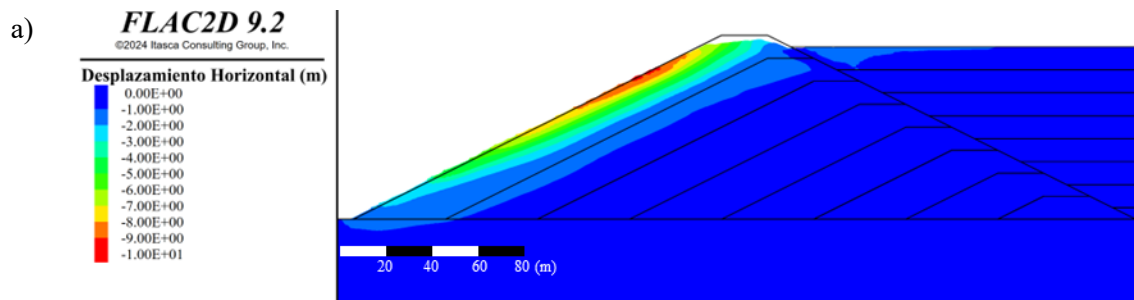
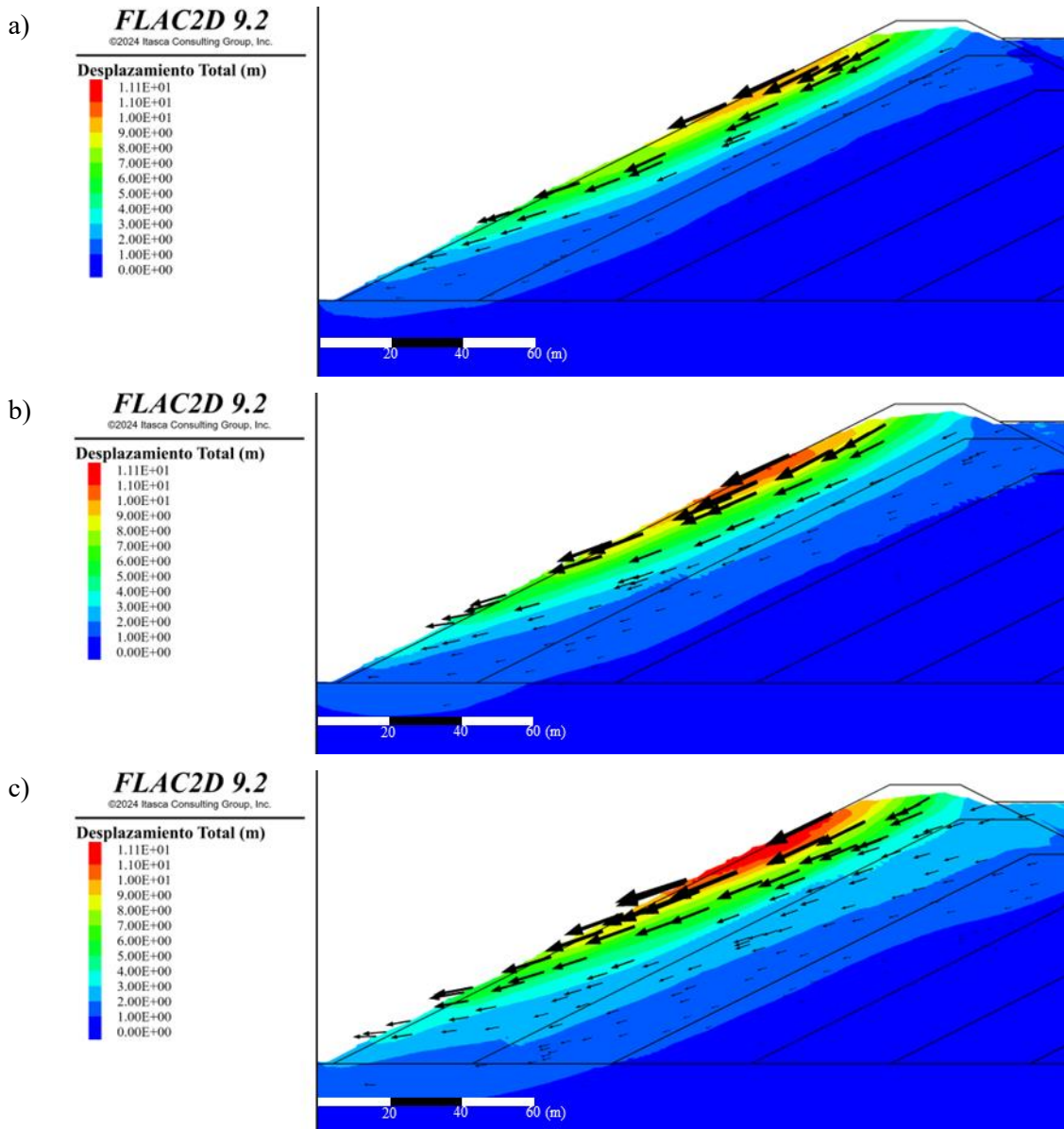
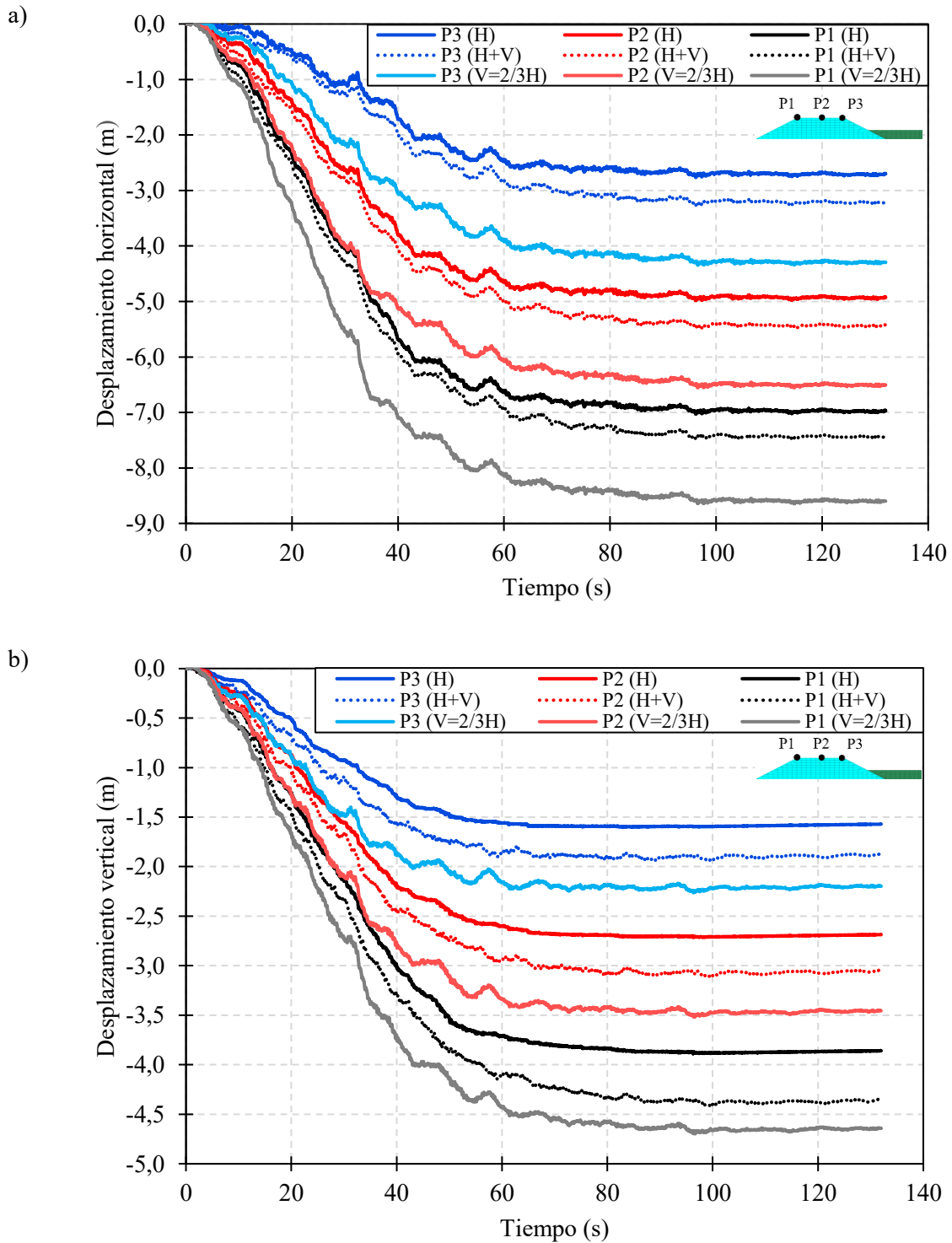


Figura 26: Perfil de desplazamientos verticales: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b), componente horizontal y vertical considerando como 2/3 de la horizontal (c).



**Figura 27: Desplazamiento total incluyendo vectores de desplazamientos: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b), componente horizontal y vertical considerándola como 2/3 de la horizontal (c).**

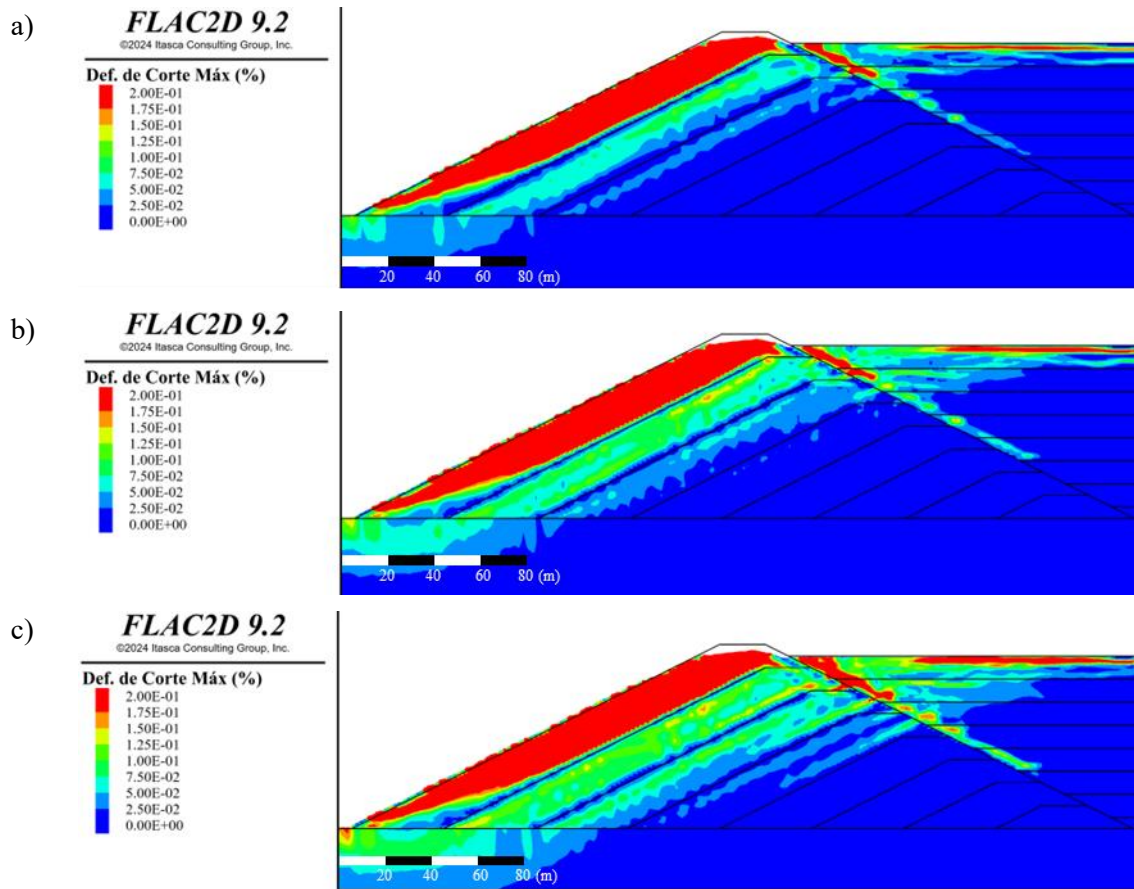


**Figura 28: Desplazamientos en el coronamiento para casos considerando solo la componente horizontal (H), ambas componentes en simultaneo (H+V) y ambas componentes en simultaneo cuando  $V=2/3H$ : Desplazamientos horizontales (a), desplazamientos verticales (b).**

La Figura 28 muestra que, al incorporar la componente vertical del registro de manera simultánea con la componente horizontal del registro, los desplazamientos aumentan con respecto del caso considerando solo la componente horizontal. En particular, cuando se adopta la relación de que el registro vertical sea equivalente a  $2/3$  del horizontal, los desplazamientos y asentamientos incrementan hasta aproximadamente un 30%. Esto se explica porque las componentes del sismo se impusieron en fase y

con una componente vertical equivalente a 2/3 de la horizontal, lo que aumenta la demanda sísmica y genera mayores desplazamientos.

#### 4.9.3.2 Deformaciones por corte

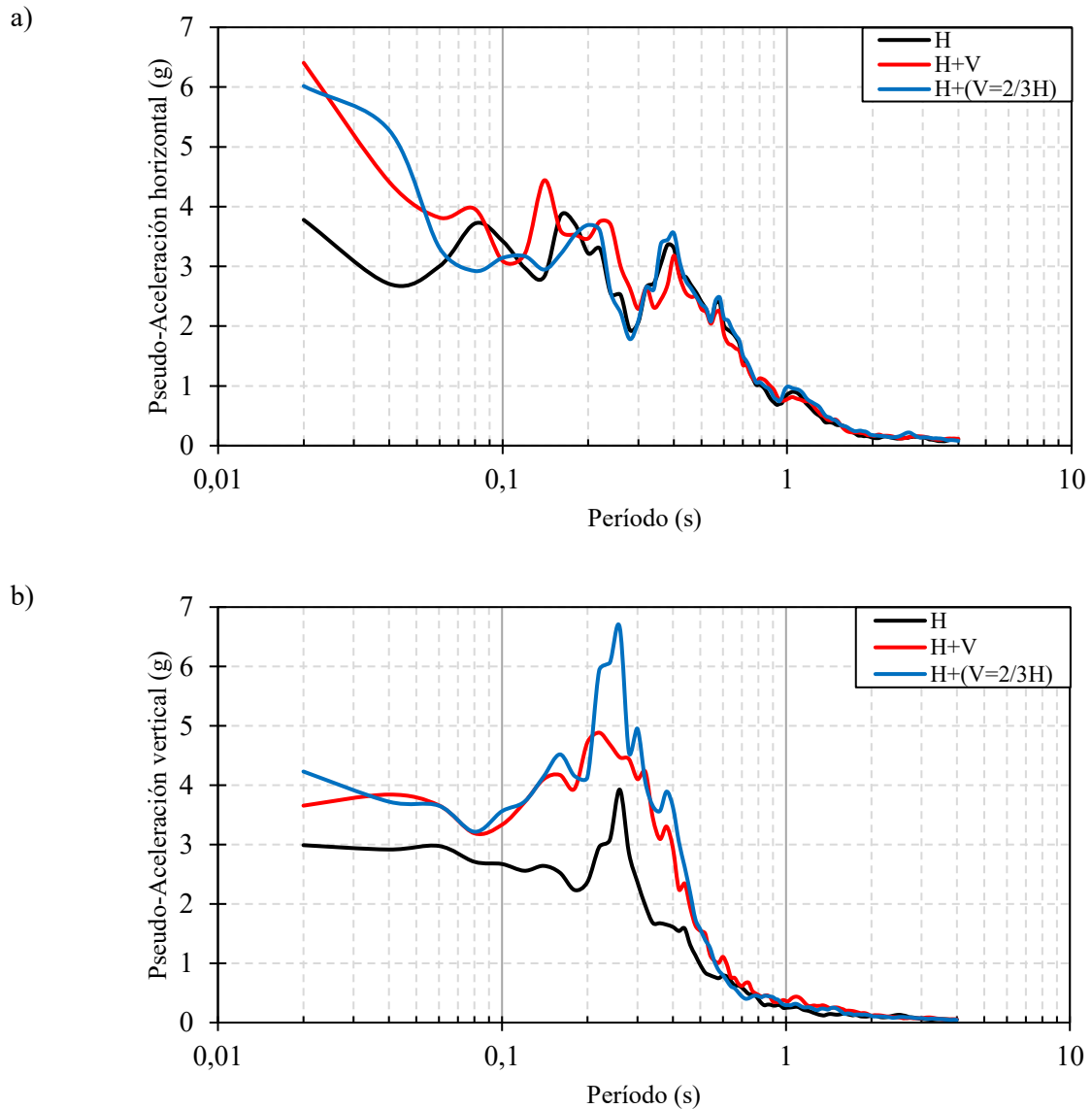


**Figura 29: Deformaciones de corte máximas: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b), componente horizontal y vertical considerándola como 2/3 de la horizontal (c).**

La Figura 29 presenta los contornos de deformación de corte máxima (%) para los distintos escenarios analizados. Al considerar la componente vertical (b) y (c), la zona del cuerpo del muro expuesta a mayores deformaciones se extiende con respecto a considerar solo la componente vertical (a). En particular, el caso (c) exhibe una mayor extensión de la zona con mayores deformaciones de corte que (b), lo cual es consistente de aplicar ambas componentes en simultaneo como se describió en el punto anterior.

#### 4.9.3.3 Espectros de respuesta

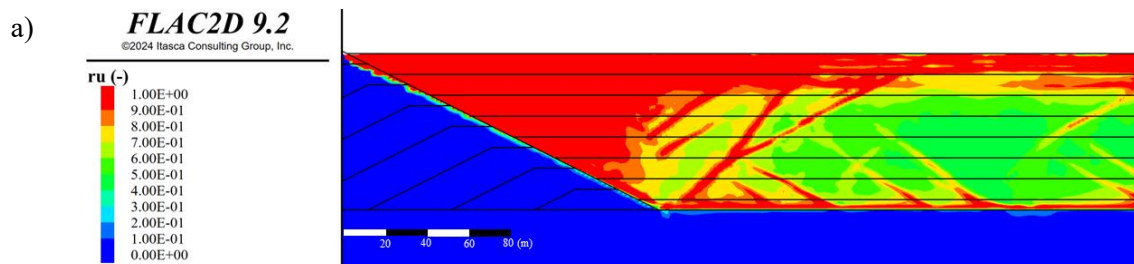
Se presentan los espectros de respuesta en el centro del coronamiento del muro, tanto para pseudo-aceleraciones horizontales como verticales en los casos analizados.

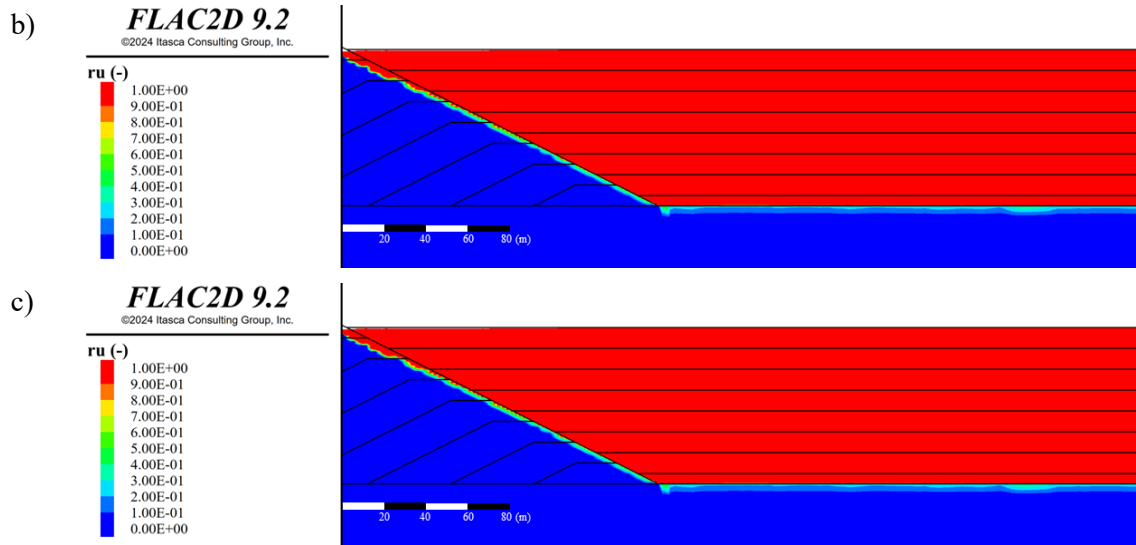


**Figura 30: Espectro de respuesta en el centro del coronamiento, pseudo-aceleraciones horizontales (a) y pseudo-aceleraciones verticales (b)**

Se ve reflejado de igual manera que para el Maule 2010 la incorporación del registro vertical no afecta al espectro de respuesta horizontal (Figura 30 (a)), mas no así en cuanto al espectro vertical (Figura 30 (b)) donde se aprecia que para ambos casos de incorporación e registro vertical se llegan tener valores de aceleraciones cercanas al doble que cuando solo se considera la horizontal, por consiguiente generando una mayor demanda en el depósito explicando así también el aumento en desplazamientos, asentamientos y superficie en el mecanismo de falla.

#### 4.9.3.4 Exceso de presión de poros



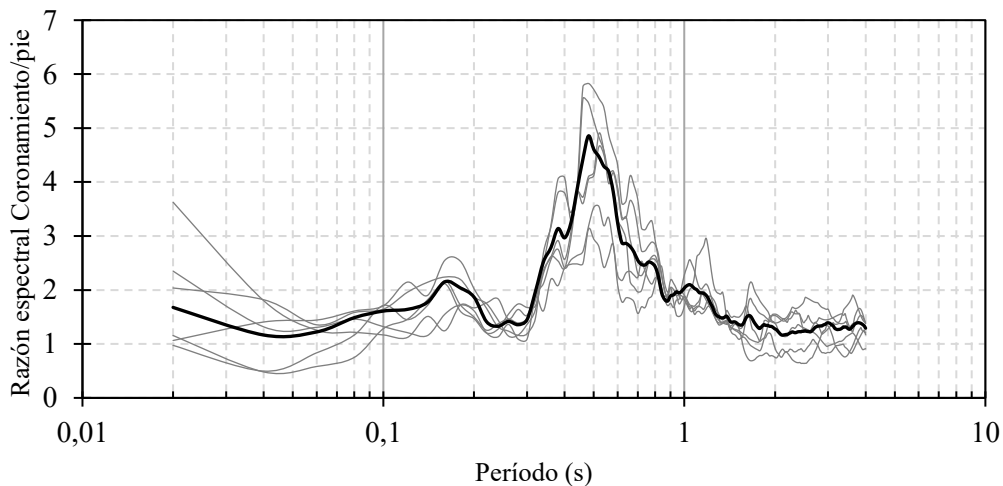


**Figura 31: Exceso de presión de poros: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultáneo (b), componente horizontal y vertical considerándola como 2/3 de la horizontal (c).**

De igual manera que el exceso de presión de poros en el sismo del Maule 2010, la Figura 31 expone que el material de relave que licua es mayor cuando se añade la componente vertical del sismo. Siendo en este caso de manera notable ya que licua la totalidad de la cubeta.

#### 4.9.4 Respuesta del muro

Se presenta en la Figura 32, la función de transferencia de los 4 sismos y los casos de análisis a partir de estos destacando la curva promedio. Esto fue calculado a partir de la razón del espectro de respuesta de pseudo aceleración en el coronamiento y pie obteniendo que en el periodo de 0,5 segundos, se encuentra el peak de todos los casos analizados y este periodo corresponde al primer modo de vibrar del muro.



**Figura 32: Función de transferencia**

En consideración de la teoría elástica de un bloque deslizante, se puede estimar teóricamente el periodo fundamental, teniendo en cuenta la siguiente expresión para superficies deslizante de tipo triangular (Bray, 2007):

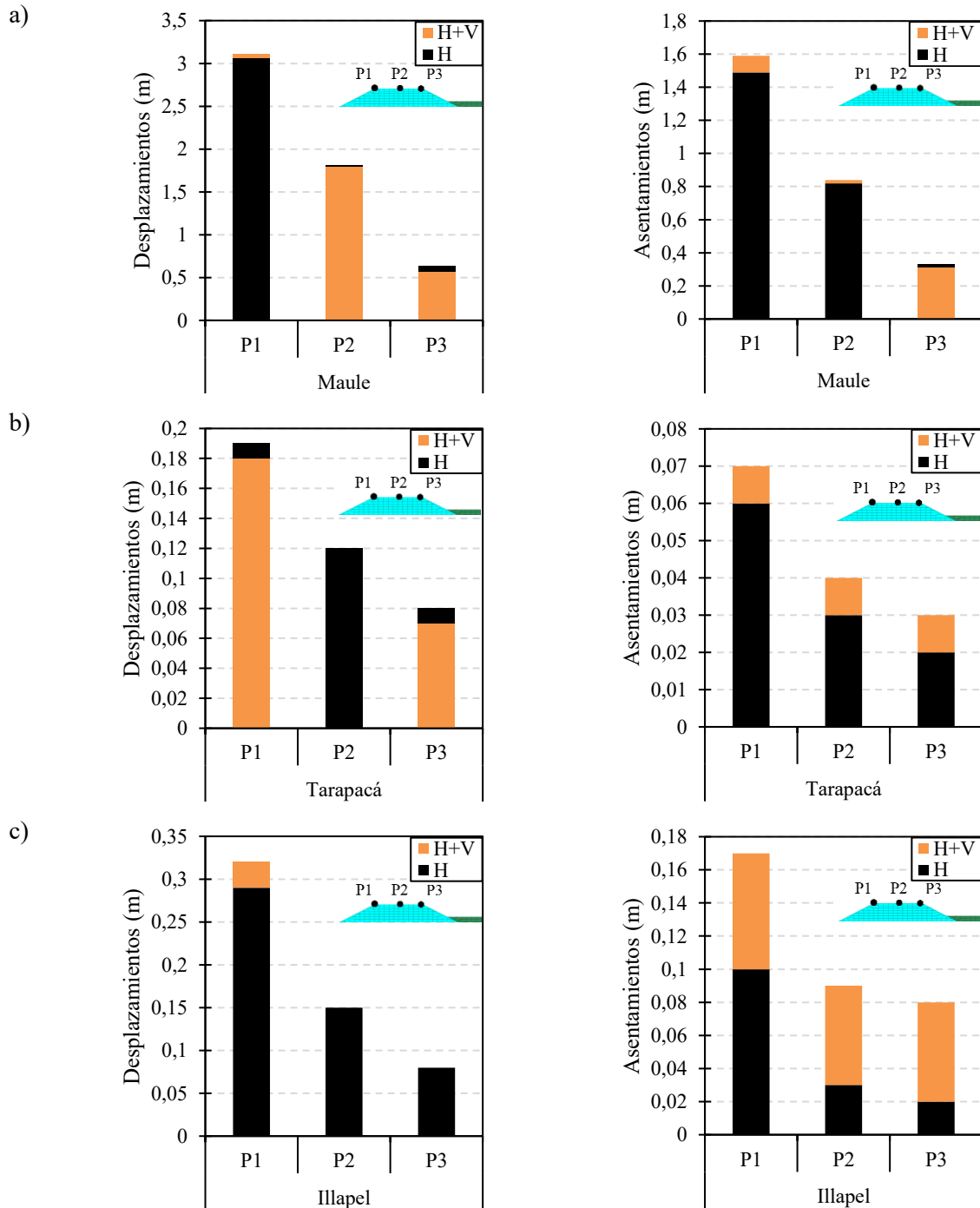
$$T = 2.6 * \frac{H}{V_s} \quad \text{E.4}$$

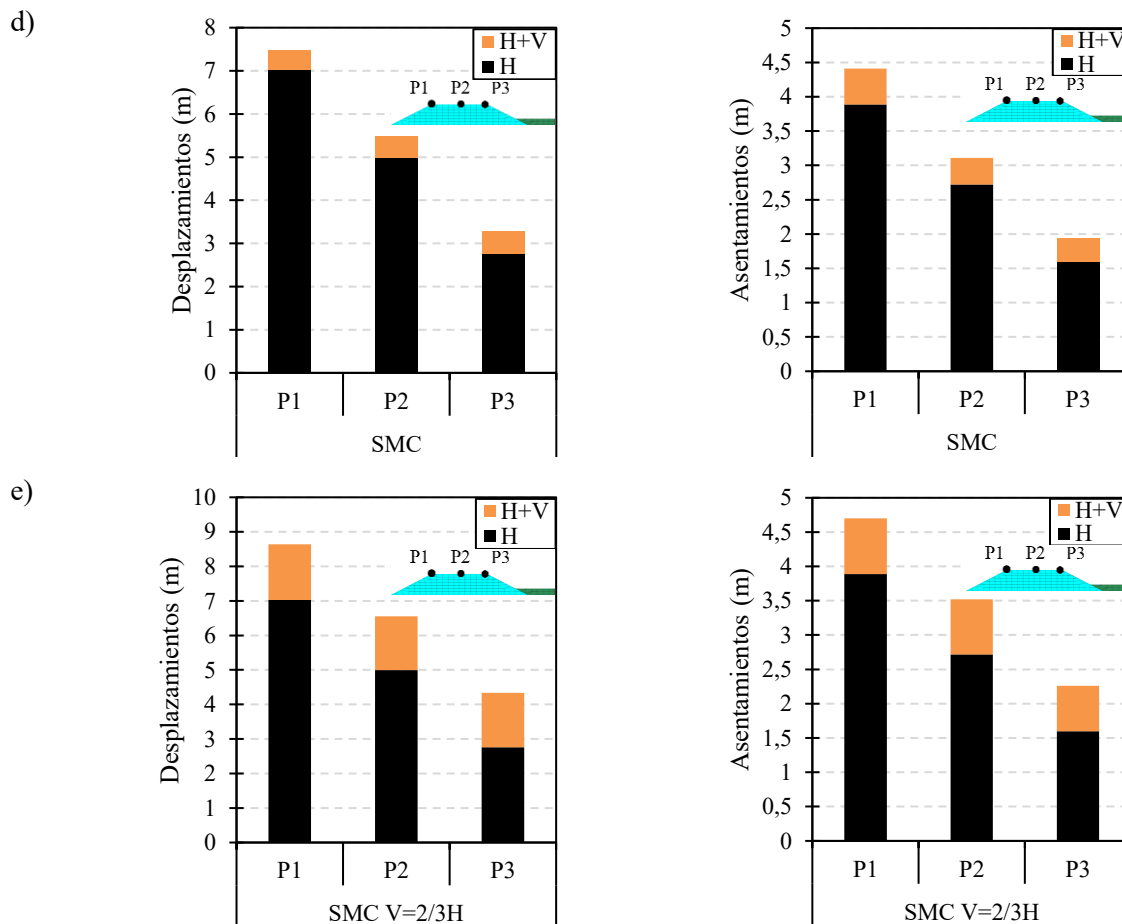
Se obtiene un periodo fundamental teórico de 0,52 segundos, el cual es un valor cercano al resultado de la función de transferencia

#### 4.9.5 Resumen

La Figura 33 presenta un resumen elaborado a partir de las tablas del Anexo 7.5, de los desplazamientos y asentamientos registrados los tres puntos de control ubicados en el coronamiento, desglosado por evento sísmico. Los resultados se reportan en valor absoluto ya que el signo corresponde al sentido en el cual se desplaza.

Cabe señalar que las Figuras de desplazamientos, deformaciones y exceso de presión de poros para los casos de Tarapacá 2005 e Illapel 2015 se encuentran en Anexo 7.3 y 7.4 respectivamente.





**Figura 33: Desplazamientos y asentamientos para los 2 casos de estudio (H y H+V): Maule (a), Tarapacá (b), Illapel (c), SMC (d) y SMC caso V=2/3H (e).**

No siempre la incorporación del registro vertical del sismo va a llevar a tener desplazamientos y deformaciones mayores, para el sismo de Maule 2010 se aprecia que en términos de desplazamientos los puntos centro y aguas arriba del coronamiento tienen valores menores en 1,1 y 10,9% correspondientemente, por otra parte en términos de asentamientos es el único sismo que presenta una disminución en asentamientos en algún punto de control al incorporar el registro vertical, disminuyendo el asentamiento en un 6,9%. Cabe destacar que este sismo presentó la menor razón entre Intensidades de Arias, Obteniéndose que la Intensidad de Arias del registro aplicado verticalmente era un 25% del horizontal en contraste con los otros registros donde esta razón se mantuvo en torno al 60%.

En cuanto al análisis considerando el sismo máximo creíble, el incorporar el registro sintético a partir de la misma fuente sismogénica, se obtienen desplazamientos y asentamientos mayores, esto es aún más notorio cuando se considera el registro vertical como 2/3 del horizontal, ya que estos actúan en la misma fase solicitando de mayor manera al depósito, este comportamiento queda expuesto a su vez en como aumentan los espectros de respuesta en el coronamiento.

## 5 Conclusiones y desafíos futuros

Luego de la implementación del modelo tensión-deformación donde como objetivo era verificar el aumento en desplazamientos y deformaciones al comparar la respuesta del muro al aplicar el registro horizontal del sismo y luego incorporar la vertical para que actúen en simultáneo. Se obtuvo que:

En todos los casos analizados la afectada de mayor manera fue el talud aguas abajo, concentrando los mayores desplazamientos y asentamientos en el punto del coronamiento aguas abajo (P1). El mecanismo global de falla es consistente en todos los casos en cuanto a sus deformaciones de corte, estando la mayoría localizadas en el talud aguas abajo, si bien este mecanismo se obtuvo independiente de la

componente vertical, este perfil de falla si sufrió un aumento en cuanto a la aplicación del sismo máximo creíble, lo cual consecuente dado que representa un sismo catastrófico.

No siempre los desplazamientos y asentamientos van a aumentar al incorporar el registro vertical en simultáneo del horizontal, por parte de los asentamientos quedó demostrado que para el sismo del Maule 2010 a pesar de tener intensidad de Arias mayor a los demás sismos (sin considerar el SMC) este representaba una cuarta parte de la intensidad de Arias horizontal. En este sismo fue el único que se obtuvieron para el punto de control aguas arriba una disminución de 6,1%, mientras que en todos los otros sismos se obtuvieron asentamientos mayores al incorporar el registro sísmico vertical. Por otra parte, los desplazamientos horizontales. Para el sismo del Male y Tarapacá de igual manera se obtuvieron puntos donde fueron mayores solo considerando el registro horizontal, ambos sismos comparten que los espectros de respuesta horizontales no se ven afectados de manera significativa en la incorporación de la componente vertical.

El escenario más desfavorable en cuanto a la sollicitación sísmica corresponde al sismo máximo creíble cuando el registro vertical es  $2/3$  del horizontal, en este caso ambos registros actúan en fase generando un aumento considerable de asentamiento y desplazamientos en el coronamiento, llegando a aumentar de 7.03 a 8.64 metros, implicando un aumento del 25%. Al actuar en fase implica que ambos pulsos se encuentran en el peak en simultáneo, por ejemplo: cuando la aceleración tiene dirección hacia arriba desconfinando de cierta manera el muro como se mencionó en el análisis de equilibrio límite y a su vez que ocurre esto la componente horizontal se encuentra en peak, generando así una demanda altamente desfavorable para el depósito generando deformaciones plásticas. Por lo que al considerar el registro vertical como  $2/3$  del registro horizontal, es conservador en cuanto a las sollicitaciones sísmicas que se someterá el depósito ya que es un caso extremadamente particular que las ondas estuvieran en fase pudiendo generar el efecto mencionado.

Al incorporar la componente vertical, se evidenció un aumento en la zona del relave donde se generó exceso de presión de poros, lo que es coherente con una mayor sollicitación de tipo compresional (onda P). Este incremento de presión de poros se asocia con la pérdida de rigidez del relave durante la sollicitación sísmica.

A modo de recomendación, la incorporación de la componente vertical en los análisis debe realizarse con mucha revisión. En primer lugar, a la definición del input sísmico y la metodología utilizada para representar el registro, ya sea mediante registro de acelerogramas o aproximados como una fracción de la componente horizontal. En segundo lugar, debe evaluarse críticamente la respuesta ya que en este estudio no resultó siempre uniforme ni monótona para todos los puntos de control ni para todos los sismos analizados. En consecuencia, la respuesta obtenida dependerá del caso sísmico considerado (registros reales o sintéticos), fase entre ambas componentes aplicadas en simultáneo, del contenido espectral de los registros y saturación de los materiales.

Para trabajos futuros, se propone realizar el análisis considerando que el muro no se encuentre completamente impermeabilizado y/o que cuente con nivel freático dentro del cuerpo del muro, pudiéndose incorporar el caso en que el suelo de fundación se encuentre saturado ya que, considerando los resultados obtenidos, los relaves presentaron una mayor generación de exceso de presión de poros cuando se aplicaba la componente vertical del sismo. En este contexto, el muro podría experimentar cambios en su respuesta en términos de deformaciones debido a la licuación en las zonas saturadas dentro del muro o en el suelo de fundación cercana al muro. Por otra parte, en cuanto a calibraciones y modelos, se recomienda ejecutar simulaciones del depósito probando la respuesta de distintos modelos constitutivos para representar los diferentes materiales y por último las calibraciones cíclicas en ambas direcciones de análisis considerando el estudio de cómo afecta la incorporación de la componente vertical.

## **Agradecimientos**

Agradezco en primer lugar a mi profesor guía Cristian Monje por su orientación y acompañamiento durante el desarrollo de la presente memoria. Así como su permanente disposición y compromiso que fueron clave a lo largo de todo el proceso.

Agradezco también a mi profesor correferente Sergio Carrasco por su buena disposición, comentarios y revisión de mi investigación.

De manera especial, agradezco a Sebastian Maureira por brindarme la oportunidad de integrarme al grupo de modelación numérica, inicialmente durante mi práctica profesional y posteriormente para el desarrollo de esta memoria. Asimismo, agradezco al grupo de modelación por su apoyo y disposición para resolver dudas que fueron importantes para el avance de esta memoria.

Agradezco a Carolyn Diaz por permitirme realizar la memoria en WSP.

A la empresa WSP por el apoyo y las facilidades otorgadas para llevar a cabo la investigación.

A Fatme Álvarez e Ignacio Maluenda, mi madre y hermano. Gracias por su apoyo constante, por los buenos momentos y por acompañarme durante toda esta etapa. Sin ustedes, este camino habría sido más mucho más difícil (¡Vamos, que se puede!).

A todos mis familiares particularmente a Claudia Maluenda, Agradezco profundamente la ayuda y respaldo durante mi etapa de estudio.

Finalmente, a mis amigos de la universidad que hicieron este camino más ameno y entretenido, y a mis amigos de toda la vida por acompañarme y estar presentes durante todo el proceso.

## 6 Referencias

- Alfaro, A. (2013). Modelación numérica 3D para estabilización de taludes utilizando drenes subhorizontales (Memoria para optar al título de Ingeniero Civil). Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
- Antoniou, S., & Pinho, R. (2004). *SeismoSignal: A computer program for signal processing of strong-motion data* (Technical Report N.º 4.0.0). SeismoSoft
- Astroza, Maximiliano & Moya, R & Sanhueza, S. (2002). Estudio comparativo de los efectos de los terremotos de Chillan de 1939 y de Talca 1928.
- Barrios García, J. J. (2017). Análisis de estabilidad de un depósito de relaves espesados emplazado sobre un tranque de relaves convencional (Tesis de pregrado). Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/23582&#8203;>
- Bellido, NG & Mendoza, PG 2024, 'Calibration of the PM4Silt model for polymetallic fine grained mine tailings based on laboratory testing results ', in AB Fourie & D Reid (eds), Paste 2024: Proceedings of the 26th International Conference on Paste, Thickened and Filtered Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 361-370, [https://doi.org/10.36487/ACG\\_repo/2455\\_29](https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2455_29)
- Beneyto, P., Gutierrez, G., Mroginski, J., Di Rado, H., & Awruch, A. (2011). *Análisis de estabilidad de taludes mediante técnicas de optimización heurística*. Mecánica Computacional, Vol. XXX, 2001-2014. Rosario, Argentina: Asociación Argentina de Mecánica Computacional.
- Booker, J. R., Rahman, M. S., & Seed, H. B. (1976). GADFLEA: A computer program for the analysis of pore pressure generation and dissipation during cyclic or earthquake loading (Report No. EERC 76-24). Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. <https://nehrpsearch.nist.gov/static/files/NSF/PB263947.pdf>
- Bray, J. D. (2007). Simplified seismic slope displacement procedures. In K. D. Pitilakis (Ed.), *Earthquake geotechnical engineering* (pp. 327–353). Springer
- Calabrán Toro, R. A. (2009). *Evaluación de riesgo ambiental del tranque de relave Las Tórtolas ubicado en la comuna de Colina, Región Metropolitana de Santiago* [Memoria para optar al título profesional de geógrafo]. Universidad de Chile, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Escuela de Geografía.
- Cerna-Díaz, A., Kafash, M., Davidson, R., Yenne, L., & Doughty, P. (2023). Nonlinear deformation analyses of a tailings dam during a Mw5.7 earthquake. In *Geo-Congress 2023*. American Society of Civil Engineers (ASCE). <https://doi.org/10.1061/9780784484708.007>
- Comisión Chilena del Cobre. (2025). Producción de cobre mina por empresa (mensual) [Archivo de Microsoft Excel]. COCHILCO.
- Contreras, M., & Winckler, P. (2013). Pérdidas de vidas, viviendas, infraestructura y embarcaciones por el tsunami del 27 de febrero de 2010 en la costa central de Chile. *Obras y Proyectos*, 14, 6-19.
- Darendeli, MB 2001, Development of a New Family of Normalized Modulus Reduction and Material Damping Curves, PhD thesis, The University of Texas at Austin, Austin.
- Decreto Supremo D.S N°248. (2007). Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. Ministerio de Minería. Santiago, Chile.

- Figueroa, Abraham, Solans, David, Gonzalez, Christian, & Campaña, José. (2017). Comportamiento sísmico de presas de relaves construidas aguas abajo y línea central. *Obras y proyectos*, (21), 30-37. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132017000100004>
- Gazetas, G., & Dakoulas, P. (1992). Seismic analysis and design of rockfill dams: State-of-the-art. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11(1), 27–61. [https://doi.org/10.1016/0267-7261\(92\)90021-H](https://doi.org/10.1016/0267-7261(92)90021-H)
- Hernández, A. (2021). Colapso del tranque de relaves Las Palmas durante el sismo del Maule 2010 (Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile). <https://repositorio.uc.cl/handle/11534/57461>
- Ishihara, K. (1996). *Soil behaviour in earthquake geotechnics*. Oxford University Press.
- Itasca Consulting Group, Inc. (2025). FLAC2D 9.2. <https://www.itascacg.com/software/new-in-flac2d-9->
- Kehoe, B. E., & Attalla, M. R. (2000). Considerations of vertical acceleration on structural response (Paper No. 1065). In *Proceedings of the Twelfth World Conference on Earthquake Engineering (12WCEE)*, Auckland, New Zealand. <https://www.wcee.nicee.org/wcee/article/1065.pdf>
- Lanzo, G., Pagliaroli, A., & Scasserra, G. (2015). Effects of ground motion characteristics on seismic response of earth dams: Some remarks on duration parameters and vertical shaking. In *SECED 2015 Conference: Earthquake Risk and Engineering towards a Resilient World* (Cambridge, UK). <https://seced.org.uk/images/newsletters/LANZO,%20PAGLIAROLI,%20SCASSERRA.pd>
- Likitlersuang, S., Teachavorasinskun, S., Surarak, C., Oh, E., & Balasubramaniam, A. (2013). Small strain stiffness and stiffness degradation curve of Bangkok Clays. *\*Soils and Foundations*, 53\*, 498–509. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.06.003>
- Morales, C., Bard, A., & Palma, C. (2022). The impact of considering the vertical seismic coefficient  $k_v$  on the pseudostatic slope stability analysis of downstream tailings sand dams. *Obras y Proyectos*, 32, 25–33. <https://doi.org/10.21703/0718-51620202203203>
- Moss, R., Gebhart, T., Frost, J., & Ledezma, C. (2019). Flow-failure case history of the Las Palmas, Chile, tailings dam. Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley. PEER Report No. 2019/01.
- Nieto, A., Camacho, J & Ruiz, E (2009) Determinación de Parámetros para los Modelos Elastoplásticos Mohr-Coulomb y Hardening Soil en Suelos Arcillosos. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*.
- Panes Fernández, A. (2021). Comparación de los modelos constitutivos NorSand y P2PSand para el modelamiento sísmico de un embalse de relaves en Chile utilizando FLAC3D. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184420>
- Pérez Taboada, C. (2005). Modelización constructiva de comportamiento de materiales compuestos para el uso civil [Trabajo final de carrera / Minor thesis, Universitat Politècnica de Catalunya]. UPCommons.
- Poblete, I (2017) Caracterización de las fuentes sísmicas de subducción inter-placa del centro-sur de Chile a través de un sistema de información geográfica.
- R. W. Boulanger and K. Ziotopoulou (2023). PM4SILT (Version 2.1): A Silt Plasticity Model For Earthquake Engineering Applications.
- Rollins, K., Evans, M., Diehl, N. & Daily W. (1998). Shear modulus and damping relationships for gravels. *J. Geotech. Environ. Eng.*, 124 (5), pp. 396-405.

- Sahoo, P.P. and Shukla, S.K. (2021). Effect of vertical seismic coefficient on cohesive-frictional soil slope under generalised seismic conditions. *International Journal of Geotechnical. Engineering* 15(1), 107-119
- Saragoni, R., Ruiz, S. (2012). Implicaciones y Nuevos Desafíos de Diseño Sísmico de los Acelerogramas del terremoto del 2010 Capítulo 6. Libro Mw=8.8 Terremoto en Chile. 27 Febrero 2010. Departamento Ingeniería Civil. Universidad de Chile
- Servicio Nacional de Geología y Minería (2025). Catastro de Depósito de Relaves en Chile.
- Valenzuela, L. (2016). Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile. *Obras y Proyectos*, 19, 6-22.
- Wu, H., & Marshall, J. D. (2017). Effect of vertical accelerations on steel frame structures (Paper No. 2336). In *Proceedings of the 16th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE)*, Santiago, Chile. <https://www.wcee.nicee.org/wcee/article/16WCEE/WCEE2017-2336.pdf>
- Y. F. Dafalias & M.T. Manzari (2004). Simple plasticity sand model accounting for fabric change effects. *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, 130(6), 622-634.

## 7 Anexo

### 7.1 Curvas de ajuste sigmoidal-3

#### 7.1.1 Suelo de fundación

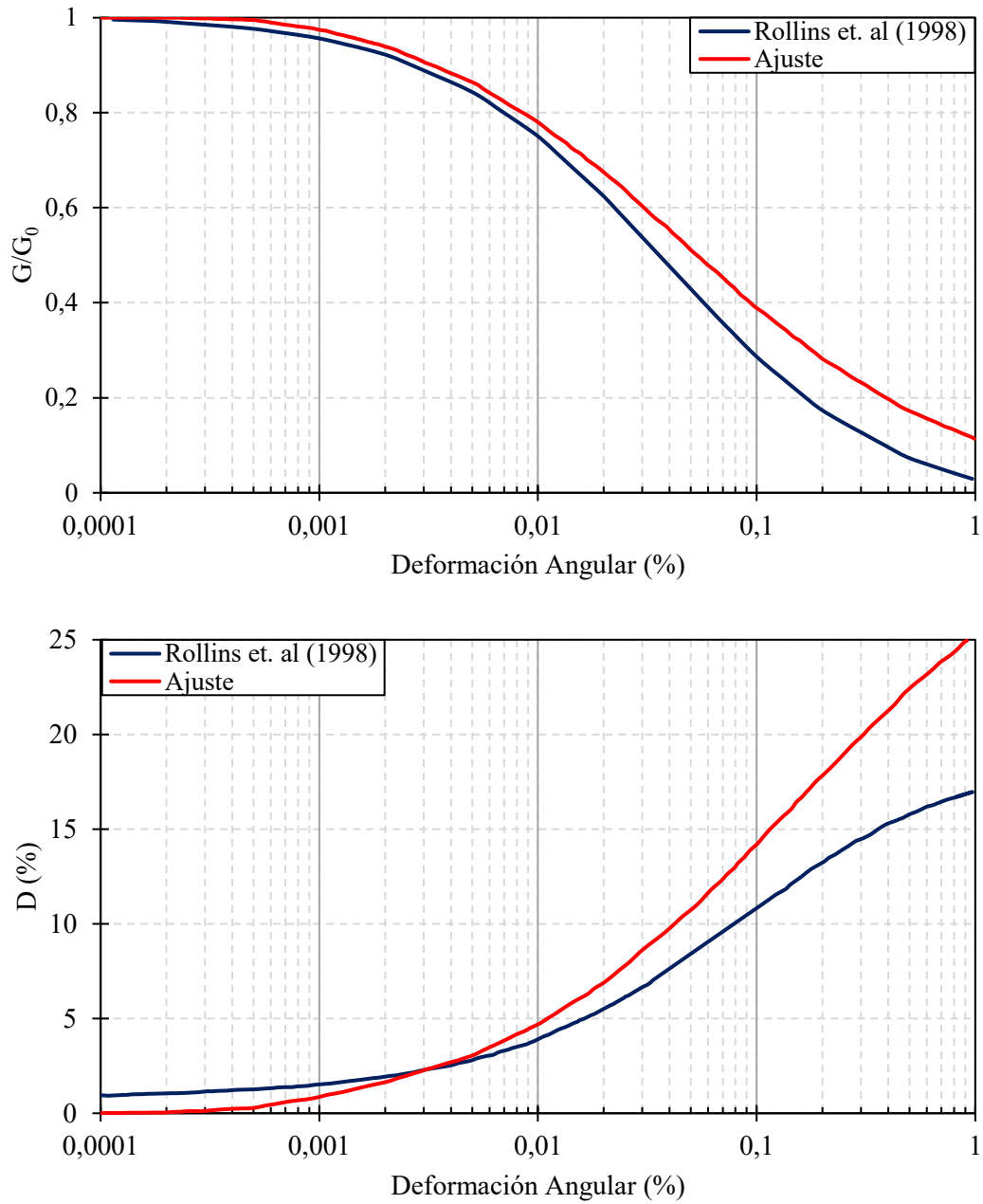
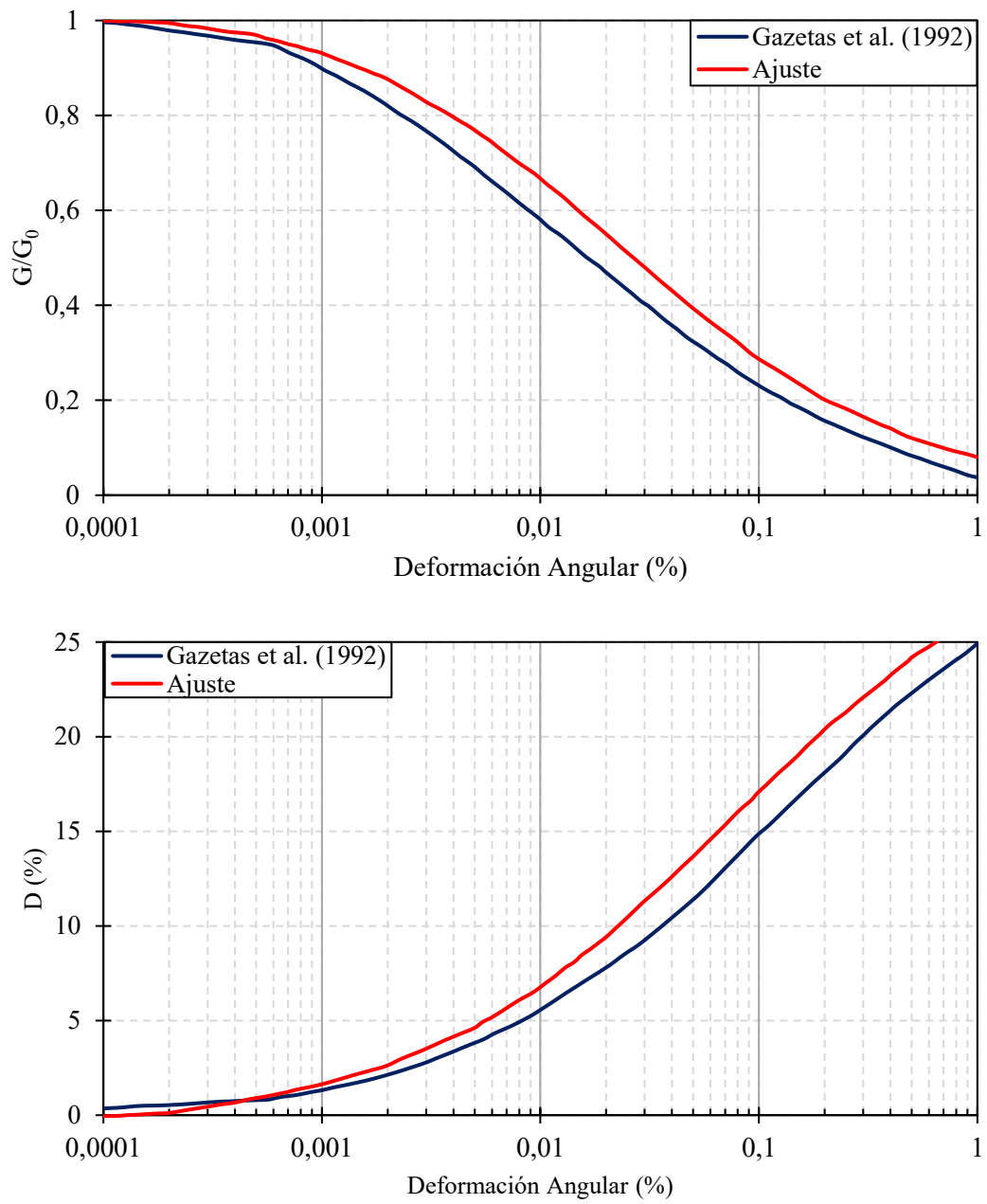


Figura 34 Calibración Sigmoidal-3 curva Rollins et al (1998)

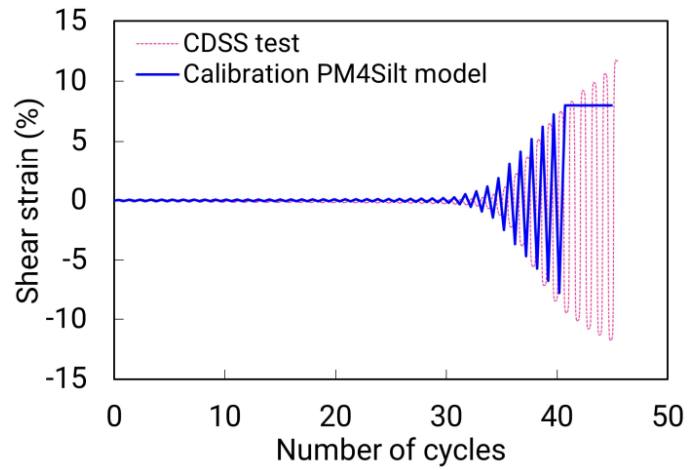
### 7.1.2 Muro



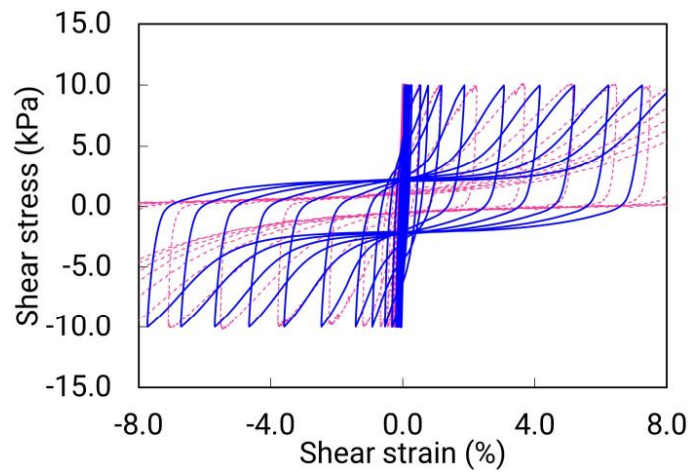
**Figura 35 Calibración Sigmoidal-3 curva Gazetas et al. (1992)**

## 7.2 Calibración PM4Silt simulación en elemento singular (CSR=0,1; Confinamiento=100 kPa)

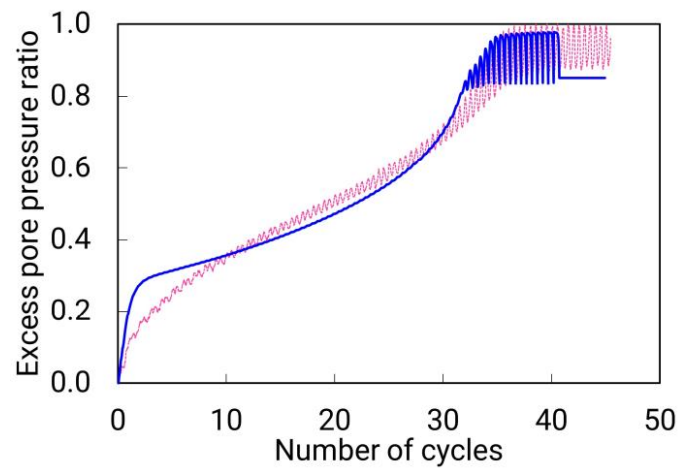
a)

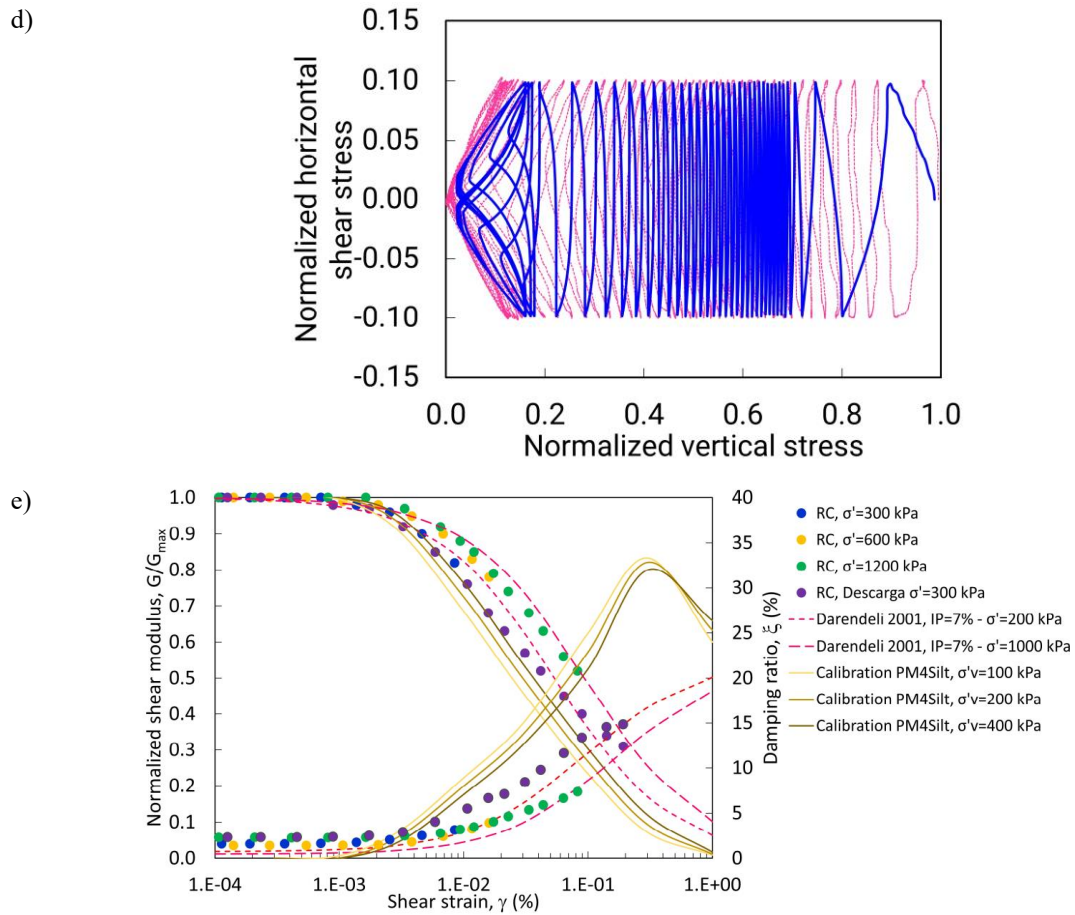


b)



c)





**Figura 36: Simulaciones PM4Silt en elemento singular: Deformación de corte versus número de ciclos (a), esfuerzo cíclico versus deformación de corte (b), exceso de presión de poros versus número de ciclos (c), esfuerzo de corte horizontal normalizado versus esfuerzo vertical normalizado (d), degradación de módulo de corte y razón de amortiguamiento versus deformación de corte (e).**

### 7.3 Tarapacá 2005

#### 7.3.1 Desplazamientos

##### 7.3.1.1 Verticales

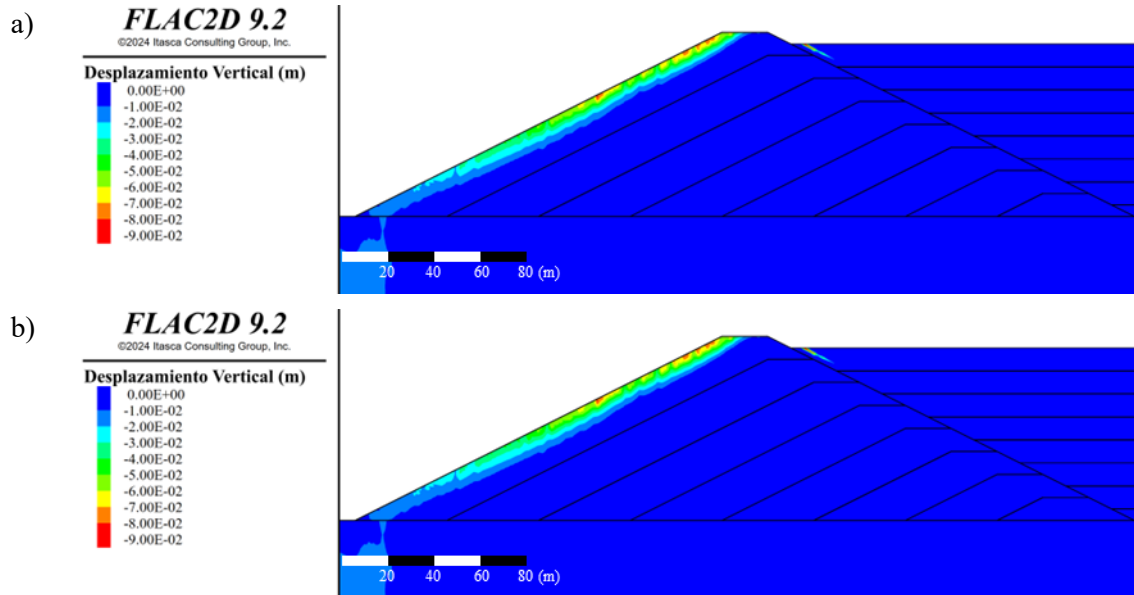


Figura 37: Perfil de desplazamientos verticales: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).

##### 7.3.1.2 Horizontales

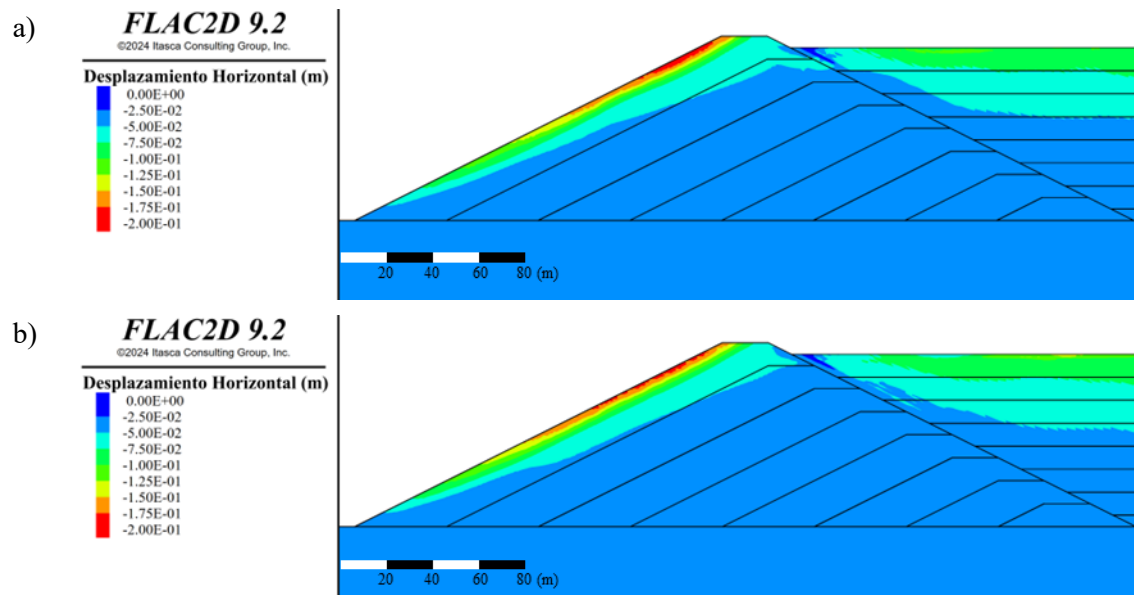


Figura 38: Perfil de desplazamientos horizontales: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).

### 7.3.1.3 Totales

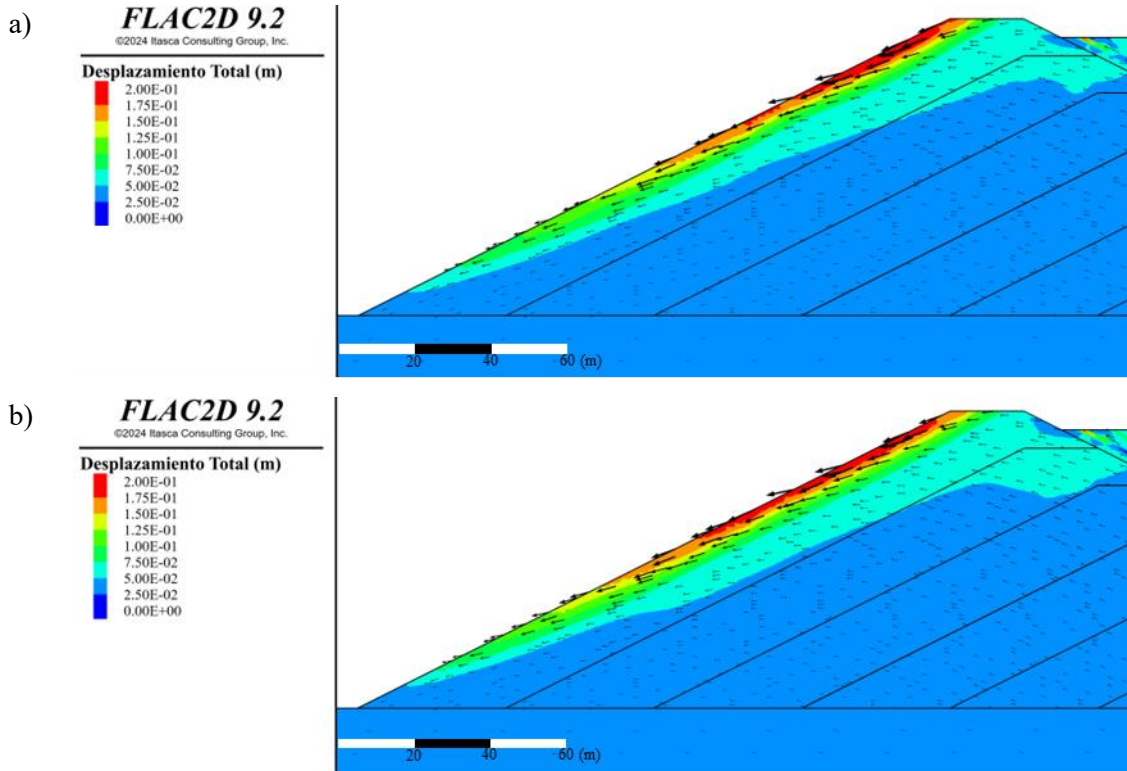
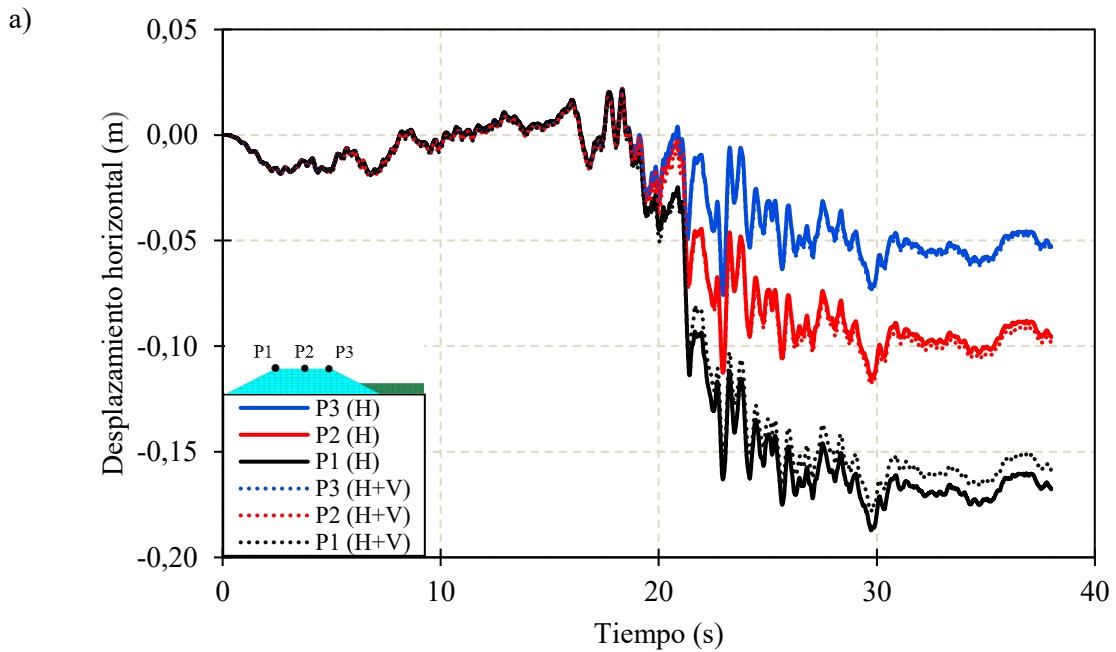
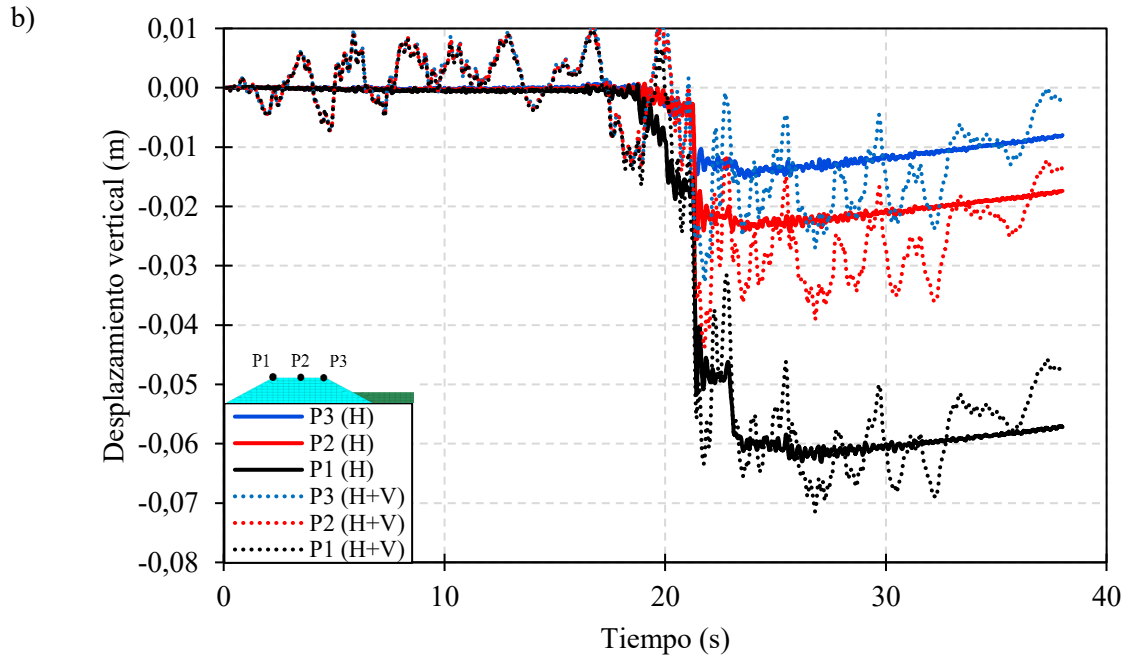


Figura 39: Desplazamiento total incluyendo vectores de desplazamientos: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).

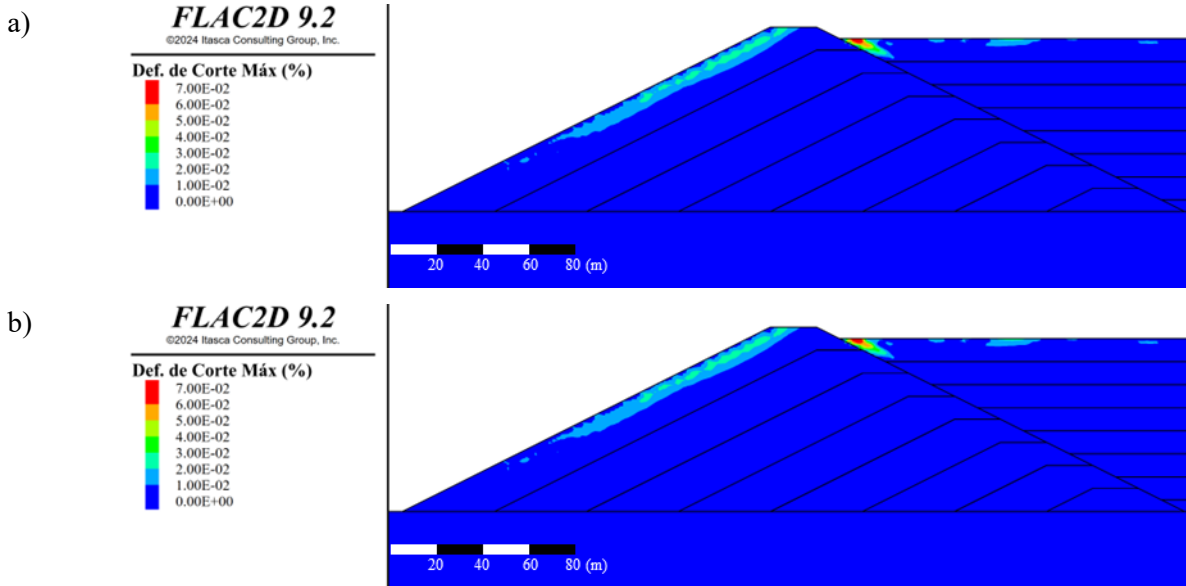
### 7.3.1.4 Coronamiento





**Figura 40: Desplazamientos en el coronamiento para casos considerando solo la componente horizontal (H) y ambas componentes en simultaneo (H+V): Desplazamientos horizontales (a), desplazamientos verticales (b)**

### 7.3.2 Deformaciones por corte (%)



**Figura 41: Deformaciones de corte máximas: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).**

### 7.3.3 Espectros de respuesta

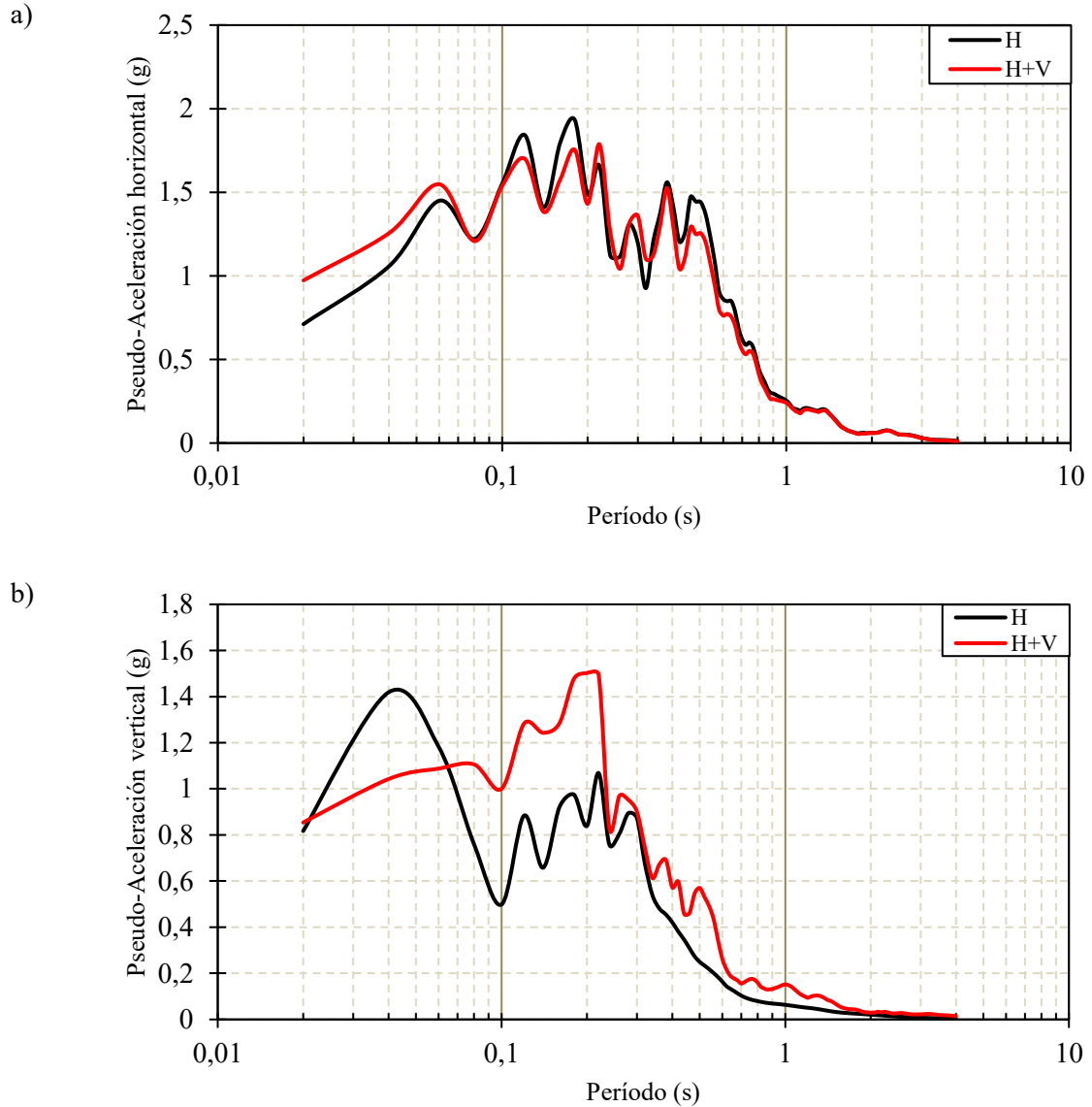
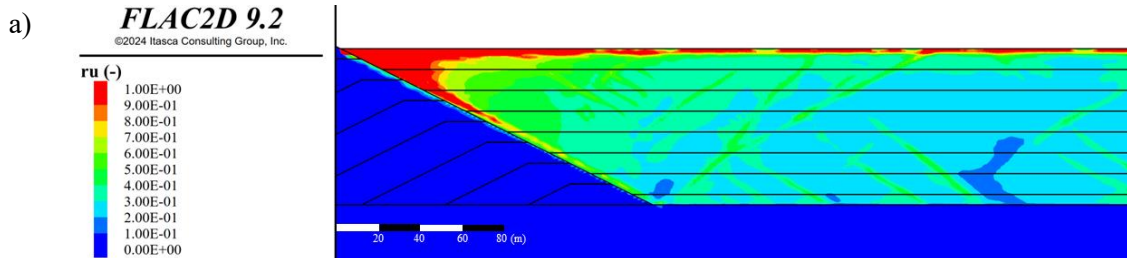


Figura 42: Espectro de respuesta en el centro del coronamiento, pseudo-aceleraciones horizontales (a) y pseudo-aceleraciones verticales (b).

### 7.3.4 Exceso de presión de poros



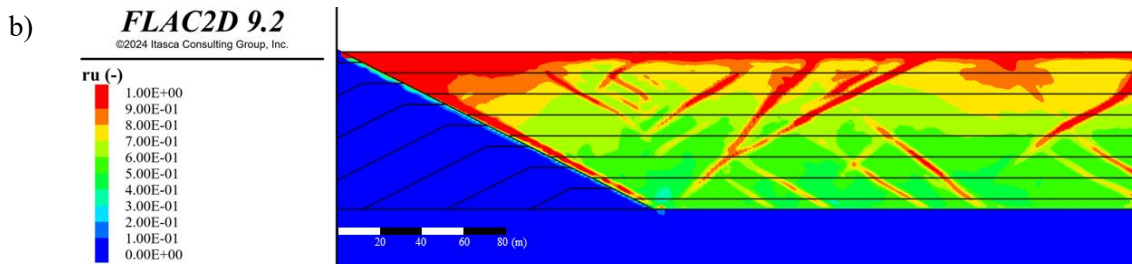


Figura 43: Exceso de presión de poros: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).

## 7.4 Illapel 2015

### 7.4.1 Desplazamientos

#### 7.4.1.1 Verticales

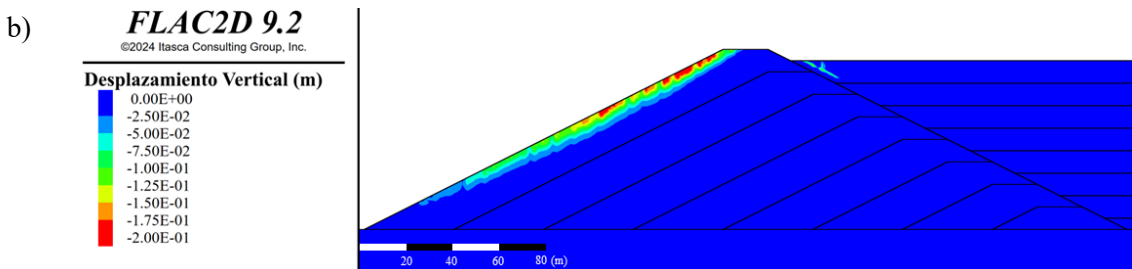
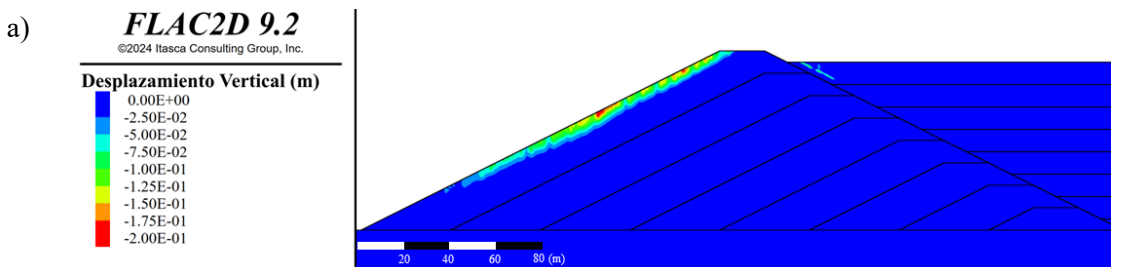


Figura 44: Perfil de desplazamientos verticales: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).

#### 7.4.1.2 Horizontales

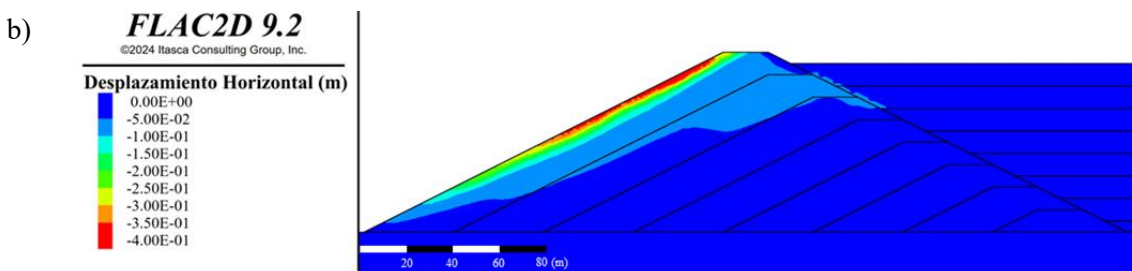
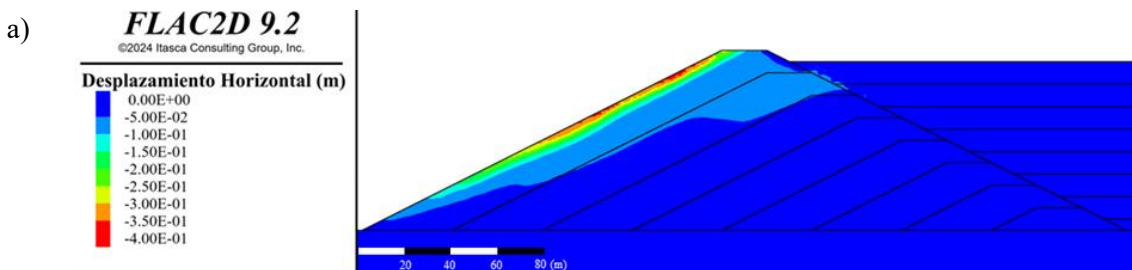


Figura 45: Perfil de desplazamientos horizontales: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).

7.4.1.3 Totales

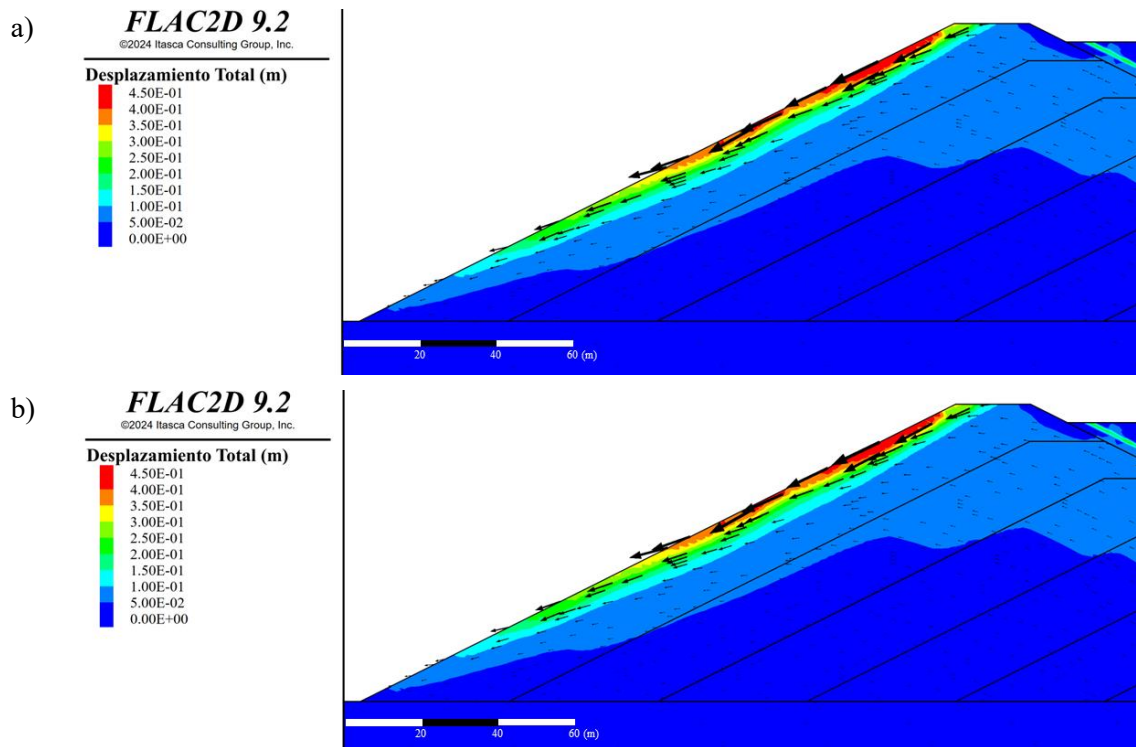
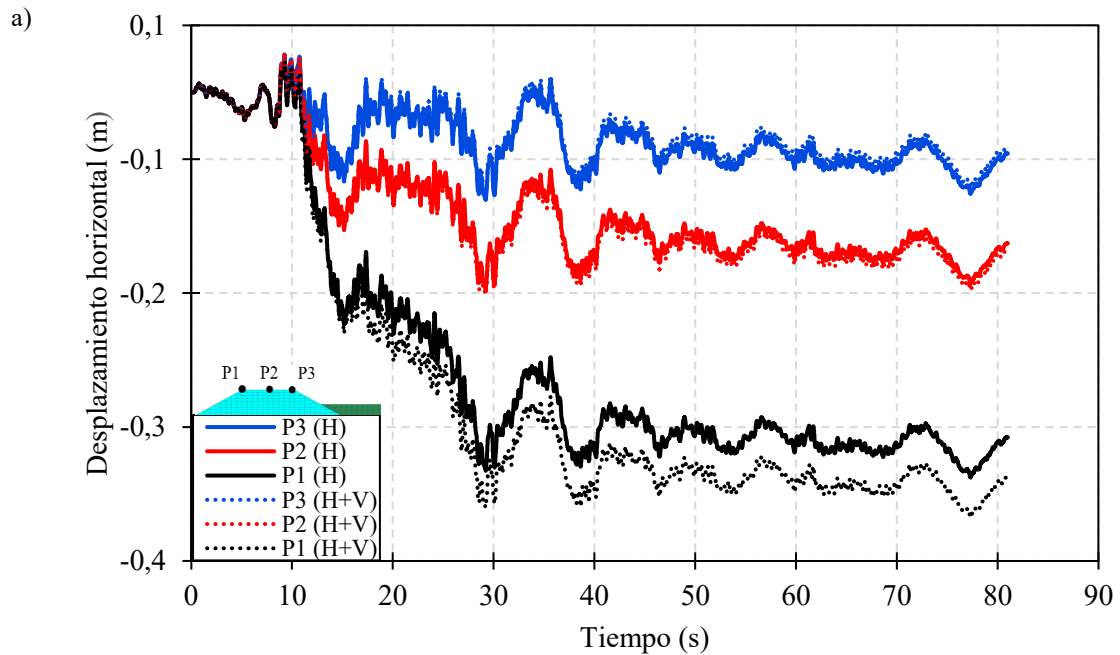
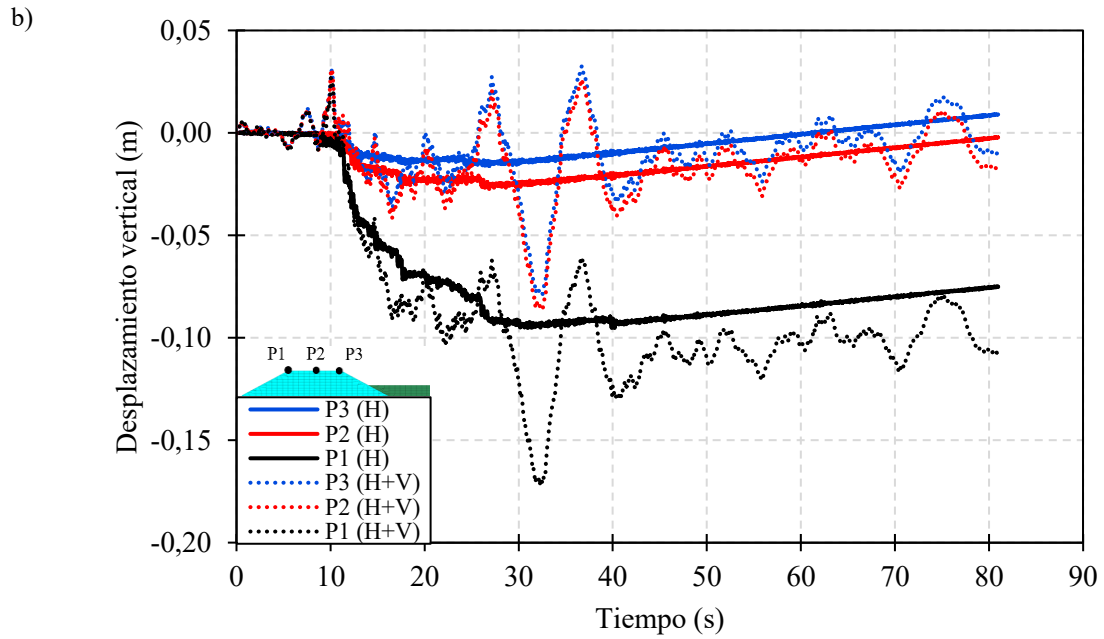


Figura 46: Desplazamiento total incluyendo vectores de desplazamientos: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).

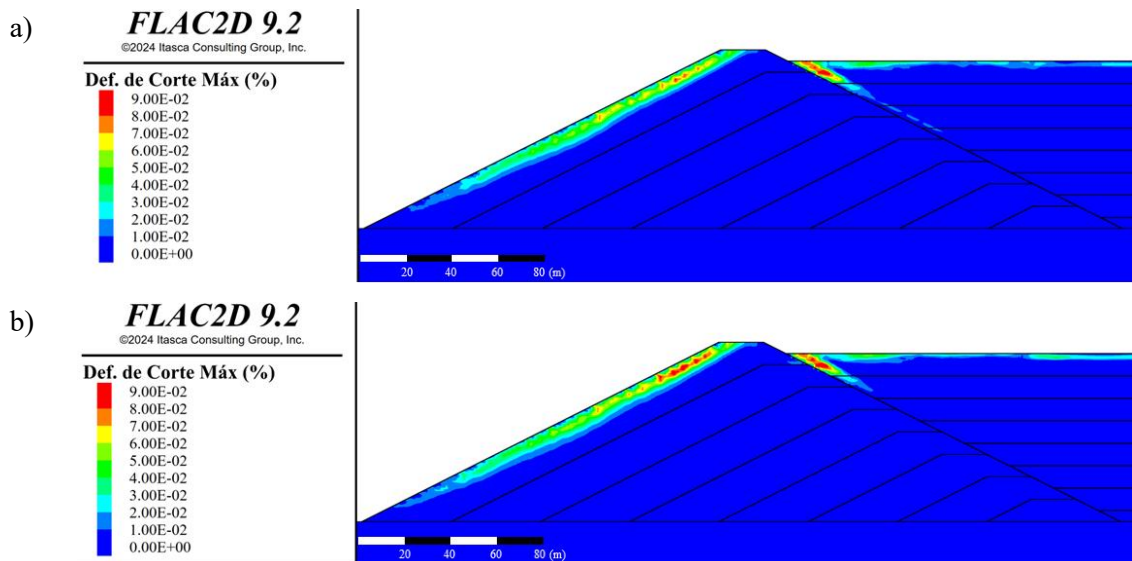
7.4.1.4 Coronamiento





**Figura 47: Desplazamientos en el coronamiento para casos considerando solo la componente horizontal (H) y ambas componentes en simultaneo (H+V): Desplazamientos horizontales (a), desplazamientos verticales (b).**

#### 7.4.2 Deformación de corte (%)



**Figura 48: Deformaciones de corte máximas: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).**

### 7.4.3 Espectros de respuesta

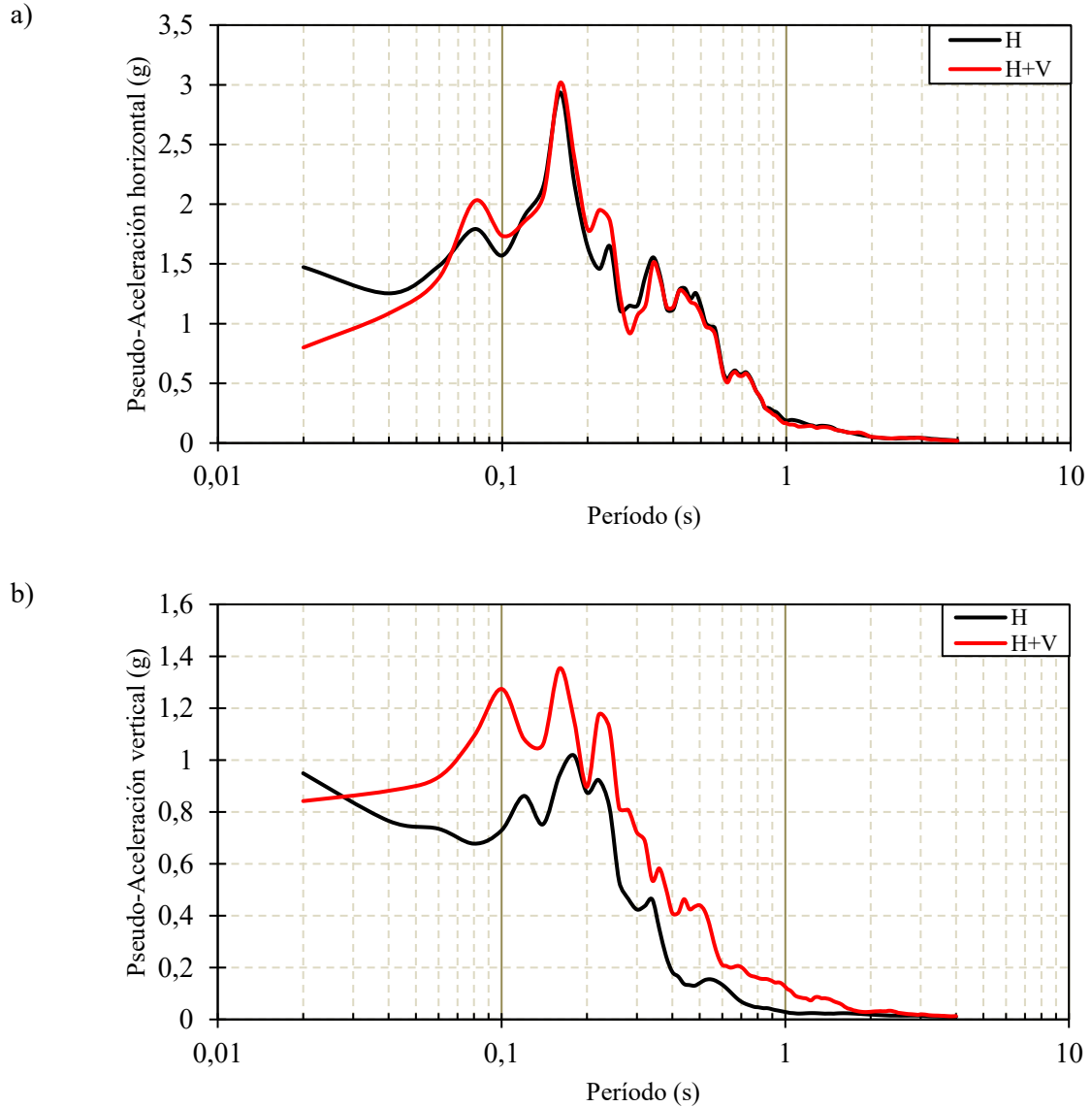
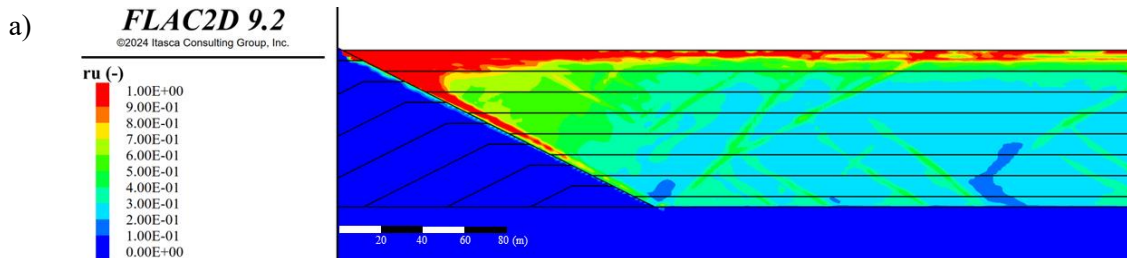
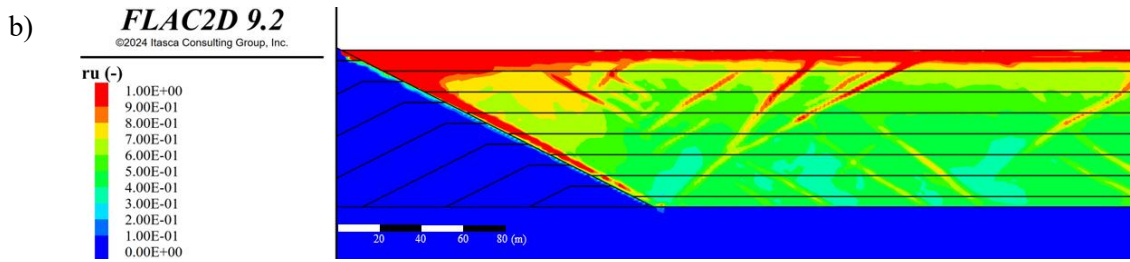


Figura 49: Espectro de respuesta en el centro del coronamiento, pseudo-aceleraciones horizontales (a) y pseudo-aceleraciones verticales (b).

### 7.4.4 Exceso de presión de poros





**Figura 50: Exceso de presión de poros: Componente horizontal (a), componente horizontal y vertical en simultaneo (b).**

## 7.5 Desplazamiento coronamiento

### 7.5.1 Aguas abajo (P1)

**Tabla 12: Resumen desplazamientos aguas abajo en el coronamiento (P1).**

	Unid.	Maule	Tarapacá	Illapel	MCE	MCE V=2/3H
Asentamiento máx. (H)	m	1.49	0.06	0.10	3.89	3.89
Asentamiento máx. (H+V)	m	1.59	0.07	0.17	4.41	4.70
Desplazamiento horizontal (H)	m	3.06	0.19	0.29	7.03	7.03
Desplazamiento horizontal (H+V)	m	3.11	0.18	0.32	7.48	8.64
Dif. Asentamiento	%	6.7	16.7	70	13.4	20.8
Dif. Desplazamiento	%	1.6	-5.3	5.5	6.4	22.9

### 7.5.2 Centro del coronamiento (P2)

**Tabla 13 Resumen desplazamientos centro del coronamiento (P2)**

	Unid.	Maule	Tarapacá	Illapel	MCE	MCE V=2/3H
Asentamiento máx. (H)	m	0,82	0,03	0,03	2,72	2,72
Asentamiento máx. (H+V)	m	0,84	0,04	0,09	3,11	3,52
Desplazamiento horizontal (H)	m	1,81	0,12	0,15	4,99	4,99
Desplazamiento horizontal (H+V)	m	1,79	0,12	0,15	5,48	6,55
Dif. Asentamiento	%	2,4	33,3	200	14,3	29,4
Dif. Desplazamiento	%	-1,1	0,0	0,0	9,8	31,3

### 7.5.3 Aguas arriba (P3)

**Tabla 14: Resumen desplazamientos aguas arriba en el coronamiento (P3).**

	Unid.	Maule	Tarapacá	Illapel	MCE	MCE V=2/3H
Asentamiento máx. (H)	m	0,33	0,02	0,02	1,60	1,60
Asentamiento máx. (H+V)	m	0,31	0,03	0,08	1,94	2,26
Desplazamiento horizontal (H)	m	0,64	0,08	0,08	2,76	2,76
Desplazamiento horizontal (H+V)	m	0,57	0,07	0,08	3,27	4,34
Dif. Asentamiento	%	-6,1	50	400	21,3	41,3
Dif. Desplazamiento	%	-10,9	-12,5	0,0	18,5	57,2