

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Modelado Numérico de la Evaporación y
Comportamiento Sísmico de Muros de Tierra Armada
bajo Gradientes de Saturación**

David Patricio Bolaños Abarca

Ingeniería Civil

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Civil

Quito, 12 de diciembre de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Modelado Numérico de la Evaporación y Comportamiento Sísmico de Muros de Tierra Armada bajo Gradientes de Saturación

David Patricio Bolaños Abarca

Nombre del profesor, Título académico

Juan Pablo Villacreses Cabrera, PhD, Ing

Quito, 12 de diciembre de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: David Patricio Bolaños Abarca

Código: 00205922

Cédula de identidad: 1751043314

Lugar y fecha: Quito, 30 de noviembre de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

El uso de materiales de tierra compactada en construcción está resurgiendo debido a su sostenibilidad y baja huella de carbono. Sin embargo, su respuesta ante condiciones extremas, como gradientes de humedad y cargas sísmicas, sigue siendo un desafío técnico. Este estudio analiza un muro de tierra compactada que experimenta gradientes de saturación generados por secado desigual y evalúa su comportamiento sísmico mediante simulaciones numéricas en OpenSeesPy. Los resultados muestran que los estados de mayor saturación amplifican las aceleraciones y desplazamientos, mientras que los gradientes intermedios generan respuestas dinámicas más complejas debido a la heterogeneidad en las propiedades mecánicas. Estas observaciones contribuyen al diseño sismo-resistente y a la optimización de estructuras sostenibles de tierra.

Palabras clave: gradiente de saturación, tierra compactada, simulación sísmica, propiedades mecánicas, sostenibilidad, OpenSeesPy, sostenibilidad

ABSTRACT

The use of compacted earth materials in construction is resurging due to their sustainability and low carbon footprint. However, their response under extreme conditions, such as moisture gradients and seismic loads, remains a technical challenge. This study analyzes a compacted earth wall subjected to saturation gradients caused by uneven drying and evaluates its seismic behavior using numerical simulations in OpenSeesPy. Results show that highly saturated states amplify accelerations and displacements, while intermediate gradients generate more complex dynamic responses due to mechanical property heterogeneity. These findings contribute to earthquake-resistant design and the optimization of sustainable earth structures.

Keywords: saturation gradient, compacted earth, seismic simulation, mechanical properties, sustainability, OpenSeesPy, earthquake-resistant design.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	12
Contexto y relevancia	12
Planteamiento del problema	12
Justificación	13
Objetivos	13
Desarrollo del Tema.....	15
Marco Teórico	15
Contexto y Relevancia	15
Estudios Previos sobre Secado y Gradientes en Muros de Tierra	15
Impacto de la Saturación en Propiedades Mecánicas del Suelo	15
Presentación del Material.....	16
Tipo de Suelo y Granulometría.....	16
Curva de Retención de Humedad	17
Propiedades Mecánicas	18
Metodología	18
Modelo del Muro	18
Dimensiones y representación	18
Simulación de Secado del Muro	20
Discretización Espacial y Temporal	20
Condiciones de Borde	20
Fase de Secado.....	21
Explicación de cómo el muro se seca más de un lado debido a la exposición solar.	21

Cambios de saturación a lo largo del tiempo y su impacto en propiedades mecánicas.....	21
Modelo Finito.....	22
Discretización Nodal y de Elementos Finitos	22
Definición de Materiales y Propiedades	22
Presentación de los Sismos Utilizados.....	23
Simulación Sísmica en Diferentes Condiciones	24
1ra Fase: Condiciones Saturadas (WET) y Secas (DRY).....	24
2da Fase: Condiciones con Gradiente de Saturación a lo Largo del Tiempo	25
Resultados y Análisis	25
Evolución del Secado del Muro.....	25
Cambios en la Saturación a lo Largo del Tiempo.....	25
Propiedades Mecánicas en Función del Tiempo de Secado	26
Resultados de la Simulación Sísmica en condiciones WET y DRY	26
Respuesta en Condiciones WET y DRY	26
Comparación de FFT entre Condiciones WET y DRY para Cada Sismo	28
Desplazamientos y Aceleraciones Máximos entre Condiciones WET y DRY	28
Resultados de la Simulación Sísmica en Tiempos de Secado Específicos.....	29
Acelerogramas de Loma Prieta a Distintos Tiempos de Secado	29
Análisis de Aceleración Máxima e Intensidad de Área.....	30
Comparación de FFT y Respuesta del Muro según el Gradiente de Saturación	31
Desplazamientos en las Esquinas Superiores del Muro.....	32
Desplazamiento Y vs X	34
Gráfica de Reacción en la Base vs Desplazamiento en la Parte Superior	35
Conclusiones	36

Referencias Bibliográficas.....38

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Granulometría del material	17
<i>Figura 2.</i> Curva de retención de agua.....	17
<i>Figura 3.</i> Ilustración de una estructura que tiene un muro de tierra compactada donde un lado le llega el sol directamente	19
<i>Figura 4.</i> Ilustración del gradiente de saturaciones dentro de un muro secándose principalmente del lado naranja: a) inicio, b) etapa intermedia, y c) etapa avanzada.....	19
<i>Figura 5.</i> a) Modelo FEM realizado en GMSH y b) un acercamiento para observar más los nodos y las capas divisoras a lo largo del ancho del muro.....	22
<i>Figura 6.</i> Acelerograma y FFT de a) Loma Prieta, b) Chi-Chi y c) Landers	24
<i>Figura 7.</i> Evolución de saturación de una pared que se seca sólo de un lado.....	25
<i>Figura 8.</i> Estado de esfuerzos y propiedades mecánicas del muro secándose, a) succión, b) módulo de corte y c) peso específico aparente.....	26
<i>Figura 9.</i> Respuesta de aceleración en el nodo central de la cara superior del muro y su punto máximo para los registros sísmicos de a) Loma Prieta, b) Chi-Chi y c) Landers.....	27
<i>Figura 10.</i> Comparación de frecuencias dominantes (FFT) entre condiciones WET y DRY para los registros de a) Loma Prieta, b) Chi-Chi y c) Landers.....	28
<i>Figura 11.</i> a) Aceleraciones y b) desplazamientos máximos absolutos en el nodo central bajo condiciones WET y DRY para los registros sísmicos seleccionados.	29
<i>Figura 12.</i> Acelerogramas obtenidos en el nodo central de la cara superior del muro para tiempos de secado específicos: a) 0, b) 500, c) 1000 y d) 4000 horas).....	30
<i>Figura 13.</i> a) Aceleraciones máximas e b) intensidades de área de los acelerogramas para los diferentes tiempos de secado.....	31

<i>Figura 14.</i> Comparación de frecuencias dominantes (FFT) según gradiente de saturación en tiempos específicos de secado.....	32
<i>Figura 15.</i> Desplazamientos máximos en las esquinas superiores del muro tras sismo de Loma Prieta en a) 0 Horas, b) 500 Horas, c) 1000 Horas y d) 4000 Horas	34
<i>Figura 16.</i> Máximos desplazamientos en los diferentes tiempos de secado del muro de a) X y b) Y.....	34
<i>Figura 17.</i> Desplazamiento Y vs X para a) 0, b) 500, c) 2000 y d) 4000 horas.....	35
<i>Figura 18.</i> Reacción en la base del muro vs desplazamiento en la cara superior en X para tiempos de secado: a) 0, b) 500, c) 2000 y d) 4000 horas.....	35

INTRODUCCIÓN

Contexto y relevancia

Los muros de tierra han sido ampliamente utilizados como materiales de construcción a lo largo de la historia, desde civilizaciones antiguas hasta comunidades rurales en la actualidad, donde los materiales locales y las técnicas tradicionales siguen siendo comunes (El-Shorbagy, 2010). Ejemplos de estas construcciones incluyen viviendas, edificios patrimoniales y estructuras modernas que buscan reducir su huella de carbono. Materiales como el adobe, el bahareque y la tierra compactada, permiten aprovechar el suelo disponible en el lugar, ofreciendo una alternativa de bajo impacto ambiental frente a materiales convencionales como el concreto o el acero (Gallipoli, Bruno, Perlot, & Salmon, 2014). Sin embargo, un desafío clave para los muros de tierra radica en la variabilidad de sus propiedades mecánicas, especialmente en función de su grado de saturación (Bui, Morel, Hans, & Walker, 2014). Debido a la influencia de factores como la exposición al sol, el drenaje desigual y otros efectos ambientales, es común que estos muros desarrollen gradientes de humedad. Estas variaciones en la saturación modifican propiedades esenciales como la densidad, el módulo de corte y la succión, lo cual afecta su respuesta estructural y particularmente su comportamiento ante cargas sísmicas. Entender cómo los gradientes de humedad internos influyen en la estabilidad sísmica de los muros de tierra es fundamental para optimizar su diseño y ampliar su uso en zonas sísmicamente activas, como lo es en Ecuador.

Planteamiento del problema

Dado que las propiedades mecánicas del suelo cambian significativamente con la humedad, es crucial investigar el comportamiento de los muros de tierra sometidos a gradientes de saturación y cargas sísmicas. Muchas estructuras de tierra antiguas y modernas

que presenten variaciones internas de humedad podrían tener comprometida su integridad ante eventos sísmicos. Esto plantea preguntas sobre cómo diseñar muros de tierra con gradientes de saturación controlados o mitigados, o bien cómo evaluar la seguridad de las construcciones existentes con saturación desigual. Esta investigación se enfoca en evaluar las respuestas estructurales de un muro de tierra compactada bajo distintas condiciones de humedad, simulando una exposición a sismos para determinar los efectos de los gradientes de saturación internos.

Justificación

El estudio de los muros de tierra con gradientes de humedad es relevante en la ingeniería civil actual debido al resurgimiento de estos materiales como alternativas sostenibles. Dado que las propiedades mecánicas del suelo varían significativamente con la saturación, entender cómo los gradientes afectan la respuesta sísmica de un muro es clave para diseñar estructuras seguras y sostenibles. Con este fin, la presente investigación plantea los siguientes objetivos, orientados a modelar, validar y analizar el comportamiento dinámico del muro bajo diversas condiciones de humedad.

Objetivos

Objetivo general

Analizar el comportamiento estructural de un muro de tierra compactada con gradientes de saturación al ser sometido a diferentes registros sísmicos, para entender los efectos de la humedad diferencial sobre su estabilidad y capacidad de resistencia sísmica.

Objetivos específicos

- Modelar el proceso de secado desigual del muro, generando gradientes de saturación con variación espacial y temporal.

- Validar que el modelo sea coherente al utilizar diferentes registros sísmicos bajo condiciones extremas de saturación homogénea (WET y DRY).
- Evaluar el impacto de los gradientes de saturación generados en el comportamiento sísmico del muro, usando el modelo de simulación para analizar variables como la aceleración y el desplazamiento en diferentes condiciones de secado.

DESARROLLO DEL TEMA

Marco Teórico

Contexto y Relevancia

Los muros de tierra han sido empleados en la construcción desde tiempos antiguos debido a su bajo costo, disponibilidad y eficiencia energética. En las últimas décadas, el interés en estos materiales ha resurgido gracias a sus beneficios ambientales, incluyendo su baja huella de carbono y su capacidad de regulación térmica e higrométrica (Chauhan, El Hajjar, Prime, & Plé, 2019). Este material, sin embargo, es susceptible a cambios en sus propiedades mecánicas debido a la humedad y la exposición ambiental, lo cual es crítico para su aplicación en áreas sísmicas (Ibagón, Caicedo, Camacho, Villacreses, & Yépez, 2023).

Estudios Previos sobre Secado y Gradientes en Muros de Tierra

Estudios como el de Villacreses et al. (2021) analizan la influencia de los gradientes de saturación en la respuesta sísmica de muros de tierra compactada. En este trabajo, se observa que la variabilidad en la humedad afecta significativamente la rigidez y resistencia del material, destacando la necesidad de evaluar las condiciones de humedad en el diseño y la preservación de estructuras de tierra en zonas sísmicas (Ibagón, Caicedo, Camacho, Villacreses, & Yépez, 2023). Además, Chauhan et al. (2019) exploran cómo el secado desigual y los gradientes de humedad impactan la cohesión y ángulo de fricción en muros de tierra, identificando la succión como un factor clave que incrementa la resistencia al secado, lo cual también debe tenerse en cuenta en el modelado estructural.

Impacto de la Saturación en Propiedades Mecánicas del Suelo

Las propiedades mecánicas de los muros de tierra, como la cohesión y el módulo de elasticidad, dependen fuertemente de la saturación y su variación. Beckett y Augarde (2012) muestran cómo los cambios en la humedad afectan la rigidez y resistencia de los muros de

tierra, subrayando que las muestras con baja succión presentan una respuesta frágil ante cargas sísmicas, mientras que aquellas con alta succión muestran un comportamiento más dúctil y mayor resistencia (Ibagón, Caicedo, Camacho, Villacreses, & Yépez, 2023) (Chauhan, El Hajjar, Prime, & Plé, 2019). Estudios adicionales, como los de Jaquin et al. (2009) y Bui et al. (2014), confirman que las propiedades mecánicas, especialmente la cohesión, disminuyen con la saturación, lo cual puede comprometer la integridad estructural en eventos sísmicos (Chauhan, El Hajjar, Prime, & Plé, 2019).

Presentación del Material.

Esta investigación utiliza el mismo material y modelo experimental desarrollado en estudios previos de Villacreses et al. (2021) y en trabajos complementarios, con el fin de analizar el comportamiento estructural del muro de tierra bajo un gradiente de humedad variable a lo largo de su ancho.

Tipo de Suelo y Granulometría

El suelo utilizado es una arcilla de alta plasticidad, clasificada como **CH** según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (USCS). Presenta un límite líquido del 87% y un límite plástico del 31%, lo que proporciona un índice de plasticidad de 56%. Las propiedades de compactación del suelo fueron obtenidas a partir del ensayo Proctor estándar, estableciendo un contenido óptimo de agua del 31.3% y una densidad seca máxima de 1.35 g/cm³, lo cual asegura que el suelo compactado tenga la resistencia y rigidez necesarias para el análisis sísmico.

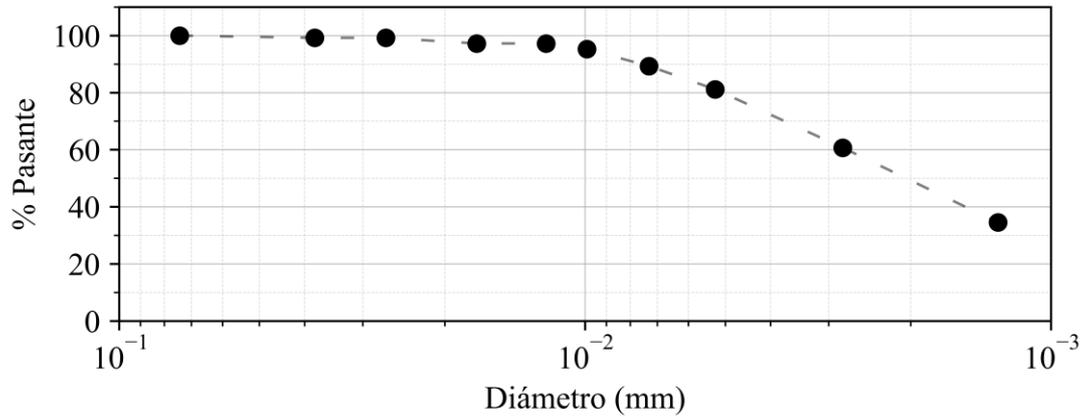


Figura 1. Granulometría del material

Curva de Retención de Humedad

La curva de retención de humedad determinada experimentalmente en la investigación de Villacreses, Granados, Caicedo y Yépez (2021), que utilizó el modelo de Fredlund (1994), que permite relacionar los estados de esfuerzos de la succión del suelo con su grado de saturación es la siguiente:

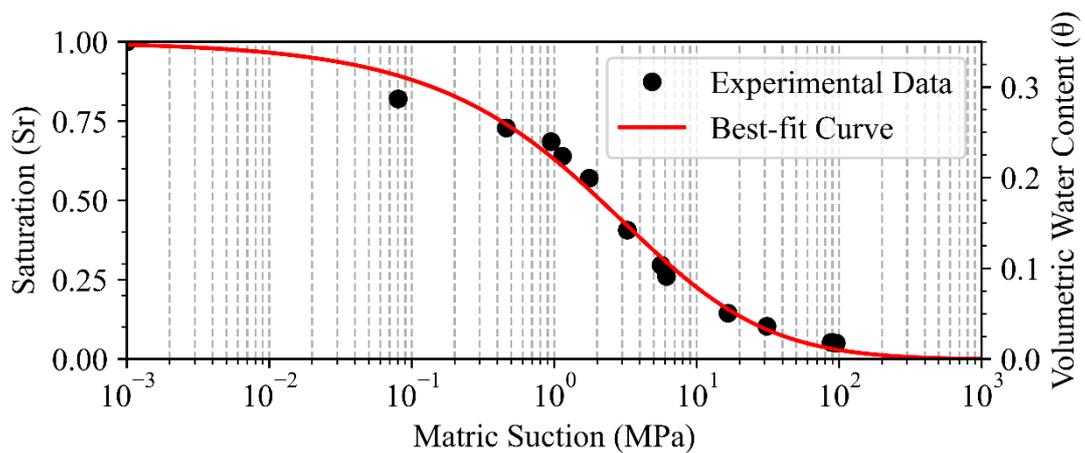


Figura 2. Curva de retención de agua

A partir de esta curva, es posible encontrar la relación de la humedad interna del muro con la succión, y esta a su vez con otras propiedades mecánicas, permitiendo modelar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de secado.

Propiedades Mecánicas

El suelo tiene propiedades mecánicas como la densidad, el módulo de corte, el módulo de elasticidad y la succión, que desempeñan un papel fundamental en su respuesta estructural. Las propiedades mecánicas se las obtuvo mediante las gráficas relacionan la succión matricial con el módulo de corte máximo, densidad aparente y la envolvente de falla extendida del plano de corte (Villacreses, Granados, Caicedo, Torres-Rodas, & Yépez, 2021, pág. 5) y para. de nuestro muro fueron evaluadas en condiciones de humedad controlada, empleando un reómetro de corte dinámico para medir el módulo de corte máximo y la degradación del módulo de corte bajo diferentes niveles de succión. La correlación entre la succión y las propiedades mecánicas se utiliza para modelar el comportamiento estructural del muro en función del gradiente de saturación, permitiendo una representación precisa de su respuesta sísmica.

Metodología

Modelo del Muro

Dimensiones y representación

El modelo del muro de tierra compactada tiene dimensiones de 50 cm de ancho, 250 cm de profundidad, y 240 cm de altura. Inicialmente, el muro se encuentra completamente saturado, pero, con el tiempo, un lado se seca más rápidamente que el resto debido a la exposición directa a la radiación solar. Este escenario representa una pared de tierra compactada donde uno de los lados está expuesto al sol, mientras los demás permanecen protegidos (Figura 3).

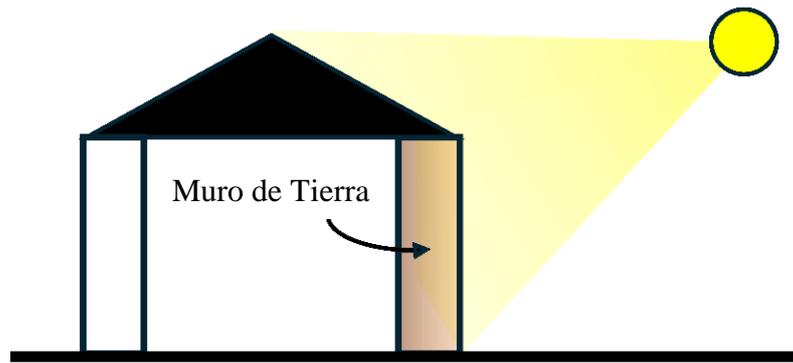


Figura 3. Ilustración de una estructura que tiene un muro de tierra compactada donde un lado le llega el sol directamente

El secado desigual genera un gradiente de saturación a lo largo del ancho del muro, que varía dependiendo del tiempo transcurrido. Este gradiente provoca cambios significativos en las propiedades mecánicas del suelo, como la succión y el módulo de elasticidad. La *Figura 4* ilustra cómo evoluciona este gradiente de saturación desde el inicio del proceso de secado hasta sus etapas más avanzadas.

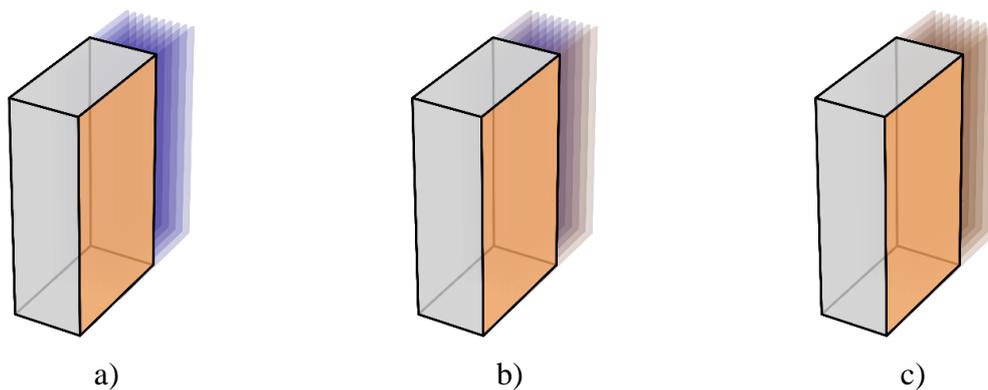


Figura 4. Ilustración del gradiente de saturaciones dentro de un muro secándose principalmente del lado naranja: a) inicio, b) etapa intermedia, y c) etapa avanzada.

Dado que un evento sísmico puede ocurrir en cualquier momento durante el proceso de secado, es fundamental entender el comportamiento del muro bajo diferentes gradientes de

saturación. Por esta razón, la presente investigación analiza el muro en distintos tiempos de secado, aplicando un mismo registro sísmico para evaluar cómo el gradiente afecta su respuesta estructural.

Simulación de Secado del Muro

Discretización Espacial y Temporal

Para simular el proceso de secado en el muro, se implementó una discretización espacial y una discretización temporal implícita. La discretización espacial consistió en dividir el dominio del muro en una malla de celdas o elementos, lo cual permite calcular los cambios en el contenido de agua y el flujo en cada sección del muro. Esta aproximación por elementos proporciona la flexibilidad necesaria para modelar diferencias espaciales en el secado, particularmente en los bordes del muro.

La discretización temporal se realizó con una formulación implícita, lo cual mejora la estabilidad numérica, especialmente en simulaciones de larga duración. En cada paso temporal, se calcula el flujo de agua en función de los valores de saturación y el potencial de cada celda, lo cual es crucial para capturar la evolución gradual del secado durante los 6 meses (aproximadamente 4300 horas) que duró la simulación.

Condiciones de Borde

Para representar el secado diferencial, se configuraron condiciones de borde específicas en cada lado del muro:

Condición de Neumann en el borde derecho: En el borde derecho, se impuso una **condición de flujo**, lo cual representa un secado acelerado. Este flujo de salida constante provoca una disminución rápida de la saturación en el lado derecho del muro. Este borde se expone a un secado más rápido, lo que representa la evaporación por exposición solar.

Condición de pérdida de potencia en el borde izquierdo: El borde izquierdo también está sujeto a una condición de secado, aunque a un ritmo más moderado. En cada paso de tiempo, se impuso una pérdida de potencial de 10 kPa. Esta condición provoca una migración de agua desde las zonas internas del muro hacia el borde izquierdo, secándolo gradualmente, pero a un ritmo más lento que el borde derecho, representando el lado que no está expuesto al sol pero que de igual manera se seca.

Fase de Secado

Explicación de cómo el muro se seca más de un lado debido a la exposición solar.

Durante la fase de secado, el muro experimenta un secado diferencial: el borde derecho pierde agua a un ritmo más acelerado debido a la condición de flujo, mientras que el borde izquierdo permanece húmedo hasta que también empieza a secarse por la migración del agua causados por el secado del borde derecho. Esta diferencia en la velocidad de secado entre los dos bordes genera un gradiente de saturación en el interior del muro, donde el contenido de agua disminuye más rápidamente en el borde derecho y de manera más gradual hacia el borde izquierdo. Este efecto refleja la simulación de exposición solar desigual.

Cambios de saturación a lo largo del tiempo y su impacto en propiedades mecánicas.

A lo largo de la simulación, se monitoreó la evolución del contenido de agua en diferentes puntos del muro en función del tiempo. Esto permitió obtener el perfil de saturación en el muro y observar cómo varía la humedad en secciones de 5 cm a lo largo del eje Y, como se lo puede observar en Figura 7. La saturación promedio de cada sección del muro proporciona información esencial sobre las condiciones de humedad en diferentes zonas y en diferentes momentos del tiempo.

A partir de estos perfiles de saturación, se calcularon otras propiedades mecánicas del muro (por ejemplo, la rigidez y la resistencia), basadas en la relación entre el contenido de agua y las características del suelo, como se indicó en 0. Estas propiedades son críticas para etapas posteriores, como la simulación sísmica, ya que el grado de saturación influye directamente en la respuesta mecánica del muro.

Modelo Finito

Discretización Nodal y de Elementos Finitos

Para construir el modelo de elementos finitos del muro, se utilizó el software Gmsh, en el cual el muro fue dividido en 10 secciones a lo largo de su ancho (en la dirección Y), creando un total de 10 volúmenes de 5 cm cada uno. Esta discretización permite representar gradientes de saturación y variaciones de propiedades mecánicas de manera precisa a lo largo del ancho del muro (ver Figura 5).

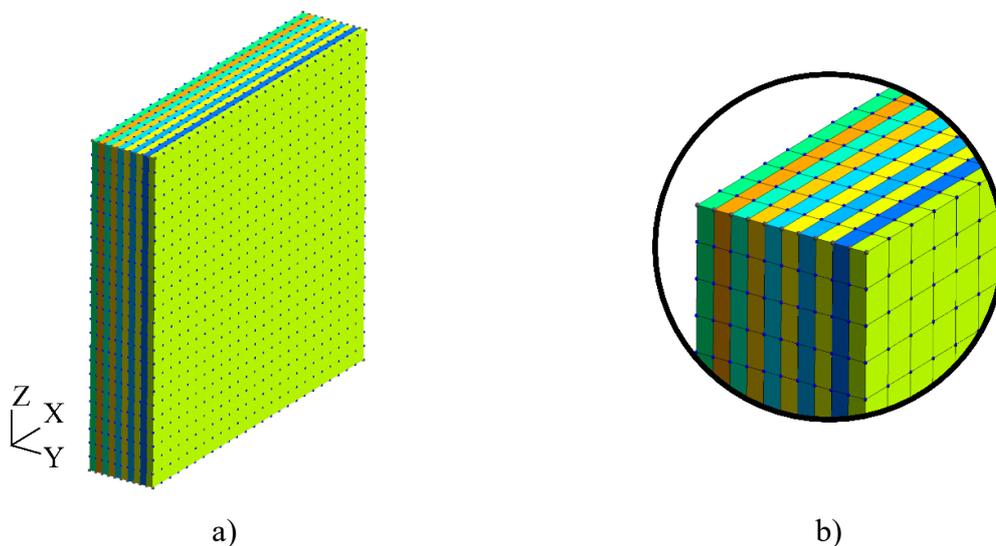


Figura 5. a) Modelo FEM realizado en GMSH y b) un acercamiento para observar más los nodos y las capas divisoras a lo largo del ancho del muro

Definición de Materiales y Propiedades

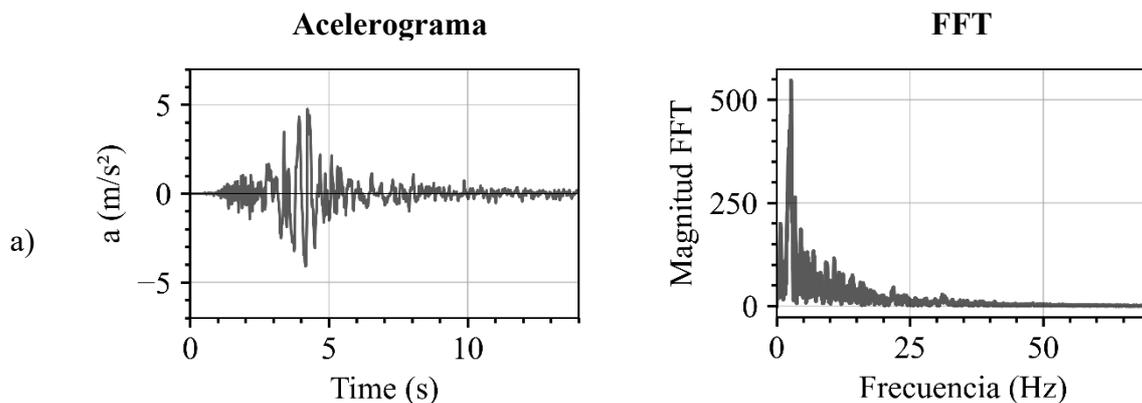
Las propiedades mecánicas y niveles de saturación promedio obtenidos para cada sección de 5 cm (obtenidas en 0) se asignaron a cada volumen del modelo. Este enfoque permite representar el gradiente de saturación y las propiedades mecánicas no homogéneas a lo largo del ancho del muro, donde cada volumen presenta un nivel de rigidez y succión acorde con la saturación correspondiente.

Presentación de los Sismos Utilizados

Para la simulación sísmica se buscó registros donde el suelo haya tenido poca o nula contaminación, que hayan causado daños significativos para evaluar estructuras en condiciones reales de peligro y además que sean registros ampliamente documentados, lo que asegura que sus características sean reproducibles en simulaciones. Los registros sísmicos escogidos para la primera fase de la simulación sísmica fueron:

- a) Loma Prieta, EE. UU. (1989)
- b) Chi-Chi, Taiwán (1999)
- c) Landers, EE. UU. (1992)

Cada sismo fue procesado para obtener sus formas de onda y transformadas de Fourier (FFT) (Figura 6), lo cual permite analizar la frecuencia dominante y la amplitud de los registros sísmicos.



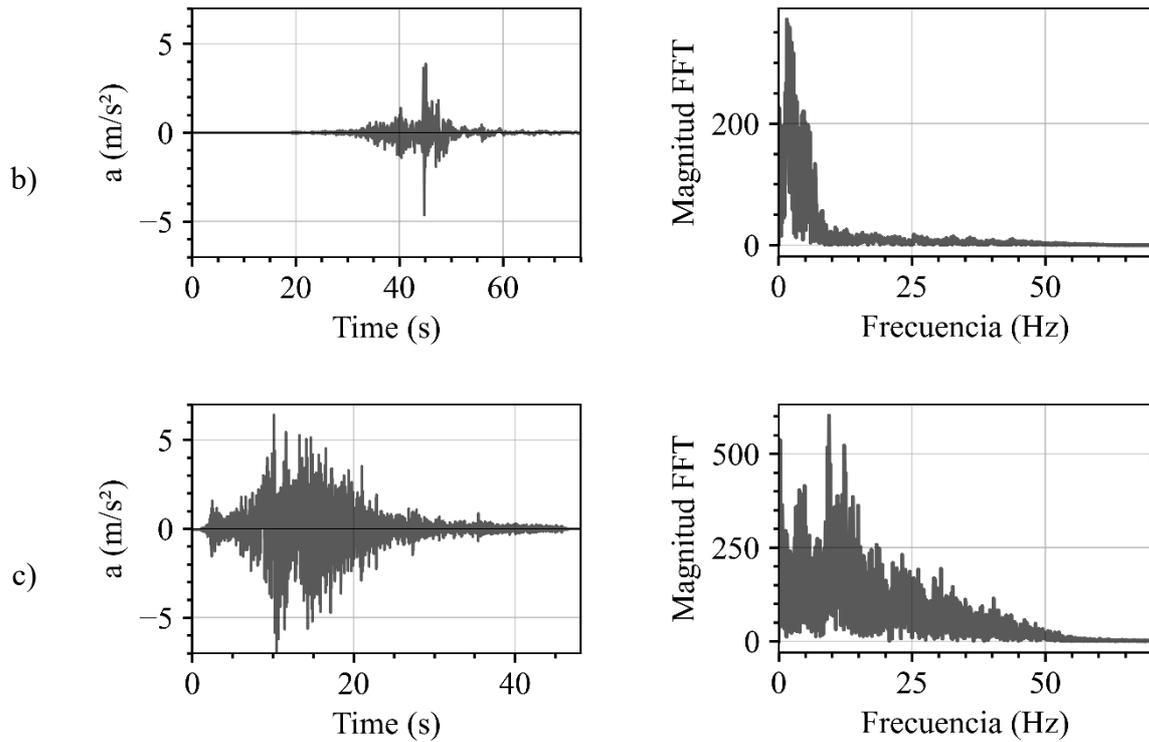


Figura 6. Acelerograma y FFT de a) Loma Prieta, b) Chi-Chi y c) Landers

En la segunda fase de simulación, se empleó únicamente el registro de Loma Prieta para simular el comportamiento del muro en distintos tiempos de secado.

Simulación Sísmica en Diferentes Condiciones

La simulación sísmica se implementó en OpenSeesPy (Python), aplicando el movimiento sísmico en la dirección X y permitiendo un gradiente de propiedades mecánicas en la dirección Y. La simulación se llevó a cabo en dos fases:

Ira Fase: Condiciones Saturadas (WET) y Secas (DRY)

En esta fase, el muro se simula con propiedades mecánicas homogéneas en condiciones completamente saturadas (WET) y secas (DRY). Los tres sismos indicados se aplican al muro para validar que el comportamiento entre los estados húmedo y seco sea

consistente, independientemente del registro sísmico usado. Esto permite evaluar el comportamiento estructural del muro sin un gradiente de saturación.

2da Fase: Condiciones con Gradiente de Saturación a lo Largo del Tiempo

Una vez validado el modelo, se aplicó el sismo de Loma Prieta para evaluar el muro en diferentes estados de saturación, desde el estado inicial totalmente saturado (0 horas) hasta casi seco (4000 horas). Esta fase incluye una distribución de propiedades mecánicas no uniforme, correspondiente a las condiciones de saturación cambiantes a lo largo del tiempo. Los tiempos de secado específicos seleccionados fueron 0, 500, 2000 y 4000 horas, representando una progresión del secado y los cambios estructurales asociados en la respuesta sísmica.

Resultados y Análisis

Evolución del Secado del Muro

Cambios en la Saturación a lo Largo del Tiempo

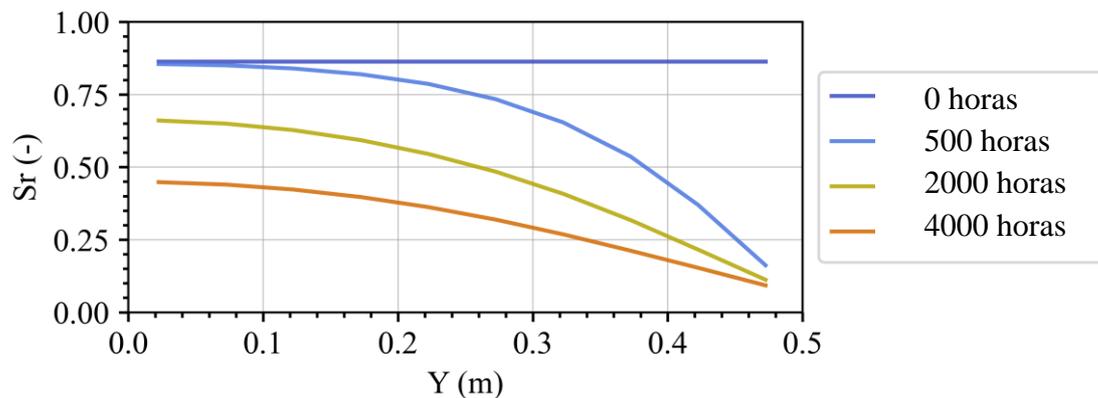


Figura 7. Evolución de saturación de una pared que se seca sólo de un lado

Esta figura muestra cómo el muro pierde humedad desde un estado completamente saturado hasta un estado predominantemente seco. El lado derecho del muro, expuesto al sol, presenta un secado más rápido, generando un gradiente de saturación que disminuye con el

tiempo. En las primeras 500 horas, el gradiente es más pronunciado, lo que representa una variación abrupta en las propiedades mecánicas a lo largo del ancho del muro. Con el paso del tiempo, el gradiente se homogeneiza, especialmente hacia las 4000 horas, lo que implica un comportamiento estructural más uniforme en estas condiciones avanzadas.

Propiedades Mecánicas en Función del Tiempo de Secado

Algunas de las propiedades mecánicas que cambian en el secado 1 fue el siguiente:

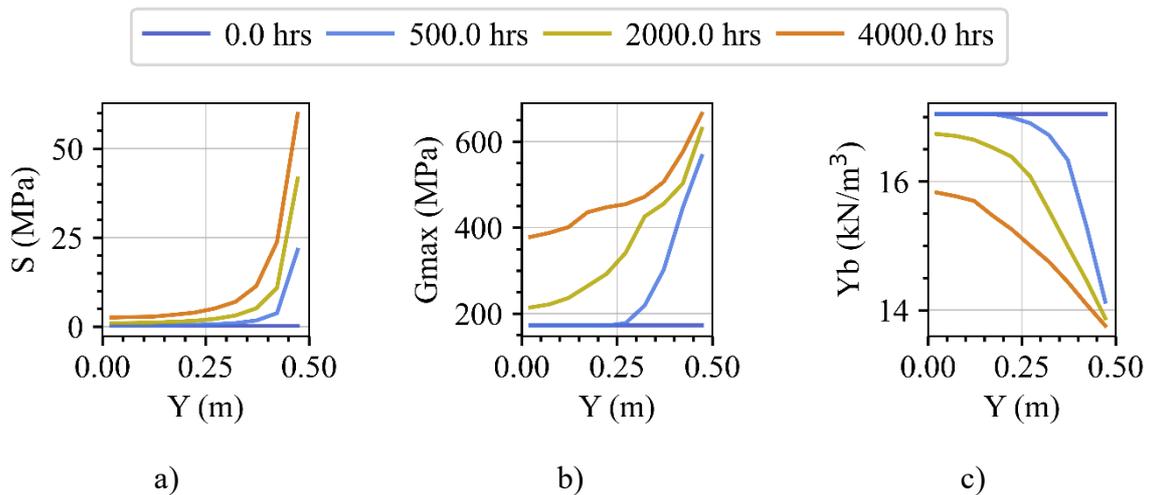


Figura 8. Estado de esfuerzos y propiedades mecánicas del muro secándose, a) succión, b) módulo de corte y c) peso específico aparente.

Se observa cómo las propiedades mecánicas del muro se correlacionan con la saturación del suelo. Estas propiedades a su vez modificarán la respuesta dinámica del muro ante un sismo.

Resultados de la Simulación Sísmica en condiciones WET y DRY

Respuesta en Condiciones WET y DRY

Se obtuvieron las respuestas del muro del nodo central de la cara superior del muro.

WET

DRY

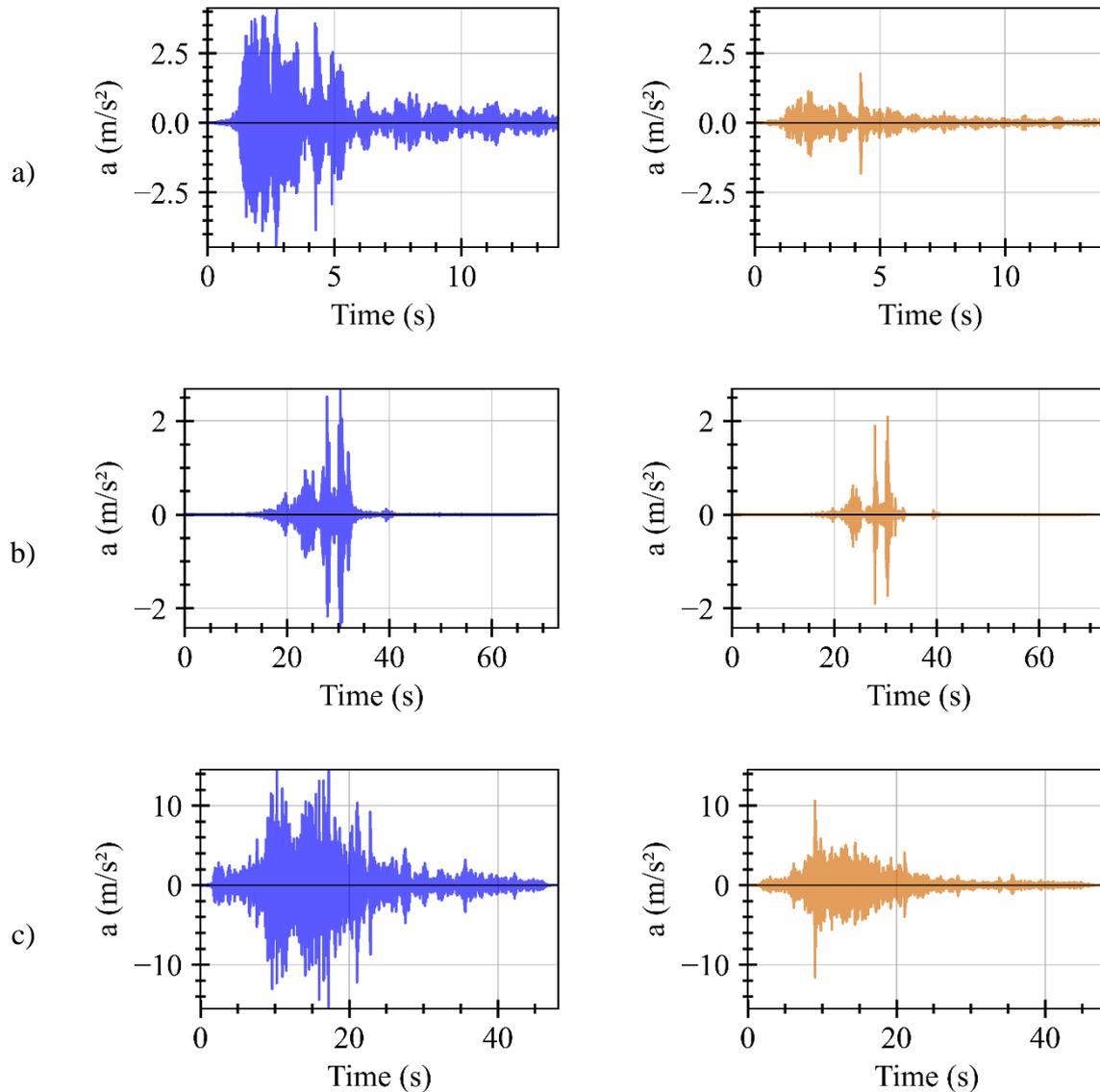


Figura 9. Respuesta de aceleración en el nodo central de la cara superior del muro y su punto máximo para los registros sísmicos de a) Loma Prieta, b) Chi-Chi y c) Landers

Esta figura presenta los acelerogramas obtenidos para las condiciones saturadas (WET) y secas (DRY) bajo tres registros sísmicos: Loma Prieta, Chi-Chi y Landers. Las gráficas muestran que las aceleraciones máximas son consistentemente mayores en el estado saturado, lo que confirma que la saturación reduce la rigidez del suelo y amplifica la respuesta sísmica. Esto es coherente con la teoría del comportamiento dinámico de materiales

no saturados, donde la reducción de rigidez en suelos húmedos provoca mayores deformaciones.

Comparación de FFT entre Condiciones WET y DRY para Cada Sismo

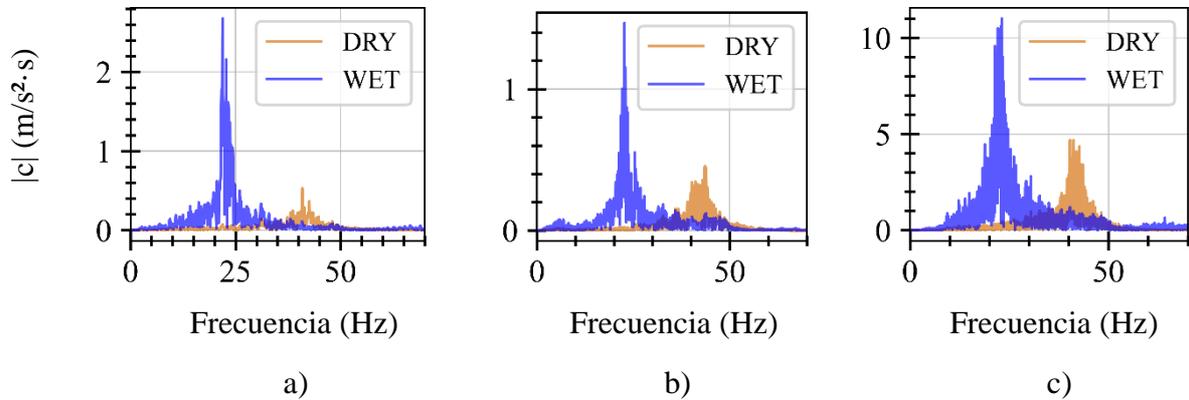


Figura 10. Comparación de frecuencias dominantes (FFT) entre condiciones WET y DRY para los registros de a) Loma Prieta, b) Chi-Chi y c) Landers

La transformada de Fourier de las respuestas de aceleración revela un aumento en la frecuencia dominante en el estado seco. Esto refleja que el muro se vuelve más rígido al secarse, lo que resulta en un comportamiento dinámico más rápido (frecuencias mayores). Esta observación es clave para entender cómo la pérdida de humedad afecta las propiedades dinámicas del suelo.

Desplazamientos y Aceleraciones Máximas entre Condiciones WET y DRY

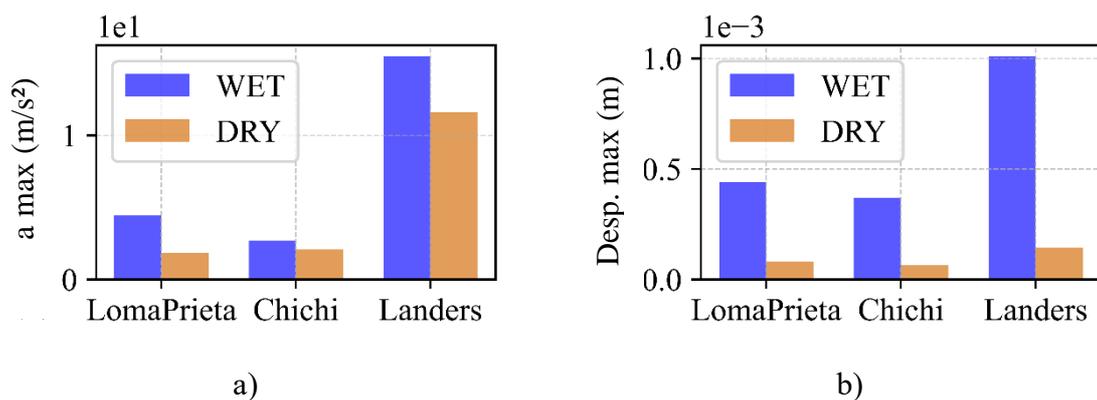


Figura 11. a) Acerleraciones y b) desplazamientos máximos absolutos en el nodo central bajo condiciones WET y DRY para los registros sísmicos seleccionados.

Esta figura compara los desplazamientos máximos del nodo central bajo las condiciones WET y DRY. Los desplazamientos son significativamente mayores en el estado húmedo, lo que confirma que la saturación no solo amplifica las respuestas dinámicas, sino que también aumenta la deformación estructural, comprometiendo la estabilidad del muro.

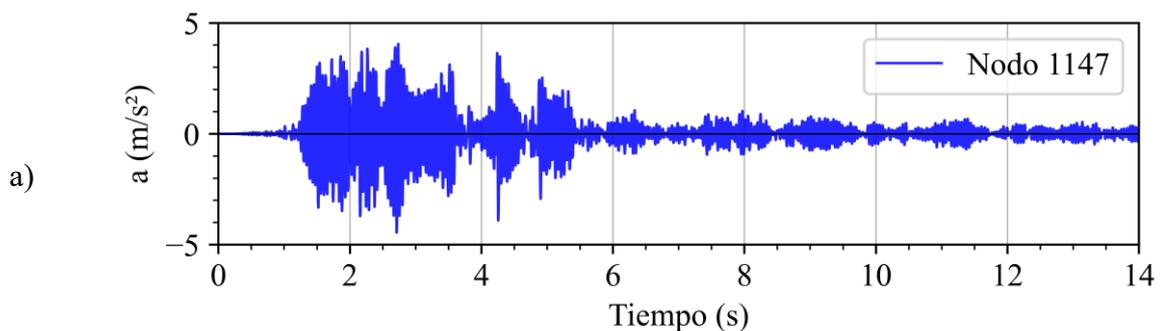
Estos resultados son consistentes con estudios previos, como Villacreses et al. (2021), que indican que la saturación reduce la rigidez del suelo y amplifica las respuestas dinámicas bajo carga sísmica. Esta fase valida que el comportamiento del muro bajo diferentes registros sísmicos es coherente.

Resultados de la Simulación Sísmica en Tiempos de Secado Específicos

Acelerogramas de Loma Prieta a Distintos Tiempos de Secado

Se obtuvo los acelerogramas de igualmente el nodo central de la cara superior del muro para los tiempos de secado 0, 500, 1000 y 4000 horas. Posteriormente se obtuvo las aceleraciones absolutas máximas y las intensidades de área de los acelerogramas de cada tiempo, incluyendo el de las 2000 horas.

Resultados de muro del gradiente de saturación de Loma Prieta



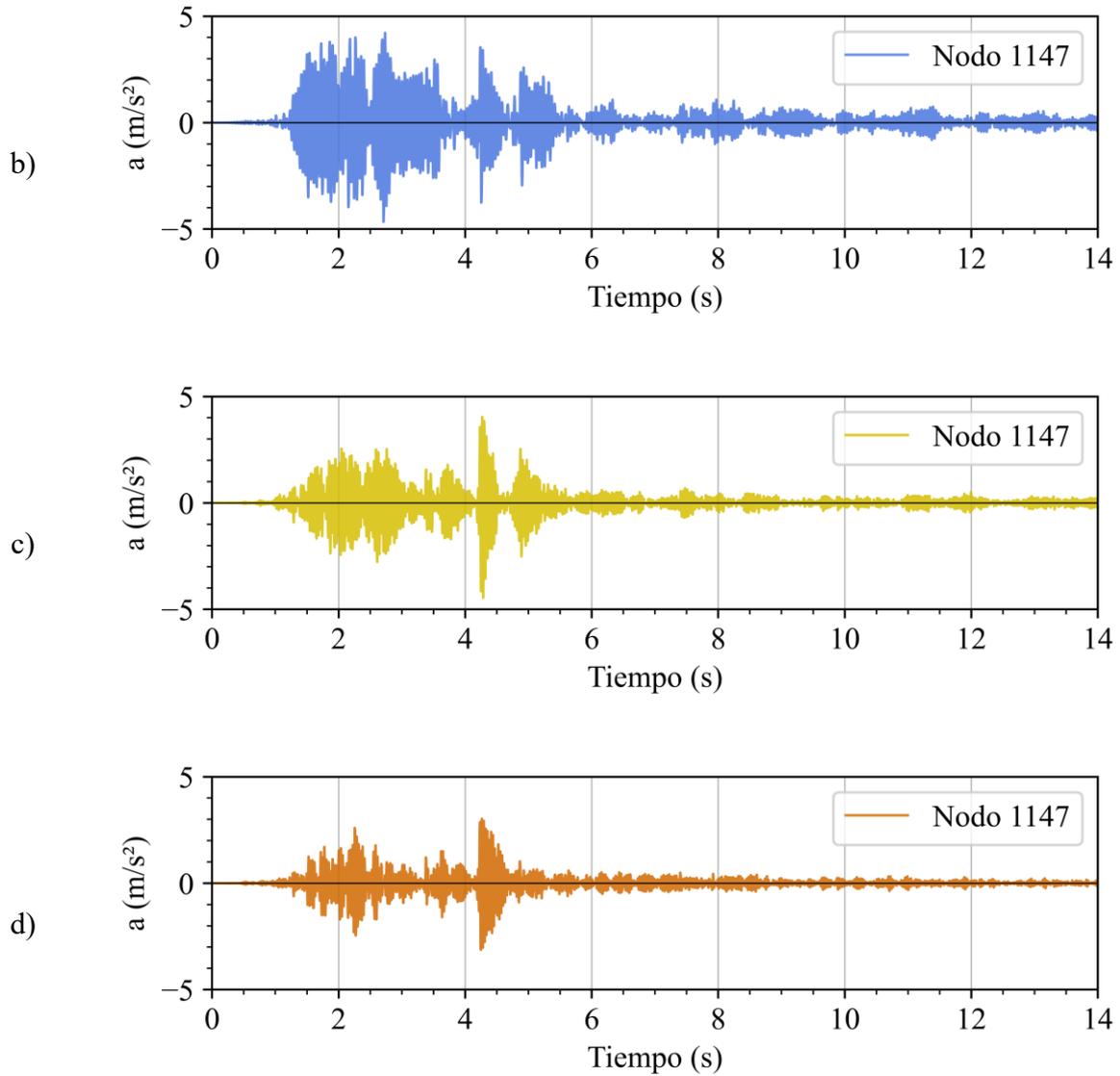


Figura 12. Acelerogramas obtenidos en el nodo central de la cara superior del muro para tiempos de secado específicos: a) 0, b) 500, c) 1000 y d) 4000 horas).

Análisis de Aceleración Máxima e Intensidad de Área

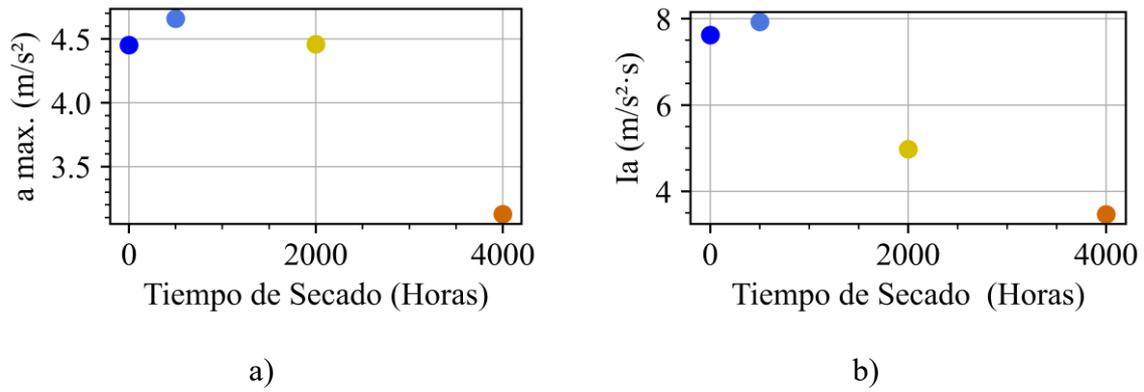
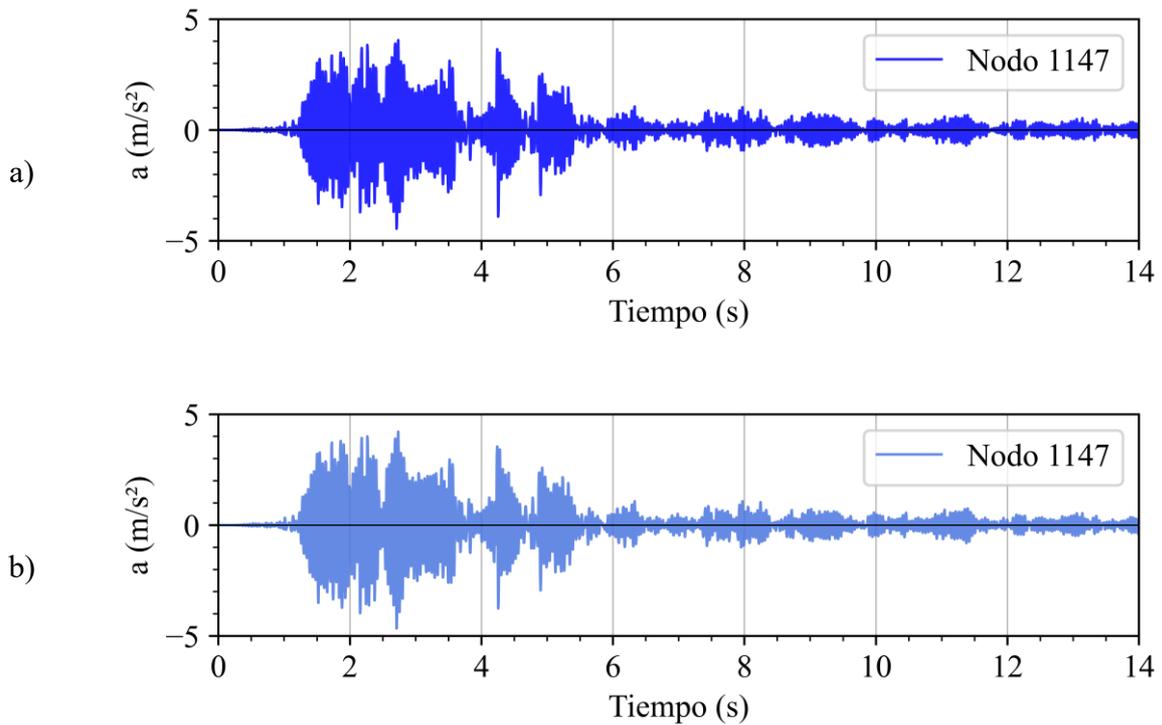


Figura 13. a) Aceleraciones máximas e b) intensidades de área de los acelerogramas para los diferentes tiempos de secado

Los acelerogramas obtenidos para los tiempos de 0, 500, 2000 y 4000 horas muestran que las aceleraciones disminuyen progresivamente conforme el muro pierde humedad (



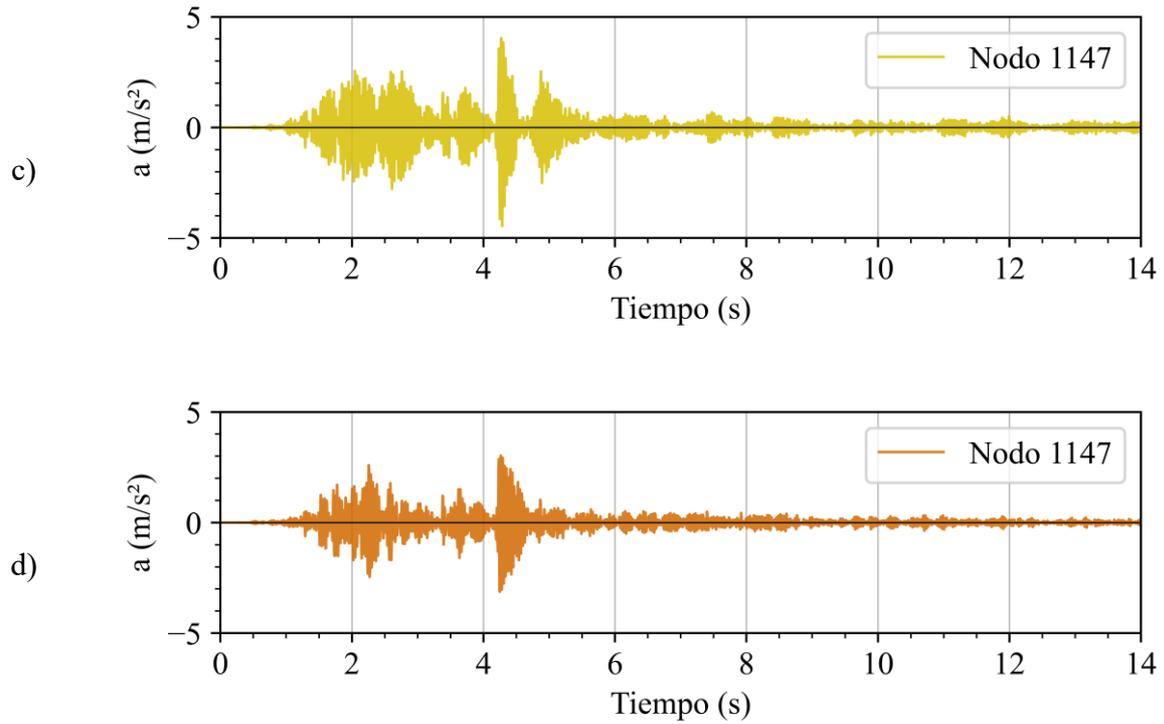


Figura 12), como se confirma con la intensidad de área de los acelerogramas, representada en la *Figura 13b*, donde es mayor en el estado saturado (0 horas), seguido del tiempo de 500 horas, y luego disminuye significativamente en tiempos más avanzados. Esto afirma la reducción de energía absorbida a medida que el muro se seca. Sin embargo, las aceleraciones máximas absolutas son más altas en el tiempo 500 horas (*Figura 13a*), el tiempo que tiene mayor gradiente de saturación observado, lo que genera una distribución más heterogénea de propiedades mecánicas.

Comparación de FFT y Respuesta del Muro según el Gradiente de Saturación

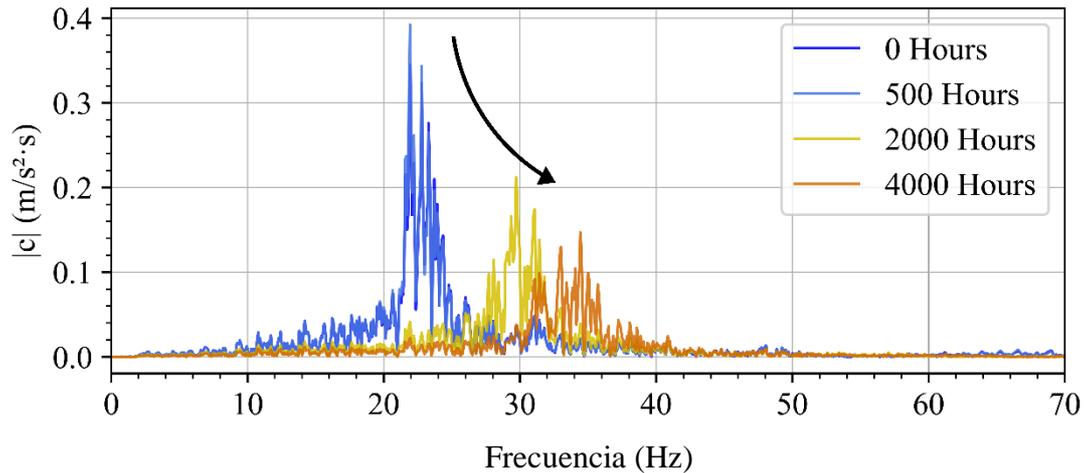


Figura 14. Comparación de frecuencias dominantes (FFT) según gradiente de saturación en tiempos específicos de secado.

En esta figura, se observa cómo la frecuencia dominante de la respuesta aumenta mientras la amplitud de la aceleración máxima disminuye conforme el muro se seca, indicando un incremento en rigidez dinámica. Sin embargo, también podemos notar cómo la FFT del tiempo de 500 horas es prácticamente la misma que el de 0 horas. Es decir, es como si la rigidez global del muro con el mayor gradiente de saturación, a pesar de que un lado está muy seco mientras el otro lado está húmedo, es prácticamente la misma del muro cuando está completamente húmedo.

Desplazamientos en las Esquinas Superiores del Muro

Se obtuvo también la respuesta en desplazamientos en X y en Y en un nodo ubicado en una de las esquinas de la cara superior del muro. Antes de la simulación, se “ató” los nodos de todas las esquinas superiores ya que “seltas” se abría el muro, lo cual era muy improbable que sucediese en la vida real. Sin embargo, aun así, para los desplazamientos en Y, desde el inicio existió en los resultados un desfase desde el tiempo 500, es decir, es como si el muro, después de haber ingresado los valores de las propiedades mecánicas en esos

gradientes, se deformara y se expandiera en el sentido Y desde incluso antes de simular el sismo. Es por esto por lo que los desplazamientos en Y se los centró a su promedio y los resultados fueron los siguientes:

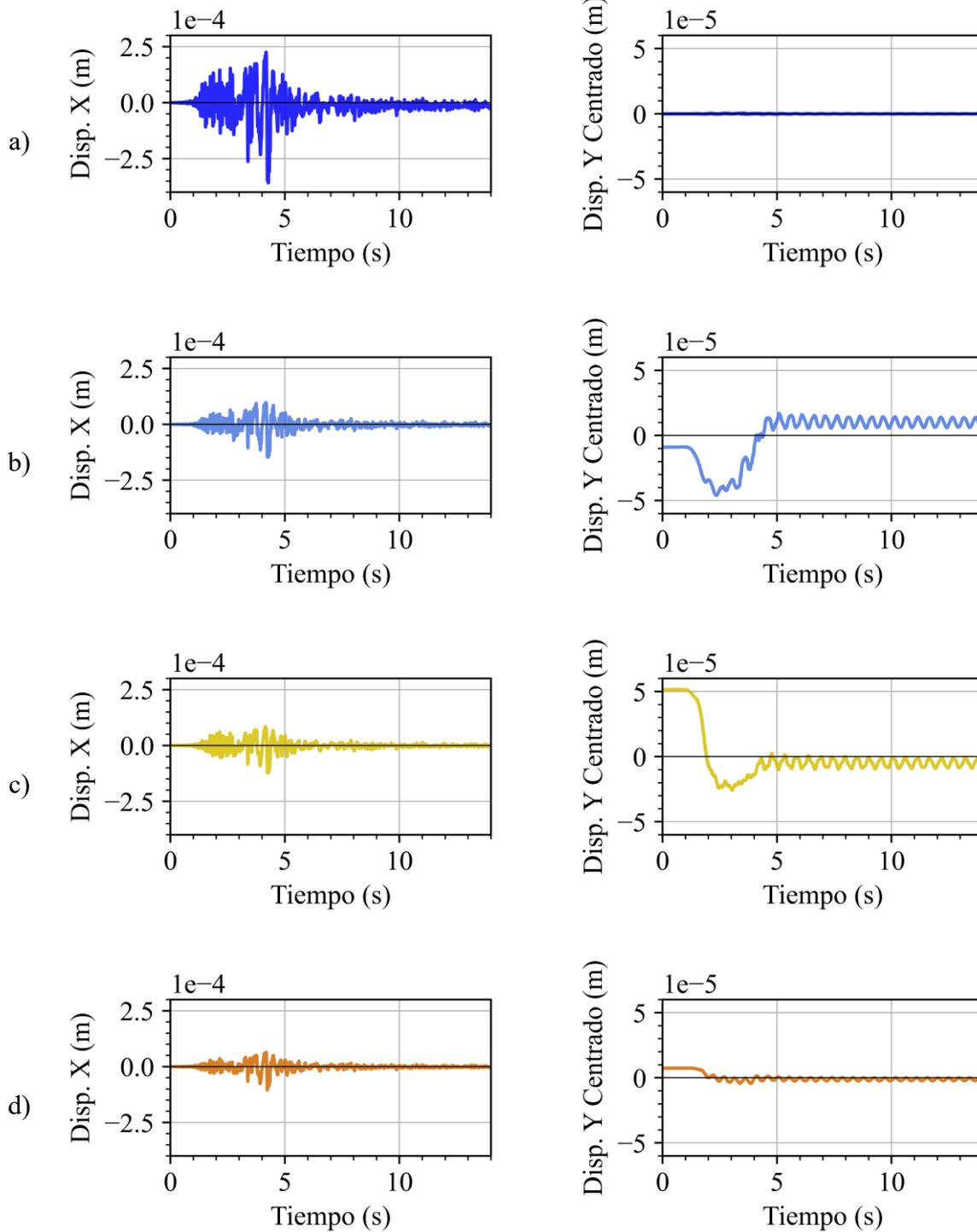


Figura 15. Desplazamientos máximos en las esquinas superiores del muro tras sismo de Loma Prieta en a) 0 Horas, b) 500 Horas, c) 1000 Horas y d) 4000 Horas

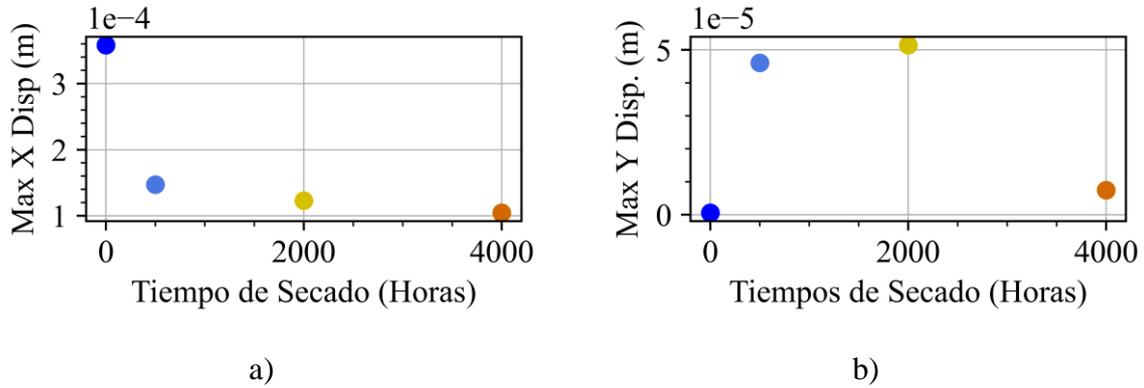
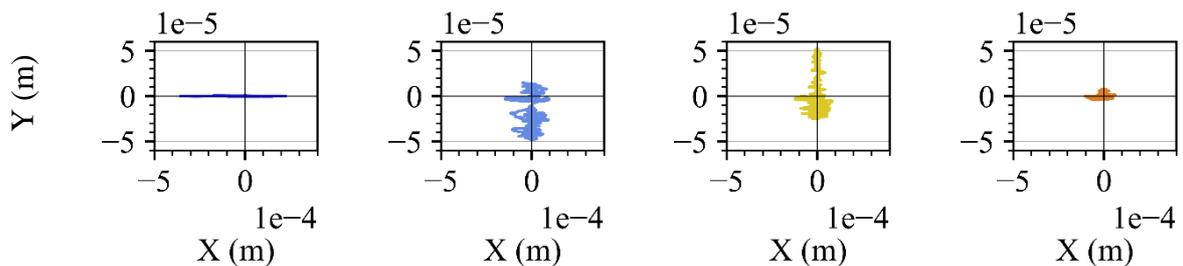


Figura 16. Máximos desplazamientos en los diferentes tiempos de secado del muro de a) X y b) Y

Estas figuras (Figura 15 y Figura 16) muestran los desplazamientos máximos en las esquinas superiores. En X, los desplazamientos disminuyen conforme el muro se seca, mientras que en Y, se observa un comportamiento peculiar: un aumento significativo a las 500 Y 2000 horas en comparación con el de 4000 horas que es cuando casi todo el muro se encuentra húmedo. Esto indica que los muros con saturaciones homogéneas tienen muy pocos desplazamientos en el eje Y; mientras que, los muros con saturaciones heterogéneas tienen mayores desplazamientos.

Desplazamiento Y vs X



CONCLUSIONES

Este trabajo analizó el comportamiento estructural de un muro de tierra compactada con gradientes de saturación bajo diferentes registros sísmicos, proporcionando conocimientos clave para la ingeniería sismo-resistente en materiales sostenibles. Los resultados permiten cumplir los objetivos planteados, destacando aspectos relevantes:

1. **Modelado del proceso de secado desigual:**

Se logró representar el gradiente de saturación generado por el secado desigual mediante una discretización espacial y temporal del muro, empleando propiedades como la permeabilidad y condiciones de borde realistas. Este modelo permitió identificar que, en las primeras 500 horas, el gradiente es más pronunciado, generando una alta heterogeneidad en las propiedades mecánicas, mientras que en etapas avanzadas (4000 horas), las propiedades del muro tienden a homogenizarse.

2. **Validación del modelo bajo registros sísmicos en condiciones extremas:**

La simulación en condiciones homogéneas de saturación (WET y DRY) mostró un comportamiento coherente al utilizar los registros sísmicos de Loma Prieta, Chi-Chi y Landers. Las condiciones saturadas amplificaron las aceleraciones y desplazamientos máximos, mientras que los estados secos reflejaron una mayor rigidez dinámica y frecuencias dominantes más altas. Esto confirma la validez del modelo para analizar comportamientos dinámicos en diferentes escenarios.

3. **Impacto de los gradientes de saturación en el comportamiento sísmico:**

Los gradientes intermedios, como los observados a las 500 horas, generaron respuestas dinámicas más complejas debido a la variación heterogénea de propiedades mecánicas a lo largo del muro. Aunque la rigidez global del muro en este tiempo es similar a la de las 0 horas (completamente saturado), este comportamiento puede estar

influenciado por las restricciones aplicadas a los nodos superiores en la simulación, lo que limita deformaciones más realistas. Esta observación resalta la importancia de considerar condiciones menos restrictivas en investigaciones futuras.

Adicionalmente, los análisis de disipación de energía indican que, a medida que el muro se seca, la capacidad de amortiguar las fuerzas sísmicas disminuye. Esto se refleja en la reducción del área encerrada en las gráficas de reacción base vs desplazamiento superior, lo que evidencia una menor capacidad de absorción y dispersión de energía en estados más secos.

4. Relevancia para Ecuador y la sostenibilidad en construcción:

Ecuador, como un país altamente sísmico, enfrenta desafíos únicos en la construcción de estructuras sostenibles que puedan resistir eventos extremos. Los resultados de esta investigación destacan el potencial de los materiales de tierra compactada para ser utilizados de manera más eficiente, siempre y cuando se comprendan y mitiguen los efectos de los gradientes de saturación. Este conocimiento contribuye a acercarnos a la viabilidad de construir más estructuras eco amigables en el país, utilizando el propio suelo como material principal, promoviendo así prácticas sostenibles en regiones vulnerables.

Como trabajo futuro, se sugiere realizar simulaciones con nodos no atados para evaluar de manera más precisa las interacciones dinámicas del muro bajo condiciones más realistas. Además, incorporar ensayos experimentales podría fortalecer las bases para su implementación en el diseño estructural en Ecuador y en otros países con características sísmicas similares.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Beckett, C., & Augarde, C. (2012). The effect of relative humidity and temperature on the unconfined compressive strength of rammed earth. *Unsaturated Soils: Research and Applications*, 1, 287-292. doi:10.1007/978-3-642-31116-1_39
- Bui, Q. B., Morel, J. C., Hans, S., & Walker, P. (2014). Effect of moisture content on the mechanical characteristics of rammed earth. *Construction and Building materials*, 54, 163-169. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.067
- Caicedo, B. (2019). *Geotechnics of Roads: Fundamentals*. Bogotá: CRC Press.
- Caiceo, B. (2023). *Geotechnics of Roads: Advanced Analysis and Modeling*. Bogotá: CRC Press.
- Chauhan, P., El Hajjar, A., Prime, N., & Plé, O. (2019). Unsaturated behavior of rammed earth: Experimentation towards numerical modelling. *Construction and Building Materials*, 227. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.08.027
- El-Shorbagy, A. M. (2010). Hassan Fathy: The unacknowledged conscience of twentieth century architecture. *International Journal of Basic & Applied Sciences IJBAS-IJENS*, 10(2), 29-35.
- Fredlund, D., & Xing, A. (1994). Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal*, 31, págs. 521-532.
- Gallipoli, D., Bruno, A. W., Perlot, C., & Salmon, N. (2014). Raw earth construction: is there a role for unsaturated soil mechanics. *Unsaturated Soils: Research & Applications*, 55-62.
- Ibagón, L., Caicedo, B., Camacho, D., Villacreses, J. P., & Yépez, F. (2023). Seismic Response Analysis of a Layered Soil Column Under Different Water Conditions. *International Journal of GEOMATE*, págs. 111-119.

Villacreses, J. P., Caicedo, B., Caro, S., & Yépez, F. (2020). A novel procedure to determine shear dynamic modulus and damping ratio for partial saturated compacted fine-grained soils. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, pág. 131.

Villacreses, J. P., Caicedo, B., Rueda, E., Ibagón, L., & Acosta, J. (2024). Homogenization of rammed earth walls under changing. *Construction and Building Materials*, pág. 425.

Villacreses, J. P., Granados, J., Caicedo, B., Torres-Rodas, P., & Yépez, F. (2021). Seismic and hydromechanical performance of rammed earth walls under changing environmental conditions. *Construction and Building Materials*, 300.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.124331