



UNIVERSIDAD  
SAN SEBASTIAN  
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**SEDE CONCEPCIÓN**

**“ANÁLISIS DE LA AISLACIÓN SÍSMICA GEOTÉCNICA E  
INTERACCIÓN SUELO – ESTRUCTURA BASADA EN SUELOS  
DEFORMABLES. ESTUDIO DE UNA MEZCLA DE ARENA, CAUCHO Y  
GRAVILLA”**

Tesis para Optar al Título de Ingeniero Civil

Profesor tutor: Felipe Vicencio Navarrete, Ph. D

Estudiante: Maximiliano Guzmán Suazo

© Maximiliano Guzmán Suazo. Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento siempre y cuando se incluya cita bibliográfica del documento.

Concepción, Chile  
2025

## HOJA DE CALIFICACIÓN

En \_\_\_\_\_, el \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ los abajo firmantes dejan constancia que el (la) estudiante \_\_\_\_\_ de la carrera de \_\_\_\_\_ ha aprobado la tesis para optar al título de \_\_\_\_\_ con nota de \_\_\_\_\_.

---

Profesor Evaluador

---

Profesor Evaluador

---

Profesor Evaluador

## DEDICATORIA

*Este trabajo está dedicado a mi familia y amigos, quienes me han brindado su apoyo en cada meta que me he propuesto.*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, quiero expresar mi gratitud a la Agencia Nacional de Investigación y Desarrollo, la cual, a través del proyecto Fondecyt de Iniciación N° 11230400, proporcionó el financiamiento necesario para llevar a cabo esta investigación.

Asimismo, deseo agradecer a mis padres, Zunilda y Guillermo, y a mi hermana Catalina, por su constante compañía en cada etapa de mi vida y por motivarme a perseguir mis metas sin importar los desafíos que se presenten.

A mi pareja, Ignacia, quiero agradecerle por estar siempre a mi lado, brindándome ánimo y apoyo incondicional, por confiar en mí en todo momento y por llenar mi vida de felicidad tanto en los momentos buenos como en los difíciles.

A mi profesor guía, Felipe, y al profesor Ramón, les agradezco su disposición para responder a cualquier duda o problema que surgiera, así como por su apoyo y conocimientos, los cuales fueron fundamentales para la realización de esta memoria y para mi formación como profesional.

A la profesora Javiera y a la profesora Reina, por su apoyo, paciencia y buena disposición para gestionar y coordinar ensayos de laboratorio en las dependencias de la Universidad San Sebastián.

A la profesora Daniela y al profesor Alex, por su buena disposición y apoyo técnico para llevar a cabo ensayos de laboratorio en las dependencias de la Universidad de Concepción.

Por último, quiero reconocer a todos mis profesores, tanto de colegio como de universidad, quienes contribuyeron a mi formación y compartieron sus conocimientos, tanto teóricos como éticos, permitiéndome desarrollarme plenamente en el ámbito profesional.

## RESUMEN

La amenaza sísmica representa un riesgo significativo para estructuras de todos los tamaños, lo que hace crucial la implementación de estrategias de protección adecuadas. Sin embargo, el elevado costo de los aisladores sísmicos convencionales limita su aplicación en edificaciones de menor tamaño, donde su viabilidad económica se ve comprometida. Ante esta problemática, surge la motivación de investigar métodos alternativos de aislación sísmica de bajo costo, que permitan mejorar la seguridad estructural sin incurrir en gastos excesivos, facilitando así su adopción en un rango más amplio de construcciones.

Esta investigación tiene como objetivo determinar la proporción ideal de materiales en una mezcla GSI para lograr la aislación sísmica de una estructura sin comprometer su estabilidad. Para ello, se realizaron ensayos de corte directo en seis mezclas con distintos porcentajes de arena, caucho y gravilla. En base a parámetros de deformación y estabilidad, se seleccionó la muestra con mejores propiedades de aislación y se realizó un ensayo triaxial cíclico para determinar las propiedades dinámicas de la muestra.

Los resultados obtenidos del ensayo triaxial se emplearon para calibrar un modelo numérico en OpenSees, permitiendo evaluar las propiedades de aislación sísmica de la mezcla GSI. La simulación numérica considera un sistema completo de estructura – fundación – suelo GSI – suelo natural, proporcionando una visión integral del desempeño de la mezcla en condiciones dinámicas reales.

La modelación numérica confirmó que la mezcla GSI propuesta presenta un comportamiento favorable como sistema de aislación sísmica, gracias a su capacidad de disipar energía, deformarse sin transmitir grandes aceleraciones y mantener estabilidad estructural.

**Palabras Clave:** *Aislación Sísmica Geotécnica (GSI); Interacción Suelo – Estructura (SSI); Mezcla de Arena, Caucho, y Gravilla (SRG); Reducción de Demanda Sísmica.*

## **ABSTRACT**

The seismic threat represents a significant risk to structures of all sizes, making the implementation of appropriate protection strategies crucial. However, the high cost of conventional seismic isolators limits their application in smaller buildings, where their economic feasibility is compromised. Considering this issue, the motivation arises to investigate low-cost seismic isolation methods that improve structural safety without incurring excessive costs, thereby facilitating their adoption in a wider range of constructions.

This research aims to determine the ideal proportion of materials in a GSI mixture to achieve seismic isolation of a structure without compromising its stability. For this purpose, direct shear tests are conducted on six mixtures with varying percentages of sand, rubber, and gravel. Based on deformation and stability parameters, the sample with the best isolation properties is selected, and a cyclic triaxial test is performed to determine the dynamic properties of the sample.

The results obtained from the triaxial test are used to calibrate a numerical model in OpenSees, allowing the evaluation of the seismic isolation properties of the GSI mixture. The numerical simulation considers a complete system of structure – foundation – GSI soil – natural soil, providing a comprehensive view of the mixture's performance under real dynamic conditions.

The numerical modeling confirmed that the proposed GSI mixture exhibits favorable behavior as a seismic isolation system, due to its ability to dissipate energy, deform without transmitting large accelerations, and maintain structural stability.

**Key Words:** *Geotechnical Seismic Isolation (GSI); Soil – Structure Interaction (SSI); Sand, Rubber, and Gravel mixture (SRG); Reduction of Seismic Demand.*

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1	Presentación del Tema .....	1
1.2	Objetivos de la Investigación .....	3
1.2.1	Objetivo General .....	3
1.2.2	Objetivos Específicos .....	3
1.3	Justificación del Estudio .....	3
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>4</b>
2.1	Aislación Sísmica de Base .....	4
2.2	Aislación Sísmica Geotécnica (GSI) .....	6
2.2.1	Interacción Suelo – Estructura (SSI).....	6
2.3	Tipos de GSI.....	8
2.3.1	Aislación Sísmica con Geo sintéticos .....	8
2.3.2	Aislación Sísmica con Mezclas de Caucho y Suelo .....	9
2.3.3	Contenido de Materiales en Mezclas GSI .....	10
2.3.4	Granulometría de los materiales de la mezcla SRG .....	11
2.4	Ensayos de Caracterización de Propiedades Mecánicas.....	11
2.4.1	Ensayo de Corte Directo.....	11
2.4.2	Ensayo Triaxial .....	13
2.5	Modelación Numérica .....	15
2.5.1	Revisión Bibliográfica.....	16
2.6	Normativas y Regulaciones .....	21
2.6.1	Normativas Nacionales:.....	21
2.6.2	Normativas Estadounidenses: .....	21
2.6.3	Normativas Europeas: .....	22
<b>3</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>22</b>
3.1	Caracterización de Mezclas.....	23
3.1.1	Granulometría .....	24
3.1.2	Densidad Máxima y Mínima ( $\rho_{max}, \rho_{min}$ ).....	24
3.1.3	Gravedad Específica (Gs).....	25
3.1.4	Corte Directo .....	26
3.2	Ensayo Triaxial.....	28

<b>3.3</b>	<b>Ensayo de Modelación Numérica – OpenSees</b> .....	29
3.3.1	<b>Descripción del desarrollo</b> .....	29
3.3.2	<b>Dimensiones y discretización</b> .....	29
3.3.3	<b>Materiales y Secciones</b> .....	31
3.3.4	<b>Condiciones de Borde</b> .....	32
3.3.5	<b>Estados de Carga</b> .....	32
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	33
4.1	<b>Caracterización de Mezclas</b> .....	33
4.1.1	<b>Granulometría</b> .....	33
4.1.2	<b>Densidad Máxima y Mínima</b> .....	34
4.1.3	<b>Ensayo de Corte Directo</b> .....	34
4.2	<b>Ensayo Triaxial</b> .....	39
4.3	<b>Ensayo de Modelación Numérica</b> .....	41
4.3.1	<b>Desplazamiento y Aceleración</b> .....	42
4.3.2	<b>Esfuerzos y Deformaciones</b> .....	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	48
<b>6</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	50
<b>7</b>	<b>ANEXOS</b> .....	54
7.1	<b>Granulometría</b> .....	54
7.2	<b>Corte Directo</b> .....	57
7.2.1	<b>Tensión de Corte v/s Deformación Horizontal</b> .....	57
7.2.2	<b>Deformación Vertical v/s Deformación Horizontal</b> .....	58
7.2.3	<b>Ángulo de Fricción Interna</b> .....	59
7.2.4	<b>Degradación del Módulo de Corte</b> .....	62
7.3	<b>Script de Modelación Numérica</b> .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Esquema de la Solución Propuesta (Vicencio, F. 2024).....	2
<b>Figura 2:</b> Apoyo elastomérico (CAELCA, 2024).....	5
<b>Figura 3:</b> Pseudo Espectro de Aceleraciones (elaboración propia) .....	5
<b>Figura 4:</b> Reducción de esfuerzos cortantes y derivas por nivel (Metamorworks. 2024) 6	
<b>Figura 5:</b> Esquema de Aislación con Geo sintéticos (Miura, et al. 2009).....	9
<b>Figura 6:</b> Esquema de Aislación con Mezcla de Suelo y Caucho (Miura, et al- 2009)....	9
<b>Figura 7:</b> Esquema de Ensayo de Corte Directo (Braja Das, 2019).....	12
<b>Figura 8:</b> Esquema de Ensayo Triaxial (Braja Das, 2019) .....	14
<b>Figura 9:</b> Elementos Finitos en un Modelo de Geotecnia (Guanchez, E. 2025) .....	16
<b>Figura 10:</b> Modelo Simplificado de (Brunet et al., 2016).....	17
<b>Figura 11:</b> Modelo Simplificado de (Forcellini, 2020). Suelo natural en azul y GSI en amarillo. ....	17
<b>Figura 12:</b> Modelo Simplificado de (Abate et al., 2023). Suelo natural en rosado y GSI en amarillo.....	18
<b>Figura 13:</b> Modelo Simplificado de (Forcellini et al., 2024) .....	20
<b>Figura 14:</b> Línea de tiempo de estudios de modelación numérica de sistemas GSI [elaboración propia] .....	21
<b>Figura 15:</b> Ensayo granulométrico [elaboración propia].....	24
<b>Figura 16:</b> Ensayo de densidad mínima (a) y máxima (b) [elaboración propia] .....	25
<b>Figura 17:</b> Ensayo de gravedad específica [elaboración propia] .....	26
<b>Figura 18:</b> Ensayo de Corte Directo [elaboración propia] .....	27
<b>Figura 19:</b> Ensayo Triaxial [elaboración propia].....	29
<b>Figura 20:</b> Esquema de modelación – Corte Transversal [elaboración propia].....	30
<b>Figura 21:</b> Elemento ‘20NodeBrick’ [Opensees] (a) y Mapa de nodos [elaboración propia] (b).....	31
<b>Figura 22:</b> Curva Granulométrica Logarítmica. a) SRG 100/0/0. b) SRG 80/20/0. c) SRG 50/30/20 [elaboración propia] .....	33
<b>Figura 23:</b> a) Tensión de corte v/s Deformación cortante. b) Deformación vertical v/s Deformación cortante. ....	35

<b>Figura 24:</b> Envolvente de falla Mohr – Coulomb. Mezcla SRG 70/30/0 [elaboración propia]	36
.....	
<b>Figura 25:</b> Degradación del Módulo de Corte. Mezcla SRG 70/30/0. [elaboración propia]	36
.....	
<b>Figura 26:</b> Tensión de Corte v/s Deformación Horizontal (elaboración propia).....	37
<b>Figura 27:</b> Máxima Tensión de Corte por Mezcla (elaboración propia) .....	38
<b>Figura 28:</b> Ángulo de Fricción Interna (elaboración propia) .....	38
<b>Figura 29:</b> Deformación vertical máxima por mezcla (elaboración propia) .....	39
<b>Figura 30:</b> Módulo de corte por mezcla (elaboración propia).....	39
<b>Figura 31:</b> Curva histerética de esfuerzo cortante versus deformación cortante. [elaboración propia] .....	40
<b>Figura 32:</b> Degradación del Módulo de Corte (Triaxial). [elaboración propia] .....	41
<b>Figura 33:</b> Figura deformada [elaboración propia] .....	42
Figura 34: Nodos registrados [elaboración propia] .....	42
<b>Figura 35:</b> Desplazamiento de los nodos C, D, y G [elaboración propia].....	44
<b>Figura 36:</b> Desplazamiento máximo de los nodos A, B, E y F [elaboración propia].....	44
<b>Figura 37:</b> Aceleraciones en nodos registrados [elaboración propia] .....	45
<b>Figura 38:</b> Espectro de aceleraciones [elaboración propia] .....	46
<b>Figura 39:</b> Esfuerzo de corte versus Deformación por corte [elaboración propia] .....	47
<b>Figura 40:</b> Esfuerzo desviador versus esfuerzo de confinamiento [elaboración propia] 47	

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación 1:</b> Ángulo de Fricción Interna (Braja Das, 2019).....	12
<b>Ecuación 2:</b> Módulo de Corte (Braja Das, 2019) .....	12
<b>Ecuación 3:</b> Coeficiente de Presión de Poros ( <i>Braja Das. 2019</i> ) .....	14
<b>Ecuación 4:</b> Gravedad Específica .....	26
<b>Ecuación 5:</b> Índice de Vacíos .....	26

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Contenido de materiales por mezcla [elaboración propia].....	23
<b>Tabla 2:</b> Propiedades del suelo natural y GSI [elaboración propia].....	31
<b>Tabla 3:</b> Propiedades del hormigón .....	32
<b>Tabla 4:</b> Límites de Densidad e Índice de Vacíos [elaboración propia].....	34

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Presentación del Tema

Chile es uno de los países con mayor actividad sísmica en el mundo debido a su ubicación en la convergencia de las placas tectónicas de Nazca y Sudamericana. Ante esto, la aislación sísmica ha demostrado ser una tecnología altamente efectiva para mitigar los efectos de los terremotos en las estructuras (*Zhang, et al. 2021*). Durante el terremoto del Maule en 2010 (Mw 8,8), los sistemas de aislamiento sísmico instalados en diversas infraestructuras funcionaron correctamente, permitiendo que edificaciones clave, como el Hospital Militar, la Clínica San Carlos de Apoquindo y el Puerto de Coronel, continuaran sus operaciones sin interrupción, demostrando así la efectividad de estos sistemas en la reducción del daño estructural. (*Almazán, J. 2010*)

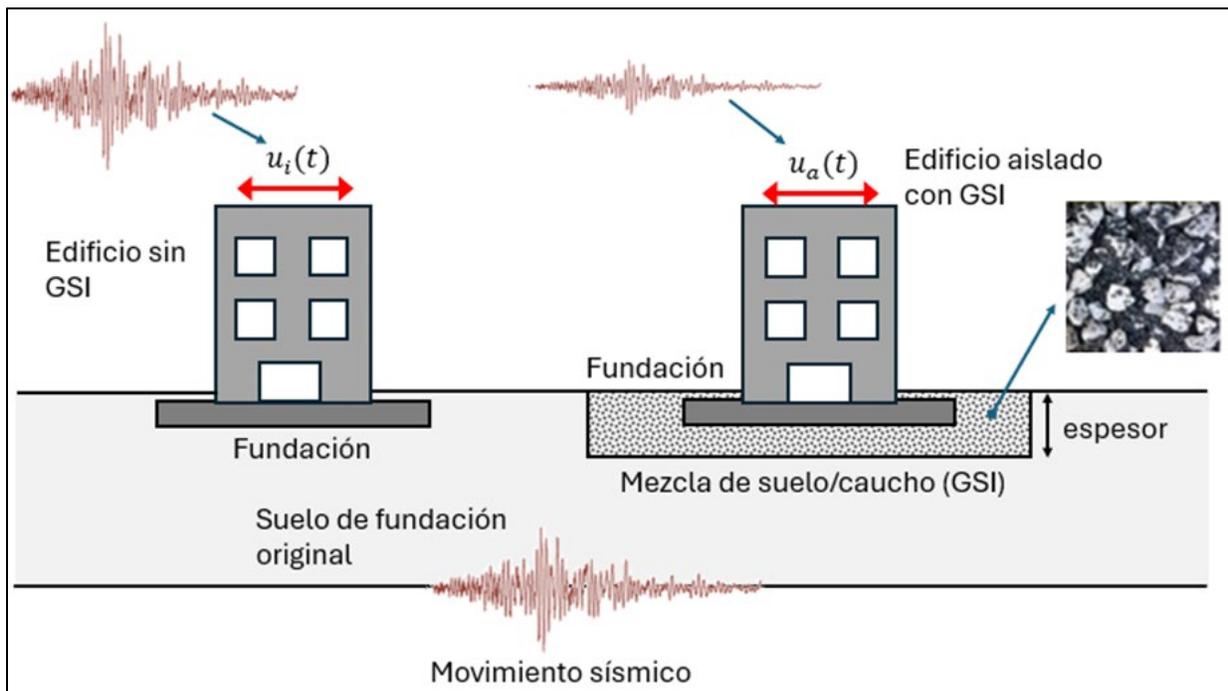
A pesar del desempeño comprobado de los aisladores de base convencionales (como apoyos elastoméricos, apoyos de goma con núcleo de plomo o apoyos deslizantes), su alto costo de instalación y mantención han restringido su aplicación a proyectos de gran envergadura. Esto ha generado la necesidad de investigar y desarrollar métodos alternativos de aislamiento sísmico que sean más accesibles y permitan su implementación en una mayor variedad de edificaciones, como estructuras de baja y mediana altura. (*Vicencio, F. 2024*)

En este proyecto se evalúa un sistema de aislación sísmica geotécnica (GSI) de bajo costo, el cual está formado por una mezcla de suelo con caucho de neumático reciclado. La solución propone una alternativa sustentable, de fácil construcción y económica para reducir el riesgo sísmico frente a eventos severos. Mediante una mezcla de arena, caucho y gravilla o SRG (Sand – Rubber – Gravel), el sistema propuesto busca aprovechar las propiedades complementarias de estos materiales para reducir la transmisión de la demanda sísmica.

El caucho, al ser un material deformable, actuaría como un amortiguador natural, absorbiendo parte de la energía sísmica y permitiendo que el suelo se deforme sin transmitir grandes fuerzas a la estructura. Por otro lado, la gravilla aportaría rigidez a la mezcla, lo que ayuda a mantener la estabilidad del suelo y controlar el asentamiento

vertical de la estructura. La combinación de la flexibilidad del caucho y la rigidez de la gravilla equilibra la capacidad de amortiguación con la estabilidad necesaria para soportar la carga de la edificación, proporcionando una solución eficaz para aislar sísmicamente la estructura mientras se mantiene el control sobre los asentamientos. (Miura, et al. 2009)

La **Figura 1** muestra un esquema de la solución que consiste en sustituir una capa de suelo de fundación de determinado espesor por una mezcla de suelo y caucho. Para llevar a cabo este proceso, se utilizaría maquinaria convencional para excavar el suelo existente y luego rellenar y compactar con la nueva mezcla. Cabe señalar que estas técnicas son comunes en la industria de la construcción y no requieren habilidades especiales por parte de los ingenieros ni de las empresas constructoras.



**Figura 1:** Esquema de la Solución Propuesta (Vicencio, F. 2024)

## **1.2 Objetivos de la Investigación**

### **1.2.1 Objetivo General**

El objetivo principal de esta investigación es analizar la aislación sísmica geotécnica (GSI) basado en una mezcla de arena, caucho y gravilla en la reducción de la demanda sísmica sobre las estructuras. La investigación pretende proporcionar datos que sustenten el uso de esta solución en edificaciones de baja y mediana altura, contribuyendo al desarrollo de nuevas estrategias para la mitigación de riesgos sísmicos.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Caracterizar geotécnicamente seis mezclas de GSI con distinta proporción de materiales (arena – caucho – gravilla).
- Desarrollar un modelo de simulación numérica en OpenSees calibrado con los resultados de los ensayos de laboratorio.
- Evaluar la eficiencia del sistema GSI en la reducción de la demanda sísmica.

## **1.3 Justificación del Estudio**

La aislación sísmica geotécnica ofrece una solución económica a la demanda sísmica que enfrentan las estructuras, especialmente en zonas de alta actividad sísmica como Chile. La protección estructural que ofrece es crucial, ya que reduce significativamente las fuerzas laterales que experimentan los edificios durante un sismo, disminuyendo las probabilidades de colapso o fallos estructurales graves. Además, la implementación de estos sistemas no solo protege vidas humanas, sino que también preserva la inversión económica en infraestructura crítica como hospitales, puentes o centrales eléctricas, donde la continuidad operativa después de un terremoto es esencial. *(Medalla, et al. 2024)*

Una mezcla SRG puede ser especialmente útil en países en vías de desarrollo debido a su accesibilidad económica y sostenibilidad ambiental. Los materiales necesarios, como arena y gravilla, son comúnmente disponibles en muchas regiones, lo que facilita su obtención sin necesidad de importar tecnologías o productos costosos. El desecho de neumáticos es un problema ambiental significativo debido a la gran cantidad de neumáticos fuera de uso generados anualmente. Cada año quedan en desuso un total

de 140.000 toneladas de este producto aproximadamente (Cortez, D. 2018). El uso de caucho granulado obtenido a partir de neumáticos reciclados no solo es una opción económica, sino también una solución ecológica, ayudando a reducir los desechos de neumáticos y promoviendo su reutilización.

Este método de aislación resulta más económico que otros enfoques, como el uso de dispositivos mecánicos de amortiguación, lo que lo hace accesible para proyectos más pequeños o de menor envergadura, como viviendas, escuelas o edificios comunitarios (Kelly, J. 2002). La simplicidad del proceso de mezcla y colocación del suelo, combinado con la fácil obtención de los materiales, permite aplicar este tipo de aislación sin incurrir en grandes inversiones de construcción. (Betanzo, et al. 2011)

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Aislación Sísmica de Base

La aislación sísmica es una técnica que se utiliza alrededor del mundo con el objetivo de proteger las estructuras de los efectos perjudiciales de los terremotos mediante un **soporte que desacople su movimiento del suelo** (Makris, N. 2019). Una estructura baja y autónoma puede deslizarse si el coeficiente de fricción en la superficie de deslizamiento es menor que la relación entre la aceleración máxima del suelo y la aceleración gravitacional. (Dhanya et al. 2020)

Este desplazamiento entre la estructura y su base se debe principalmente a la reducción de la rigidez horizontal en la base, lo que a su vez provoca un aumento del periodo fundamental de la estructura. Esto comúnmente se logra con dispositivos que introducen flexibilidad en la base de la estructura, permitiendo que esta oscile con mayor libertad en respuesta al movimiento del suelo [Figura 2]. Sin embargo, los requisitos de mantenimiento y el alto costo inicial de estos dispositivos han limitado su uso a viviendas de gran tamaño y estructuras industriales. (Buckle et al. 1990)



Figura 2: Apoyo elastomérico (CAELCA, 2024)

A partir del comportamiento dinámico de una estructura, se sabe que una reducción de la rigidez horizontal en la base genera un aumento en el periodo natural de una estructura de masa. (Mario Paz, 2009)

Considerando que los movimientos sísmicos suelen tener frecuencias dominantes en rangos de periodo corto (Warn, et al. 2012), al aumentar el periodo natural de la estructura, la aislación sísmica desplaza su respuesta fuera de estas frecuencias de alta energía, reduciendo las aceleraciones transmitidas a la estructura. Como se observa en la **Figura 3**, al aumentar el periodo de  $T_1$  a  $T_2$ , la aceleración espectral disminuye de  $Sa_1$  a  $Sa_2$ .

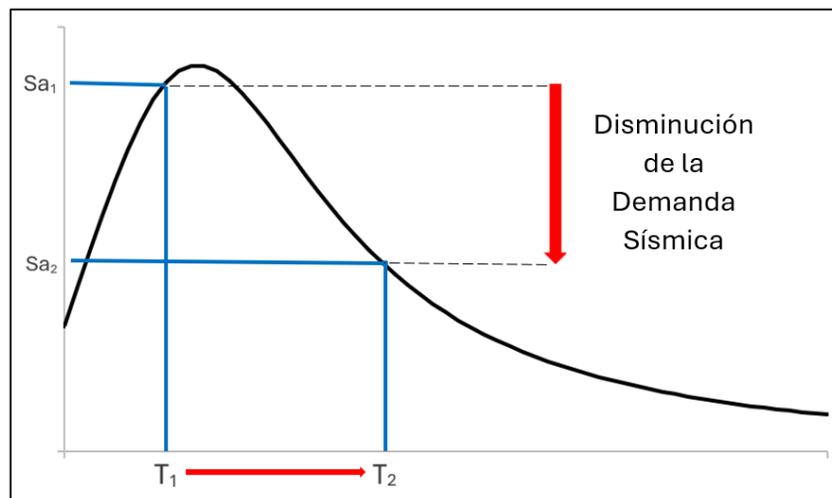
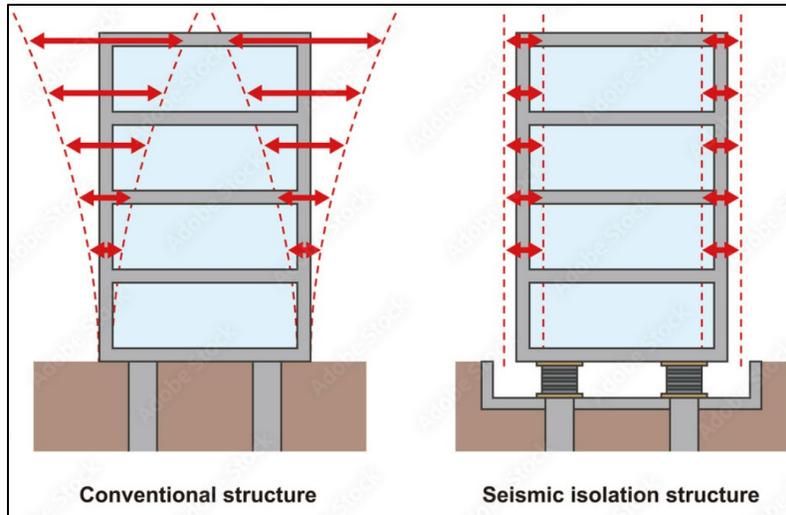


Figura 3: Pseudo Espectro de Aceleraciones (elaboración propia)

Las menores aceleraciones resultan en fuerzas laterales reducidas actuando sobre la estructura, lo que minimiza las derivas entre pisos y las demandas de deformación sobre componentes estructurales. **[Figura 4]**



**Figura 4:** Reducción de esfuerzos cortantes y derivas por nivel (Metamorworks. 2024)

## 2.2 Aislación Sísmica Geotécnica (GSI)

### 2.2.1 Interacción Suelo – Estructura (SSI)

El fenómeno de interacción suelo – estructura o SSI (soil – structure interaction) describe cómo el suelo y una estructura que se apoya sobre él interactúan mutuamente durante eventos como cargas estáticas o movimientos sísmicos. A diferencia de los modelos simplificados que consideran la base de la estructura como empotrada, los modelos SSI consideran el suelo sobre el que se construye una estructura responde a las cargas y movimientos de la edificación, mientras que la edificación también responde a las características y movimientos del suelo. (Lou, et al. 2011)

La interacción suelo-estructura es crucial en el análisis dinámico, ya que considera el comportamiento combinado de las estructuras y el suelo subyacente. Las propiedades del suelo, como la rigidez y la amortiguación, influyen significativamente en la respuesta estructural ante cargas dinámicas como sismos y vibraciones. (Structural Engineering Simplified, 2024)

Los modelos SSI son esenciales para comprender la relación dinámica entre una estructura y el suelo que la soporta, influyendo en cómo el sistema responde a las cargas. Consiste en la **interacción cinemática**, donde el movimiento de la cimentación difiere del movimiento del suelo libre, y la **interacción inercial**, donde la masa y la rigidez de la estructura alteran la respuesta del suelo. La interacción inercial es la principal preocupación en el diseño estructural, especialmente bajo cargas dinámicas como los sismos, ya que puede amplificar las deformaciones y modificar las características de vibración. Si no se considera adecuadamente, estos efectos pueden aumentar los esfuerzos y provocar fallas estructurales. *(Mata et al. 2023)*.

En los sistemas GSI se introducen materiales o capas de suelo modificadas entre la cimentación y el terreno natural. Estos materiales actúan como una "capa flexible" que disipa y amortigua las vibraciones, modificando las características de la interacción suelo-estructura y reduciendo la amplitud de los movimientos que alcanzan la edificación. *(Banović, 2023)*

Durante un evento sísmico, la amortiguación del suelo se refleja en la degradación del módulo de corte, lo que significa que la rigidez del suelo disminuye a medida que se incrementan las deformaciones cíclicas inducidas por el sismo. A medida que el suelo es sometido a esfuerzos de corte repetitivos, se generan deformaciones plásticas y pérdida de energía, lo que provoca una reducción progresiva del módulo de corte. *(García, et al. 2025)*

La aislación sísmica geotécnica o GSI (geotechnical seismic isolation) es una práctica que busca proteger las estructuras de los terremotos mediante la modificación o intervención de las propiedades del suelo sobre el cual se construye. Su objetivo principal es reducir la cantidad de energía sísmica que llega a la edificación, minimizando así los daños estructurales y protegiendo tanto a las personas como a los bienes en el interior de la estructura. A diferencia de otros enfoques que se centran exclusivamente en mejorar la resistencia de las edificaciones, la aislación sísmica geotécnica actúa directamente en la interacción suelo – estructura. El enfoque de este proyecto consiste en evaluar materiales con alta capacidad de amortiguación, como mezclas de suelo y

caucho, que absorben parte de la energía sísmica antes de que esta llegue a la estructura. (Buckle, et al. 1990)

El aislamiento sísmico geotécnico (GSI) ha sido aplicado en diversas infraestructuras alrededor del mundo para mitigar los efectos de los terremotos. Ejemplos destacados incluyen el Puente Rio – Antirion en Grecia, el Puente Vasco de Gama en Portugal y el Puente Izmit Bay en Turquía, donde se ha utilizado GSI para mejorar la estabilidad estructural. Además, en Japón y la India se han desarrollado estudios sobre el uso de mezclas caucho-suelo y geo espumas en edificaciones residenciales de baja altura. En Italia, el GSI se ha implementado en la restauración sísmica de iglesias históricas mediante aisladores de elastómero reforzado con fibras. Estos casos demuestran la creciente adopción del GSI como una alternativa económica y efectiva en la protección sísmica de estructuras en distintas regiones del mundo. (Forcellini, D. 2020)

## **2.3 Tipos de GSI**

### **2.3.1 Aislación Sísmica con Geo sintéticos**

El uso de geo sintéticos como aislación sísmica abarca dos enfoques principales: el primer enfoque se centra en la aislación del suelo; consiste en un geotextil que se ubica dentro del suelo, a cierta profundidad bajo la fundación, para evitar que la energía sísmica alcance la estructura o la superficie del suelo **[Figura 5]**. El segundo enfoque, conocido como aislación de fundaciones, consiste en colocar una capa sintética inmediatamente debajo de la fundación de una estructura.

A pesar de las diferencias técnicas y constructivas de estos enfoques, ambas soluciones comparten el objetivo de disipar la energía sísmica a través de deslizamientos en la interfaz del revestimiento, disminuyendo las aceleraciones que se transmiten a la estructura, y tomando provecho del bajo coeficiente de fricción presente en la interfaz generada por la capa sintética.

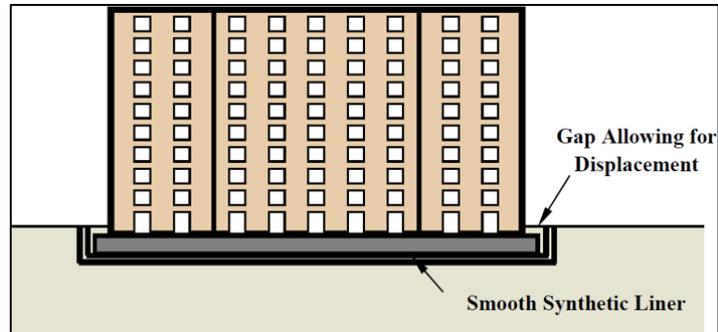


Figura 5: Esquema de Aislación con Geo sintéticos (Miura, et al. 2009)

### 2.3.2 Aislación Sísmica con Mezclas de Caucho y Suelo

La disipación de energía es el principal proceso responsable de disminuir el movimiento sísmico del suelo. El caucho, debido a su destacada habilidad para absorber energía, ha sido ampliamente utilizado en aplicaciones de control de vibraciones y amortiguación. Sin embargo, el problema principal del uso de este material como aislamiento sísmico, es que la estructura podría rebotar y balancearse lateralmente durante un evento sísmico. No obstante, este fenómeno puede evitarse utilizando mezclas de caucho y suelo granular [Figura 6], ya que los sólidos de caucho pueden ser reforzados con materiales de suelo convencionales.

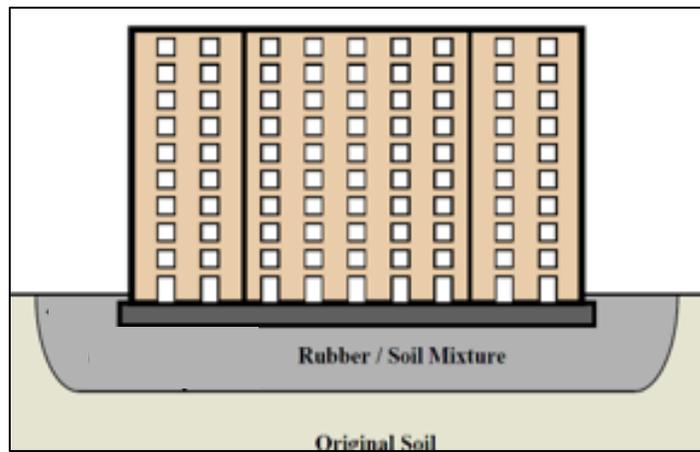


Figura 6: Esquema de Aislación con Mezcla de Suelo y Caucho (Miura, et al- 2009)

Se considera que el caucho reciclado jugará un papel clave en la aislación sísmica en un futuro próximo; los neumáticos desechados ofrecen una fuente abundante de material de caucho necesario para el método propuesto. En años recientes, la gestión de neumáticos fuera de uso se ha convertido en un problema ambiental significativo. A nivel global, se desechan cientos de millones de neumáticos cada año debido al aumento masivo en la

cantidad de vehículos. Es por esto, que la aislación sísmica con mezclas de caucho y suelo no solo ofrece una solución innovadora para la aislación sísmica, sino que también contribuye significativamente a la protección del medio ambiente. Este enfoque permite aprovechar un residuo problemático como los neumáticos desechados, reduciendo su impacto negativo y promoviendo su reutilización de manera sostenible. (*Miura, et al. 2009*)

De acuerdo con la literatura revisada, el comportamiento de una mezcla GSI depende de dos factores principales: el contenido de cada material; y la granulometría de cada material.

### **2.3.3 Contenido de Materiales en Mezclas GSI**

Debido a la alta deformabilidad del caucho, un aumento del contenido de este material en la mezcla SRG se traduce en una reducción de la rigidez y un aumento de la amortiguación del suelo. Según el estudio de (*Vratsikidis, et al. 2023*), una mezcla de suelo y 10% de caucho, tiene una respuesta similar al mismo suelo granular sin caucho; es decir que, a una concentración del 10%, el caucho no es efectivo como material deformable. Sin embargo, al aumentar el contenido de caucho a un 30%, tanto la aceleración traslacional como la aceleración de rotación en la base disminuyen significativamente de una estructura apoyada sobre esta mezcla de suelo (*Senthen, et al. 2020*). No obstante, las mezclas que contienen entre un 30% y 50% de caucho, tienen una mayor deformación vertical que las demás mezclas, por lo que es de crucial importancia regular con precisión el porcentaje de caucho, como también de los demás áridos que componen la mezcla de suelo (*Anastasiadis, et al. 2012*).

Por otro lado, una mezcla de solo arena y gravilla puede adoptar un comportamiento tipo arena, de transición, o tipo gravilla dependiendo del contenido de gravilla. A partir del estudio de (*Xu, et al. 2019*), se sabe que las mezclas tipo arena y tipo gravilla presentan un aumento del módulo de corte secante a medida que aumenta el contenido de gravilla en la mezcla; es decir, la gravilla aporta mayor rigidez a la mezcla GSI. Sin embargo, las mezclas de comportamiento de transición presentan una disminución del módulo de corte secante a medida que aumenta el contenido de gravilla, debido a cambios en el índice

de vacíos de la mezcla. Además, se determinó que la curva de degradación del módulo de corte cambia su forma cuando el contenido de gravilla supera el 40%.

#### **2.3.4 Granulometría de los materiales de la mezcla SRG**

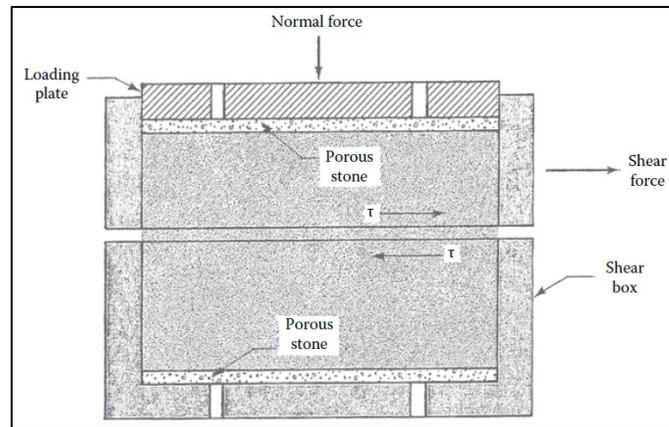
Se sabe que un aumento del tamaño de las partículas de caucho con respecto a las partículas de suelo conduce al desarrollo de contactos más pronunciados entre partículas de caucho, lo que hace que el comportamiento de la mezcla cambie de similar al suelo natural a un comportamiento predominado por el caucho. Esta transformación depende de la relación entre los diámetros medios ( $D_{50}$ ) de las partículas de arena y caucho. (*Thermann et al. 2006*)

### **2.4 Ensayos de Caracterización de Propiedades Mecánicas**

#### **2.4.1 Ensayo de Corte Directo**

El ensayo de corte directo es un método ampliamente utilizado en mecánica de suelos para determinar la resistencia al corte de un material granular o cohesivo. Se basa en la teoría de la resistencia al esfuerzo cortante, la cual establece que un suelo falla cuando los esfuerzos cortantes aplicados superan su resistencia interna, definida por la envolvente de falla. (*Timoshenko, et al. 1951.*)

Tal como se muestra en la **Figura 7**, este ensayo consiste en una muestra de suelo sometida a una fuerza normal constante y a un esfuerzo cortante incremental a lo largo de un plano predeterminado. El plano de falla se controla por el diseño del aparato, que divide la muestra en una base fija y una parte superior móvil. Durante el ensayo, se registran los valores del esfuerzo cortante, desplazamiento horizontal y desplazamiento vertical. (*Braja Das, 2019*)



**Figura 7:** Esquema de Ensayo de Corte Directo (Braja Das, 2019)

A partir de la relación entre el esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y la presión normal de confinamiento ( $\sigma'v$ ), es posible determinar el ángulo de fricción interna de cada mezcla **[Ecuación 1]**. Se considera que la cohesión es nula en suelos granulares ( $c = 0$ ).

**Ecuación 1:** Ángulo de Fricción Interna (Braja Das, 2019)

$$\phi' = \text{tg}^{-1}(\tau/\sigma'v)$$

Consecuentemente, a partir de los parámetros de deformación cortante ( $\gamma$ ) y tensión de corte ( $\tau$ ) obtenidos a partir del ensayo de corte directo, es posible determinar el Módulo de Corte (**G**) para cada mezcla **[Ecuación 2]** y elaborar la curva de degradación del módulo de corte secante normalizado. Esta curva es de suma importancia ya que muestra cómo la rigidez del suelo disminuye a medida que aumenta la deformación cortante, reflejando su comportamiento no lineal. A bajas deformaciones el suelo responde de manera casi elástica con un módulo de corte máximo ( $G_{MAX}$ ). Sin embargo, a medida que la deformación aumenta, el módulo de corte se reduce debido a la reorganización de partículas y micro deslizamientos. En altas deformaciones, la degradación del módulo de corte es significativa, pudiendo llevar al suelo a la falla o licuación. Bajo cargas cíclicas o dinámicas, como sismos o vibraciones, la degradación del módulo de corte implica la disipación de energía en forma de histéresis. (García, et al. 2015)

**Ecuación 2:** Módulo de Corte (Braja Das, 2019)

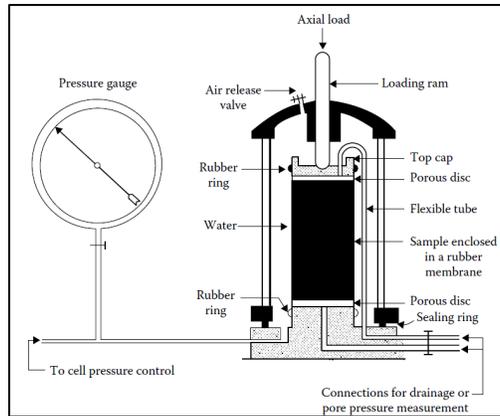
$$G = \tau/\gamma$$

El estudio de (Tsiavos *et al.*, 2019) presenta una investigación cuyo enfoque experimental se centra en caracterizar el comportamiento mecánico de mezclas GSI mediante ensayos de corte directo, con el fin de determinar las condiciones óptimas para favorecer el deslizamiento controlado de una fundación sobre esta capa, minimizando las fuerzas sísmicas transmitidas a la superestructura. El procedimiento experimental de los ensayos de corte directo consistió en aplicar una carga horizontal sobre distintas mezclas de arena y caucho, para evaluar su capacidad de deslizamiento y su resistencia al esfuerzo cortante. Se realizaron pruebas bajo tres niveles diferentes de presión vertical efectiva: 10, 20 y 30 kPa, los cuales fueron seleccionados por representar condiciones típicas de carga en edificaciones de una planta en países en desarrollo. Además, se ensayaron tres relaciones de tamaño medio de grano ( $D_{50,r} / D_{50,s} = 2, 5$  y 10. Esta variación permitió estudiar cómo influye la proporción de tamaños de partícula en la respuesta mecánica de la mezcla, particularmente en su ángulo de fricción y en la facilidad con la que ocurre el deslizamiento entre partículas. Los ensayos fueron realizados tanto en condiciones secas como totalmente saturadas, con el objetivo de evaluar el impacto de la presencia de agua en las propiedades de fricción.

En cuanto a los resultados, se observó que el uso de mezclas arena-caucho produce una disminución significativa del ángulo de fricción en comparación con muestras de arena pura. Particularmente, para desplazamientos horizontales pequeños, se registró una **reducción de aproximadamente un 40%** en el ángulo de fricción. En relación con el tamaño relativo de grano, **la mezcla con  $D_{50,r} / D_{50,s} = 2$  demostró el comportamiento más favorable**, ya que presentó el menor coeficiente de fricción estática.

#### 2.4.2 Ensayo Triaxial

El ensayo triaxial es un método fundamental en mecánica de suelos para determinar la resistencia al corte y el comportamiento del suelo bajo condiciones controladas de esfuerzo. Este ensayo simula condiciones reales del terreno aplicando esfuerzos tridimensionales y permite obtener parámetros como la cohesión y el ángulo de fricción interna **[Figura 8]**.



**Figura 8:** Esquema de Ensayo Triaxial (Braja Das, 2019)

La muestra cilíndrica de suelo, encapsulada en una membrana impermeable, se coloca en una cámara triaxial donde se somete a un esfuerzo de confinación, aplicado de manera uniforme mediante un fluido presurizado que rodea la muestra, simulando el confinamiento natural. La muestra también es sometida a un esfuerzo axial cíclico controlado mediante un pistón que comprime la muestra hasta que falla.

Existen tres variantes del ensayo triaxial según las condiciones de drenaje y consolidación:

- Consolidado – drenado (CD): Permite la disipación del exceso de presión de poros, usado para evaluar condiciones drenadas a largo plazo.
- Consolidado – No drenado (CU): Evalúa el comportamiento del suelo en condiciones no drenadas tras la consolidación inicial.
- No consolidado – No drenado (UU): Se realiza sin permitir consolidación ni drenaje, representando condiciones rápidas.

Para asegurar la correcta saturación de la mezcla, es posible determinar el coeficiente de presión de poros "B", que indica el grado de saturación de la muestra en un ensayo triaxial. **[Ecuación 3]**

**Ecuación 3:** Coeficiente de Presión de Poros (Braja Das. 2019)

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_3}$$

Donde “ $\Delta u$ ” es el incremento de presión de poros y “ $\Delta \sigma_3$ ” el incremento de presión de confinamiento en condiciones no drenadas. Un valor  $B \approx 1$  sugiere saturación completa, mientras que valores menores indican la presencia de aire en los poros.

El estudio de (Senthen Amuthan et al., 2020) presenta una investigación experimental y sobre el comportamiento consolidado no drenado de mezclas de arena con caucho granulado bajo cargas cíclicas. Las muestras fueron preparadas a partir de arena de río y caucho granulado con tamaños entre 0.425 y 2 mm, utilizando diferentes proporciones de caucho: 0%, 10%, 20%, 30%, 50%, 75% y 100%. Se realizaron ensayos triaxiales cíclicos no drenados en condiciones controladas por esfuerzo y se aplicaron cargas sinusoidales a una frecuencia de 1 Hz. Los resultados muestran que el comportamiento histerético observado en los ciclos esfuerzo-deformación revela una diferencia marcada entre arena pura y mezclas con caucho. Mientras que la arena exhibe un bucle histerético asimétrico (más deformación en tensión que en compresión), la incorporación de caucho tiende a simetrizar este comportamiento, indicando una mayor elasticidad. Esta elasticidad inducida por el caucho, sin embargo, viene acompañada de una **reducción del módulo de rigidez**, especialmente cuando el contenido de caucho supera el 30%. Las mezclas con 30% a 50% de caucho presentan una respuesta estable, acumulando deformaciones moderadas en comparación con la arena pura o mezclas con bajo contenido de caucho, las cuales mostraron incrementos más abruptos de deformación. Esta estabilización es atribuida al efecto de enlace mecánico entre partículas que genera el caucho, lo que ayuda a limitar la evolución de deformación con los ciclos aplicados.

## 2.5 Modelación Numérica

La modelación numérica es una técnica computacional que emplea métodos matemáticos avanzados, como el método de elementos finitos, para simular el comportamiento de materiales y sistemas bajo diferentes condiciones [Figura 9]. En el contexto de una mezcla SRG, este enfoque es fundamental ya que permite analizar el comportamiento de la mezcla bajo grandes deformaciones y esfuerzos cíclicos, como los que se presentan durante eventos sísmicos. Además, esta metodología facilita la exploración de diversos parámetros, como el grosor de la capa de GSI con el fin de

optimizar su diseño y evaluar su eficacia en distintas situaciones de carga sísmica. (Kechidi, et al. 2021)

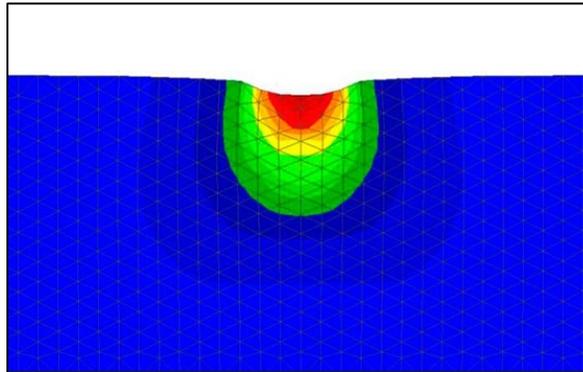
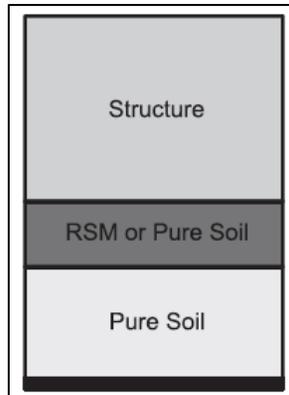


Figura 9: Elementos Finitos en un Modelo de Geotecnia (Guanchez, E. 2025)

OpenSees (Open System for Earthquake Engineering Simulation) es una plataforma de software de código abierto utilizada modelar y analizar el comportamiento sísmico en áreas de la estructura y geotecnia en la Ingeniería Civil.

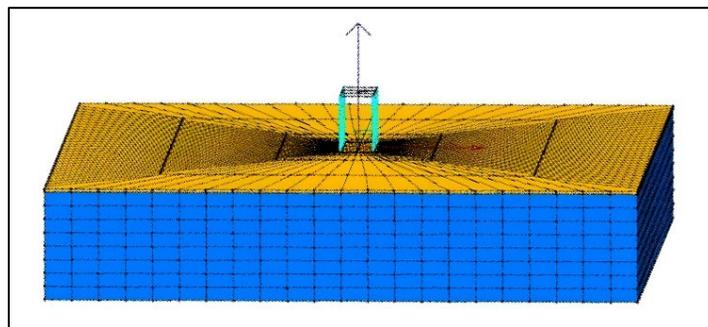
### 2.5.1 Revisión Bibliográfica

El estudio de (Brunet, et al. 2016) analiza un sistema compuesto por una estructura apoyada sobre suelo GSI, el cual a su vez se apoya sobre suelo natural. El modelo simplificado de dos dimensiones y tres grados de libertad considera el perfil de suelo y la estructura como masa concentrada [Figura 10]. Para simular el comportamiento no lineal de la capa de GSI, los autores consideraron un conjunto de resortes elastoplásticos en paralelo. Los resultados de las simulaciones indican que **la capa de GSI experimenta deformaciones mucho mayores en comparación con el suelo sin mezcla**. Esto demuestra que la capa de GSI es capaz de disipar energía de manera eficiente mediante grandes deformaciones inelásticas. Además, se observa que la capa de GSI reduce la aceleración máxima en la base de la estructura hasta un 55% durante un evento sísmico. Los autores exploran el efecto del espesor de la capa de RSM, variándolo entre 0 y 5 metros, y concluyen que un **espesor de 2-3 metros es suficiente para lograr un aislamiento sísmico efectivo**. Aumentar el grosor más allá de este rango no aporta beneficios adicionales significativos.



**Figura 10:** Modelo Simplificado de (Brunet et al., 2016)

En el estudio de (Forcellini, D. 2020), se llevó a cabo un análisis dinámico no lineal en el dominio del tiempo, aplicando registros sísmicos reales escalados para evaluar la respuesta de un sistema suelo – estructura. La geometría del modelo consistió en una representación tridimensional que incluye la estructura, el suelo natural y una capa intermedia de suelo blando que actúa como aislamiento sísmico geotécnico (GSI) **[Figura 11]**. En cuanto a los materiales, el suelo natural fue modelado con un comportamiento no lineal dependiente de la presión, y la capa GSI con una rigidez significativamente menor para permitir la disipación de energía sísmica. Se implementaron condiciones de frontera absorbentes en los bordes laterales para evitar reflexiones no deseadas dentro del dominio de análisis. Se observó que la incorporación de la capa GSI redujo significativamente las aceleraciones máximas que se transmiten a la base de la estructura, indicando una disminución en la demanda sísmica. Sin embargo, este efecto vino acompañado de un incremento en los desplazamientos laterales de la estructura, lo cual es característico de los sistemas de aislamiento sísmico.



**Figura 11:** Modelo Simplificado de (Forcellini, 2020). Suelo natural en azul y GSI en amarillo.

Por otro lado, el estudio de (Abate, et al. 2023), se basa en un modelo tridimensional de elementos finitos para simular el comportamiento dinámico y estático de un sistema suelo – mezcla de grava y caucho (GSI). En esta investigación, las condiciones de contorno se configuraron para simular condiciones infinitamente lejanas, fijando la base del modelo y utilizando bordes de campo libre en los límites laterales para evitar la reflexión de ondas. En cuanto a las **superficies de contacto**, se modelaron las interacciones entre la cimentación y la capa de GSI definiendo resortes con módulos de rigidez normal y tangencial para capturar fenómenos como el deslizamiento y el levantamiento de la cimentación [Figura 12]. En términos de desplazamientos dinámicos, se observó una reducción de aproximadamente el 80% en los desplazamientos horizontales al pasar de la cubierta a la cimentación, tanto para GRM100/0 como para GRM70/30. En la superficie del suelo, el movimiento disminuyó progresivamente con la distancia desde la cimentación, mostrando un comportamiento similar en ambas configuraciones. Además, se detectó un movimiento de balanceo en el sistema con GRM70/30, lo que llevó a una respuesta más de "cuerpo rígido" de la estructura en comparación con la configuración sin caucho (GRM100/0).

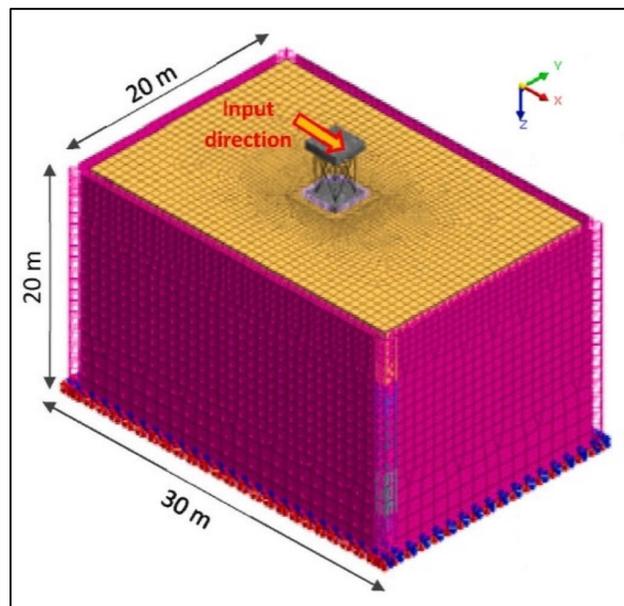
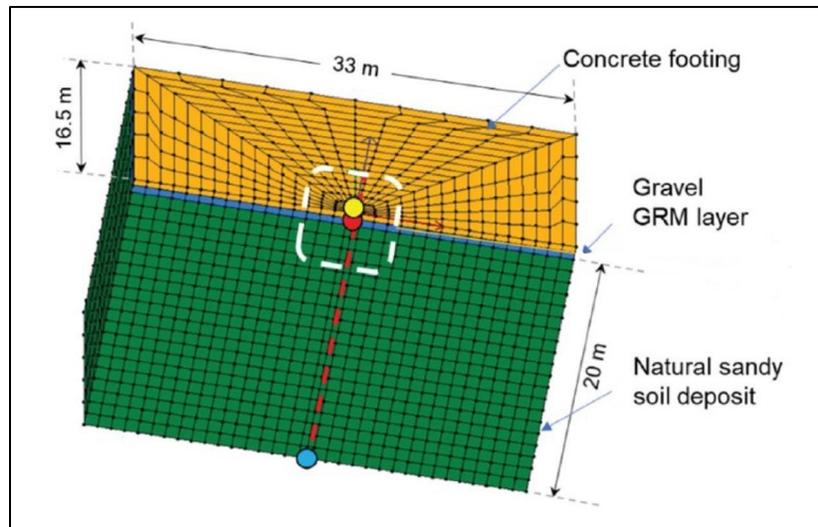


Figura 12: Modelo Simplificado de (Abate et al., 2023). Suelo natural en rosado y GSI en amarillo

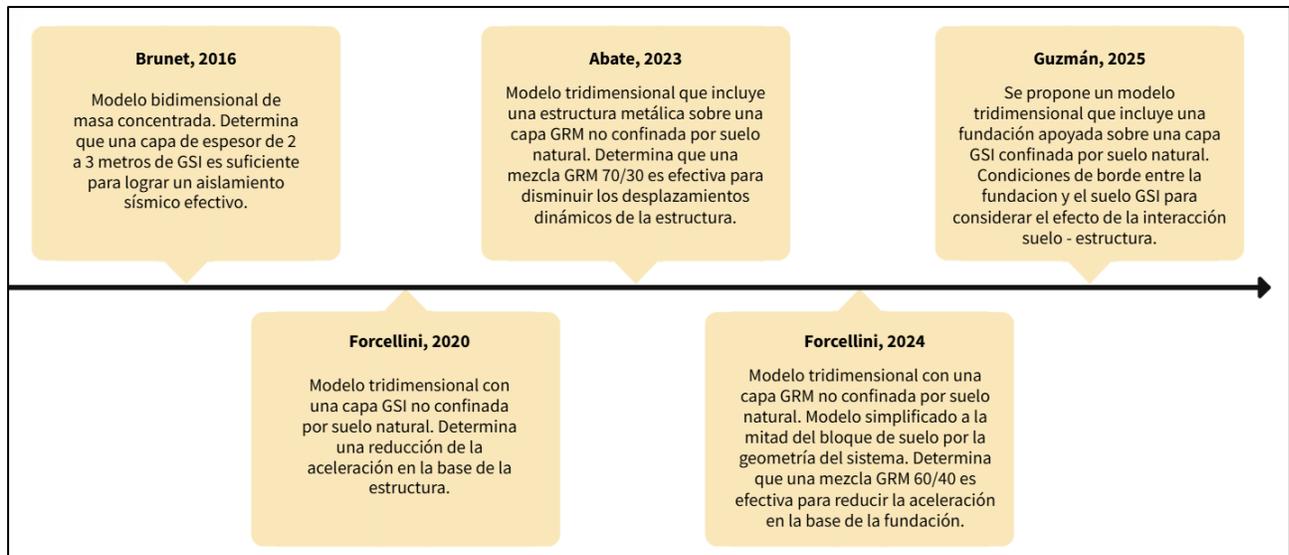
Recientemente, el estudio de (Forcellini et al., 2024) evalúa la eficiencia en la disipación de energía sísmica de sistemas de aislamiento sísmico geotécnico (GSI) compuestos por

mezclas de grava con caucho reciclado (GRM), utilizando diferentes contenidos volumétricos de caucho (10%, 25% y 40%). Mediante simulaciones en OpenSees, se buscó analizar el comportamiento dinámico no lineal del GSI y del suelo natural subyacente, así como cuantificar el efecto de filtro de la capa GRM en la transmisión de aceleraciones sísmicas hacia la fundación. La geometría del modelo consistió en un dominio de 33.0 metros de largo por 16.5 metros de ancho y una altura total de 21.1 metros, compuesto por tres capas: una zapata de fundación de 0.5 metros, una capa GSI-GRM de 0.6 metros, y un depósito de suelo natural de 20 metros de espesor. Una característica importante del modelo fue la simplificación estructural adoptada: no se incluyó ninguna superestructura, es decir, no se modeló el edificio. En su lugar, se utilizó solo la mitad del continuo suelo-zapata, lo que permitió reducir los costos computacionales **[Figura 13]**. Sin embargo, esta simplificación puede limitar la representatividad del modelo frente a condiciones reales, ya que se omite la interacción dinámica entre el suelo y la estructura. La masa de la estructura, sus modos de vibración y sus fuerzas inerciales no son considerados, lo que puede subestimar el esfuerzo transferido al suelo y sobrestimar la capacidad de aislamiento del sistema. Los resultados obtenidos mostraron que la eficiencia del sistema GSI depende tanto del contenido de caucho como de la frecuencia del movimiento sísmico. Las simulaciones demostraron que la mezcla con 40% de caucho presentó un comportamiento significativamente más favorable, con deformaciones concentradas en la capa GRM y reducciones claras en la aceleración transmitida hacia la zapata, especialmente a frecuencias altas como 8 Hz. Por el contrario, la grava pura y la mezcla con 10% de caucho no ofrecieron una reducción significativa de las aceleraciones, mostrando un comportamiento rígido y poca capacidad de disipación. Se identificaron umbrales de aceleración por encima de los cuales las mezclas comienzan a disipar energía, siendo estos umbrales menores para contenidos de caucho más altos.



**Figura 13:** Modelo Simplificado de (Forcellini et al., 2024)

La presente investigación busca modelar completamente la fundación sobre el suelo GSI, y a su vez, representar el suelo natural rodeando el suelo GSI por los costados y por debajo. En un sistema real, la capa mejorada con GSI no se encuentra aislada, sino que está confinada lateral y verticalmente por el suelo natural circundante. Este confinamiento influye directamente en la forma en que las ondas sísmicas se propagan, cómo se disipan las deformaciones y qué tan efectivo es el mecanismo de aislamiento. Ignorar estas interacciones llevaría a una subestimación de la rigidez del sistema o a una sobrestimación de su eficiencia como aislador sísmico. Además, el hecho de que el suelo natural rodee completamente al suelo GSI por debajo y los costados permite que se reproduzcan **efectos de borde y condiciones de confinamiento lateral** que ocurren en la realidad. Esta configuración también resulta adecuada para evaluar aspectos como la interacción suelo–estructura, los efectos de escala (relación entre tamaño de fundación y espesor del GSI), y la sensibilidad del sistema ante diferentes geometrías o configuraciones del GSI. La **Figura 14** muestra la evolución de modelos numéricos de simulaciones de sistemas GSI de la literatura revisada junto con la innovación de este estudio.



**Figura 14:** Línea de tiempo de estudios de modelación numérica de sistemas GSI [elaboración propia]

## 2.6 Normativas y Regulaciones

### 2.6.1 Normativas Nacionales:

- Norma NCh 2745.Of2003. Análisis y diseño de edificios con aislación sísmica. Esta norma establece las disposiciones exigibles al análisis y diseño de edificios que cuenten con algún dispositivo de aislación sísmica.
- Norma NCh3411.Of2017. Diseño sísmico de edificios con sistemas pasivos de disipación de energía. Requisitos y métodos de ensayo.
- Norma NCh 433.Of1996 (Mod 2012). Diseño sísmico de edificios.
- Norma NCh2369.Of2003 (y 2023). Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales.

### 2.6.2 Normativas Estadounidenses:

- ASCE/SEI 7. Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures. Chapter C17. Seismic design requirements for seismically isolated structures.
- ASCE/SEI 41-23. Seismic evaluation and retrofit of existing buildings. Chapter 14. Seismic Isolation. Chapter 15. Design requirements for structures with supplemental energy dissipation.
- FEMA P58. Seismic Performance Assessment of Buildings.

- FEMA P-2091. A practical guide to Soil-Structure Interaction.
- ASTM. D6270-08. Standard practice for use of scrap tires in civil engineering applications.

### **2.6.3 Normativas Europeas:**

- Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Chapter 10. Base Isolation.
- CEN/TS 14243. Materials produced from end-of-life tyres-specification of categories based on their dimension(s) and impurities and methods for determining their dimension(s) and impurities. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2010.

Todas las normativas mencionadas anteriormente están orientadas al diseño sísmico de estructuras y edificios con aislación sísmica en la base, así como al diseño sismorresistente convencional. Aunque estas normas y especificaciones no fueron específicamente creadas para sistemas GSI, igualmente sirven como fundamento para desarrollar un diseño sismorresistente que cumpla con los estándares nacionales e internacionales.

## **3 METODOLOGÍA**

En esta sección se presentan los métodos utilizados en el análisis de la investigación. Se detallan los ensayos de laboratorio realizados a las mezclas de SRG, con el objetivo de determinar su proporción óptima de materiales y las variables consideradas en esta selección. A continuación, se describe el procedimiento del ensayo dinámico aplicado a la mezcla seleccionada para la calibración del modelo numérico. Posteriormente, se describe el proceso de implementación del modelo en OpenSees, detallando las propiedades del material calibrado a partir de los resultados experimentales y la estrategia de discretización utilizada para la correcta representación del espacio tridimensional. Finalmente, se discuten los parámetros de control empleados en la simulación y los criterios de evaluación utilizados para comparar la respuesta dinámica de la estructura con y sin el sistema de aislación geotécnica

### 3.1 Caracterización de Mezclas

La arena y gravilla utilizada en este estudio corresponden a áridos del río Biobío (*Áridos HH*), mientras que el caucho es reciclado a partir de neumáticos (*RUBTEC*).

De acuerdo con la literatura y con el objetivo de comprender cómo influye la variación del contenido de cada material en la mezcla GSI, la **Tabla 1** muestra las mezclas estudiadas en este proyecto y su composición de materiales. El comportamiento mecánico de estas mezclas se compara con el de una muestra control (100% arena).

**Tabla 1:** Contenido de materiales por mezcla [elaboración propia]

ID MEZCLA	ARENA	CAUCHO	GRAVILLA
SRG 80/20/0	80%	20%	0%
SRG 75/25/0	75%	25%	0%
SRG 70/30/0	70%	30%	0%
SRG 50/45/5	50%	45%	5%
SRG 50/40/10	50%	40%	10%
SRG 50/30/20	50%	30%	20%

Las proporciones fueron seleccionadas de manera que permitieran observar tanto la transición desde un comportamiento dominado por la arena hacia uno dominado por el caucho, como la influencia progresiva de la incorporación de gravilla.

Las primeras tres mezclas (SRG 80/20/0, SRG 75/25/0 y SRG 70/30/0) no contienen gravilla, y su objetivo es analizar el efecto directo del contenido volumétrico de caucho en una mezcla arenosa. Este enfoque permite estudiar la evolución del comportamiento mecánico, la compresibilidad y la capacidad de disipación de energía con el aumento del contenido de caucho desde un valor moderado (20%) hasta uno más alto (30%).

Las siguientes tres mezclas (SRG 50/45/5, SRG 50/40/10 y SRG 50/30/20) introducen **gravilla** de forma progresiva, reduciendo el contenido de caucho para mantener constante la fracción de arena en 50%. Estas configuraciones están orientadas a evaluar el efecto de la gravilla, que puede mejorar la rigidez y la resistencia al corte del material, sin comprometer completamente la flexibilidad introducida por el caucho.

### 3.1.1 Granulometría

Se realizó un ensayo granulométrico a cada material por separado mediante tamizado por vibración durante 15 minutos [Figura 15]. Posteriormente se determinó la masa de suelo retenida en cada tamiz en relación con la masa total ensayada. Los resultados fueron graficados en escala logarítmica y se determinaron parámetros relevantes como el Coeficiente de Uniformidad ( $C_u$ ) y el Coeficiente de Curvatura ( $C_c$ ). Las curvas logarítmicas representan la distribución de partículas de la mezcla, graficando el porcentaje que pasa por cada tamiz en función del diámetro de las partículas en escala logarítmica.



Figura 15: Ensayo granulométrico [elaboración propia]

Como la **variación del tamaño de partículas no es una variable de estudio en este proyecto**, se estableció una relación fija de  $D_{50, R} / D_{50, S} = 2$ , de acuerdo con el estudio de (Tsiavos, et al. 2019). Todas las mezclas fueron preparadas para llegar a esta relación de diámetros medios entre la arena y el caucho. Con respecto a la gravilla, se limitó el tamaño de las partículas entre 2 – 4.75 mm para no dañar la máquina de corte directo. Para esto, fue necesario chancar la gravilla adquirida en una máquina de chancado por mandíbula hasta llegar a la granulometría deseada. Posterior a la preparación de cada mezcla, esta se volvió a tamizar para considerar la granulometría de todos los materiales que componen la muestra.

### 3.1.2 Densidad Máxima y Mínima ( $\rho_{max}, \rho_{min}$ )

El procedimiento de este ensayo se llevó a cabo según lo estipulado en lo estipulado en NCh 1726 (INN, 2009). Se determinó la densidad mínima mediante el método de vaciado

por poruña a una distancia de no más de 1 – 2 cm para evitar el acomodamiento de partículas y compactación indeseada [Figura 16 a]. De esta manera, se llenó un molde de volumen conocido con la mezcla a ensayar. Finalmente, se determinó la masa de la mezcla para calcular la densidad mínima. Este ensayo se repitió tres veces por cada mezcla y se consideró el mínimo valor de densidad entre las tres repeticiones, de acuerdo con la normativa vigente.

Para determinar la densidad máxima de cada mezcla, se aplicó el método de vibrado en seco al molde con la mezcla de densidad mínima y de masa conocida por 8 minutos con una masa vertical de 24.101kg sobre el mismo [Figura 16 b]. Se disminuyó la frecuencia de vibrado al paso de cada minuto para asegurar el correcto acomodamiento de partículas. Posteriormente, se midió el promedio del descenso de la tapa del molde en 4 puntos para determinar la variación de volumen por compactación y su densidad máxima.

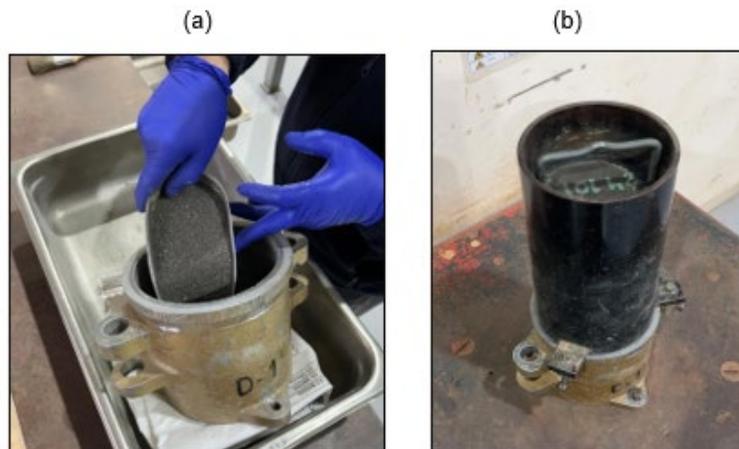


Figura 16: Ensayo de densidad mínima (a) y máxima (b) [elaboración propia]

### 3.1.3 Gravedad Específica (Gs)

El procedimiento de este ensayo se llevó a cabo según lo estipulado en NCh 1532 Of.80 (INN, 1980). Se determinó la gravedad específica de cada material y cada muestra por separado mediante el método de picnómetro [Figura 17]. Para esto, se secó la muestra estudiada en un horno a 105 – 110 °C hasta peso constante y se dejó enfriar. Luego, se pesó el picnómetro vacío, después con la muestra seca, y posteriormente se llenó con agua destilada, eliminando burbujas de aire antes de pesarlo nuevamente. Luego, se vació, se limpió y se llenó solo con agua hasta el volumen de referencia para obtener su

peso. Finalmente, se calcula la gravedad específica de las partículas sólidas mediante la **Ecuación 4**.

**Ecuación 4:** Gravedad Específica

$$G_S = \frac{M_S}{M_S + M_{PA} - M_{SPA}}$$

Donde,  $M_S$  es la masa del suelo seco;  $M_{PA}$  es la masa del picnómetro con el volumen de agua destilada de referencia y;  $M_{SPA}$  es la masa del picnómetro con el agua y el suelo.



**Figura 17:** Ensayo de gravedad específica [elaboración propia]

Además, en base al valor de gravedad específica y densidad (máxima y mínima) calculado para cada mezcla, es posible calcular el valor del índice de vacíos (máximo y mínimo para cada mezcla mediante la **Ecuación 5**.

**Ecuación 5:** Índice de Vacíos

$$e = \frac{G_S \cdot \gamma_W}{\gamma_S} - 1$$

Donde,  $e$  es el índice de vacíos;  $\gamma_W$  es el peso específico del agua y;  $\gamma_S$  es el peso específico de la mezcla.

### 3.1.4 Corte Directo

Se realizaron ensayos de corte directo a la mezcla de control (100% arena) y a las 6 mezclas GSI. Todos los ensayos de corte directo se realizaron con muestras secas a una velocidad de carga (*Shear Rate*) de  $SR = 0.5\text{mm/min}$ . La caja de corte utilizada en este

ensayo [Figura 7] tiene una base de 10 x 10 cm y una altura de 6 cm [Figura 18]. Cada mezcla ensayada fue compactada en este volumen hasta llegar a una densidad media entre  $\rho_{min}$  y  $\rho_{max}$ , según 3.1.2. Previo al ensayo se registra la masa de la mezcla y su índice de vacíos. El procedimiento de este ensayo se llevó a cabo según lo estipulado en NCh 3085 Of.2007 (INN, 2007).



Figura 18: Ensayo de Corte Directo [elaboración propia]

Cada ensayo de corte directo se repitió 3 veces con esfuerzos normales de 12 kPa, 22 kPa, y 32 kPa, para desarrollar la envolvente de falla y determinar el ángulo de fricción interna de cada muestra. Los valores de confinamiento se basan en el estudio de (Tsiavos, et al. 2019) y corresponden a las siguientes configuraciones de carga:

**$\sigma'_v = 12$  kPa:** Corresponde a una estructura de 6x8 m con una cubierta ligera de acero, soportada por muros de albañilería de 0,4 m de espesor y 2 m de altura, a través de columnas de acero tubular IPE de tamaño estándar.

**$\sigma'_v = 32$  kPa:** Corresponde al esfuerzo de cimentación de una estructura de albañilería de un piso de 4x4 m, con una losa de 0.2 m de espesor apoyada sobre muros de albañilería reforzada o no reforzada de 0,4 m de espesor y 3 m de altura. La diferencia en los niveles de esfuerzo de cimentación entre ambas estructuras se debe principalmente a la diferencia de peso entre la losa de hormigón y la cubierta ligera de acero.

### 3.2 Ensayo Triaxial

El ensayo triaxial cíclico consolidado no drenado (CU) se realizó con el objetivo de evaluar el comportamiento mecánico de la mezcla bajo condiciones sísmicas. Para ello, se moldeó una muestra cilíndrica con dimensiones estandarizadas, asegurando una distribución homogénea de los materiales constituyentes. La muestra fue encapsulada con una membrana de látex para evitar el drenaje del agua durante la fase de carga y se instaló en la celda triaxial, colocando los drenajes y sensores de presión de poros.

Posteriormente, se aplicó un flujo de agua sin burbujas de aire a la muestra para alcanzar un coeficiente de saturación adecuado. La verificación de la saturación se realizó mediante la relación entre la presión del agua y la presión aplicada, obteniendo un valor  $B$  superior a 0.95. Luego, se aplicó una presión de confinamiento de 30 kPa, permitiendo el drenaje del exceso de presión de poros hasta alcanzar condiciones de equilibrio. Esta presión de consolidación fue seleccionada para garantizar la compatibilidad con los ensayos de corte directo.

Una vez consolidada la muestra, se aplicó una carga axial de carácter cíclico controlado por deformación, simulando condiciones de carga sísmica. Durante esta fase, se monitoreó la variación de la presión de poros y la deformación axial para analizar la respuesta de la mezcla ante cargas repetitivas.

Finalmente, se registraron los datos de esfuerzo, deformación y presión de poros en función del número de ciclos aplicados. Con esta información, se evaluó la resistencia y el comportamiento de la mezcla bajo condiciones sísmicas, determinando el nivel de degradación de rigidez y acumulación de deformaciones. Este procedimiento permite obtener información relevante sobre la respuesta mecánica de la mezcla en condiciones de carga dinámica, facilitando la comparación con otros ensayos geotécnicos realizados en el estudio **[Figura 19]**.



Figura 19: Ensayo Triaxial [elaboración propia]

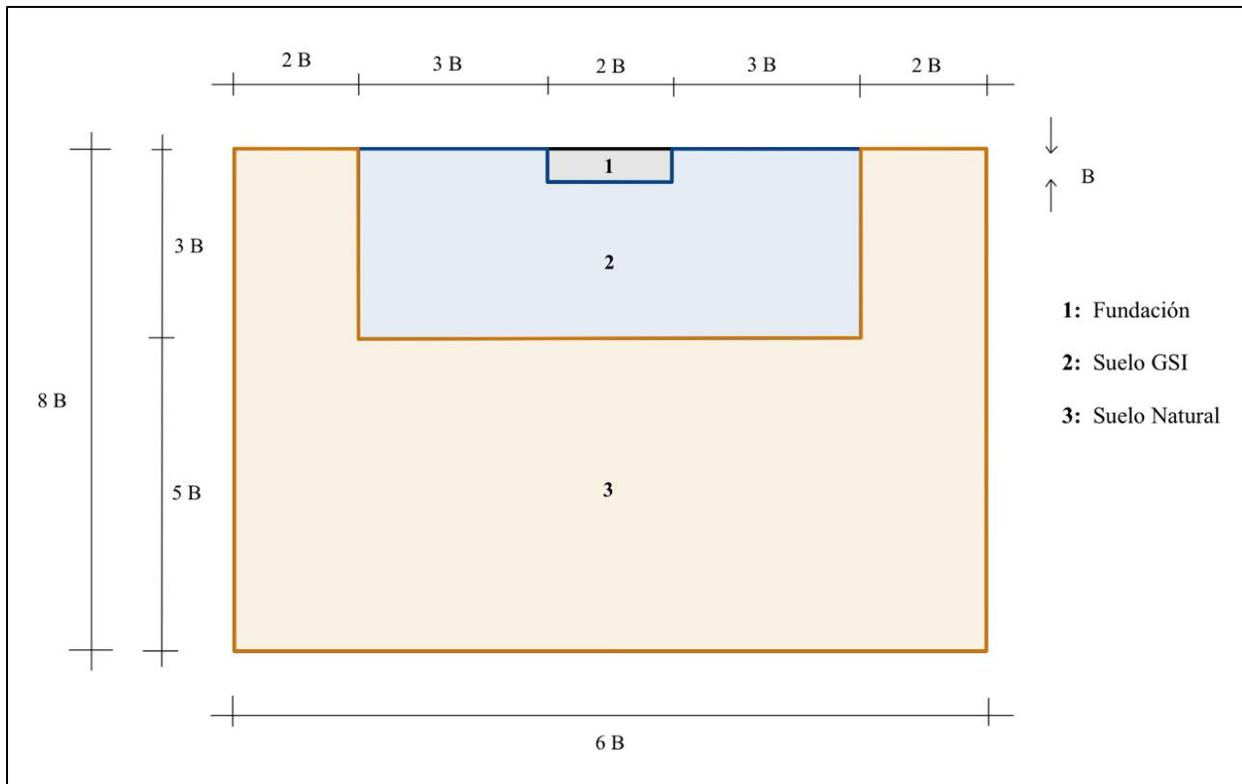
### 3.3 Ensayo de Modelación Numérica – OpenSees

#### 3.3.1 Descripción del desarrollo

En este proyecto se estudia la respuesta dinámica de un sistema suelo - estructura. El análisis del sistema completo (fundación – suelo GSI – suelo natural), permite capturar de manera realista la interacción entre el suelo y la estructura. El sistema considera una fundación superficial cuadrada y de una profundidad determinada. Esta fundación se apoya sobre la mezcla de suelo GSI estudiado, el que a su vez se encuentra rodeado por suelo natural [Figura 20]. Este sistema fue sometido a una excitación sinusoidal en la base y se determinó la respuesta dinámica en diversos puntos del sistema. El modelo con suelo GSI se comparó con los resultados de un modelo idéntico solo con suelo natural; de esta manera es posible evidenciar los efectos de la mezcla GSI estudiada en el modelo propuesto.

#### 3.3.2 Dimensiones y discretización

Las dimensiones del sistema dependen de una única variable, siendo “**B**” la profundidad de la zapata y la mitad del ancho de la fundación cuadrada. El bloque total de suelo tiene una base cuadrada de  $12 B \times 12 B$  y una altura de  $8 B$  [Figura 19]. En este estudio, se determinó la variable  $B = 1m$  para ahorrar costos computacionales. Sin embargo, en estudio futuros se puede incrementar esta medida para representar mejor las dimensiones reales de este sistema.



**Figura 20:** Esquema de modelación – Corte Transversal [elaboración propia]

El sólido *fundación – suelo GSI – suelo natural* fue discretizado con elementos finitos hexaédricos de 20 nodos con dimensiones de 0.5m x 0.5m x 0.5m **[Figura 21 a]**. La mayor cantidad de nodos permite una mejor aproximación de las deformaciones y tensiones en el suelo, lo que resulta en una representación más precisa de su comportamiento bajo cargas estáticas o dinámicas. El elemento '20NodeBrick' considera 8 nodos en las esquinas y 12 nodos en las aristas. A partir de estos elementos, se definieron las regiones de fundación, suelo GSI, y suelo natural. **[Figura 21 b]**.

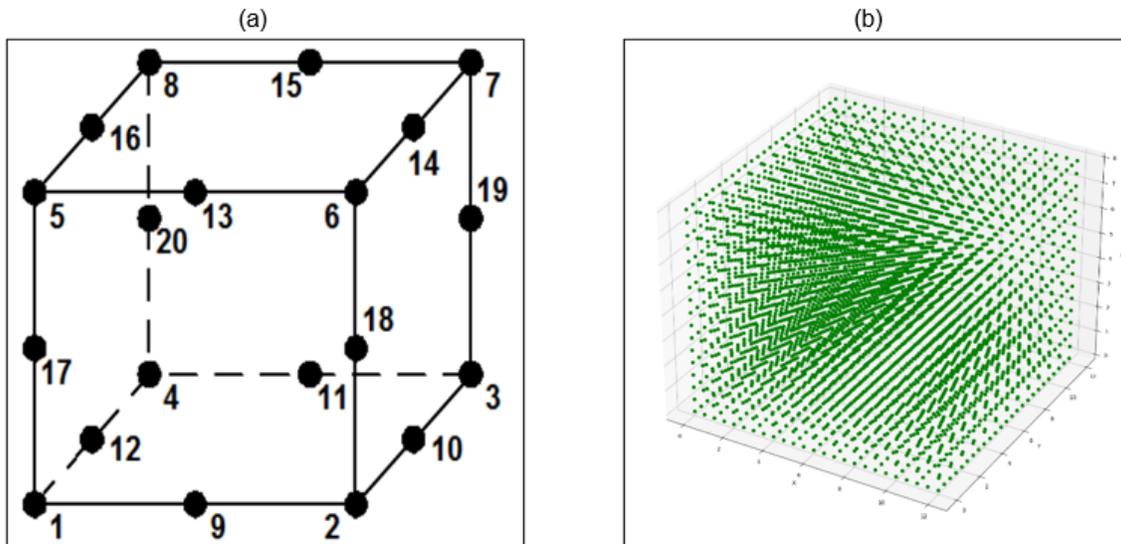


Figura 21: Elemento '20NodeBrick' [Opensees] (a) y Mapa de nodos [elaboración propia] (b)

### 3.3.3 Materiales y Secciones

Los elementos de suelo (GSI y natural) fueron modelados mediante el material 'PressureDependMultiYield'. Este tipo de material es diseñado para capturar el comportamiento no lineal y dependiente de la presión de materiales granulares. Su rigidez y resistencia dependen de la presión de confinamiento, lo que le permite simular de manera más realista el comportamiento del suelo bajo diferentes condiciones de carga. Además, emplea múltiples superficies de fluencia concéntricas para modelar la evolución de la plasticidad en esfuerzos cíclicos. La **Tabla 2** muestra los valores de los parámetros del suelo natural y GSI.

Tabla 2: Propiedades del suelo natural y GSI [elaboración propia]

Parámetro / tipo de suelo	Suelo GSI	Suelo Natural
Densidad del suelo seco [g/cm <sup>3</sup> ]	1.5	1.8
Módulo de Corte [kPa]	6.0 x 10 <sup>4</sup>	1.0 x 10 <sup>5</sup>
Módulo de Compresibilidad [kPa]	1.9 x 10 <sup>5</sup>	3.7 x 10 <sup>5</sup>
Ángulo de Fricción Interna	28.98 °	31.0 °
Deformación máxima de corte	0.04	0.1
Presión de referencia [kPa]	30.0	100.0
Ángulo de Transformación de Fase	26.0 °	26.0 °

Por otro lado, la fundación de hormigón fue modelada mediante un material elástico isotrópico. La **Tabla 3** resume las propiedades de este material.

**Tabla 3:** Propiedades del hormigón

<b>Módulo de Elasticidad [Pa]</b>	2.1 x 10 <sup>11</sup>
<b>Coefficiente de Poisson</b>	0.3
<b>Densidad de masa [g/cm<sup>3</sup>]</b>	2.5

### **3.3.4 Condiciones de Borde**

Para considerar los efectos de la interacción suelo – estructura entre la fundación y el suelo GSI, se duplicaron los nodos de contacto entre estas dos superficies. Se igualaron los grados de libertad de la base de la fundación con su nodo de contacto del suelo GSI con el objetivo de evitar el levantamiento y deslizamiento de la fundación. De esta manera, se asegura que la aislación sísmica ocurra en el suelo GSI. Por otro lado, los costados de la fundación fueron conectados al suelo GSI mediante resortes uniaxiales que representan la fricción entre ambos materiales de manera transversal, y la presión normal del suelo sobre la fundación de manera longitudinal. Esta misma metodología se replicó en los costados del bloque total de suelo natural para simular condiciones infinitamente lejanas, mientras que la base del bloque total de suelo natural se fijó en todos sus grados de libertad para simular el lecho rocoso.

### **3.3.5 Estados de Carga**

- **Análisis Gravitacional**

El presente estado de carga corresponde al análisis gravitacional del modelo con comportamiento elástico, ejecutado mediante el método transitorio cuasiestático. El objetivo principal de este análisis es aplicar gradualmente las cargas gravitacionales con el fin de establecer un estado de equilibrio inicial en la estructura, considerando únicamente su propio peso, sin incluir efectos inerciales significativos. Esta etapa permite estabilizar las condiciones iniciales del sistema antes de la aplicación de cargas dinámicas posteriores.

- **Análisis Dinámico con Excitación Armónica**

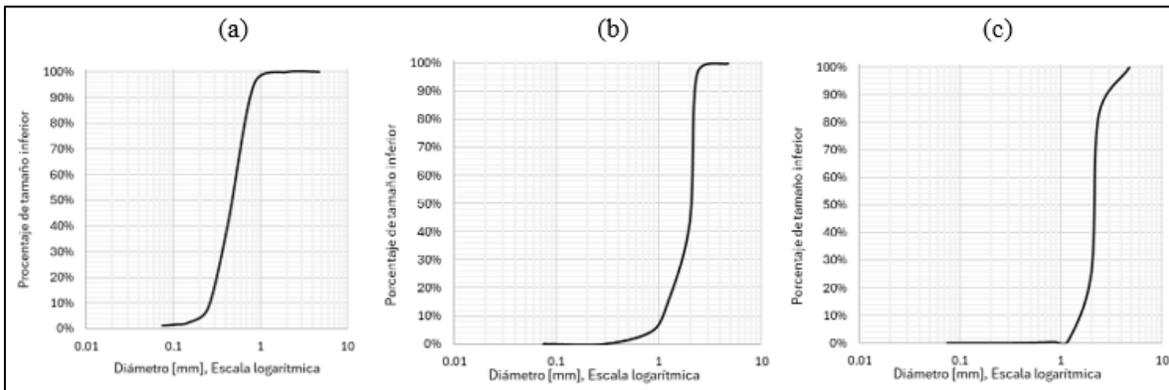
Este análisis fue configurado como transitorio variable y corresponde a un análisis dinámico en el cual se somete el bloque total de suelo a una **excitación armónica en la base**, con el objetivo de evaluar la respuesta estructural frente a cargas cíclicas controladas en el tiempo. Esta condición permite caracterizar el comportamiento dinámico del sistema (fundación, suelo GSI, suelo natural). La excitación se definió mediante una serie temporal que genera una señal de forma senoidal con duración total de 10 segundos y período de 1 segundo. Esta señal se aplicó como carga dinámica uniforme en la dirección horizontal (eje X), a través del patrón de carga 'UniformExcitation'.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterización de Mezclas

#### 4.1.1 Granulometría

La **Figura 22** muestra las curvas granulométricas del grupo de control, de la mezcla 1, y la mezcla 6. Los resultados granulométricos completos de las 6 mezclas y 3 materiales se encuentran en el Anexo 7.1.



**Figura 22:** Curva Granulométrica Logarítmica. a) SRG 100/0/0. b) SRG 80/20/0. c) SRG 50/30/20 [elaboración propia]

Se observa que, al aumentar la proporción de caucho y gravilla, la curva granulométrica se extiende lateralmente, lo que refleja la mayor variedad en el tamaño de las partículas y un aumento del coeficiente de uniformidad ( $C_u$ ) [Anexo 7.1]. De igual manera, se observa un desplazamiento de la curva hacia la derecha, lo que demuestra el aumento del tamaño de las partículas. Finalmente, una disminución del coeficiente de curvatura

(Cc) indica que, al aumentar el porcentaje de caucho y gravilla, se obtiene una distribución granulométrica menos eficiente.

#### 4.1.2 Densidad Máxima y Mínima

La **Tabla 4** muestra los valores máximos y mínimos de densidad e índice de vacíos de cada mezcla. Se observa una disminución de los parámetros de densidad, gravedad específica, e índice de vacíos a medida que aumenta el porcentaje de caucho. Se obtuvo una Gravedad específica para las partículas de caucho de  $G_{s,R} = 0.99$ , un valor similar al obtenido el estudio de Tsiavos, et al. 2019 ( $G_{s,R} = 1.04$ ). En cuanto a la arena, este estudio utiliza dos tipos de arena: la mezcla 1 consiste en arena “*Leighton Buzzard Sand*” con parámetros de ( $e_{max} = 0.84$ ,  $e_{min} = 0.53$ ,  $G_{s,s} = 2.65$ ), mientras que la mezcla 2 consiste en arena “*Redhill Sand*” con parámetros de ( $e_{max} = 1.01$ ,  $e_{min} = 0.61$ ,  $G_{s,s} = 2.65$ ). Estos valores son similares a los resultados obtenidos en el presente estudio a la arena del río Biobío ( $e_{max} = 0.90$ ,  $e_{min} = 0.56$ ,  $G_{s,s} = 2.74$ ). Finalmente, las mezclas en el estudio de Tsiavos, et al. 2019, se preparan a una proporción de **SR 50/50**, con un índice de vacíos inicial objetivo de  $e = 0.73$ . Por otro lado, el presente estudio compara mezclas con distintas proporciones de arena, caucho, y gravilla. Todas las mezclas se prepararon a un índice de vacíos inicial objetivo medio entre su valor máximo y mínimo [**Tabla 4**].

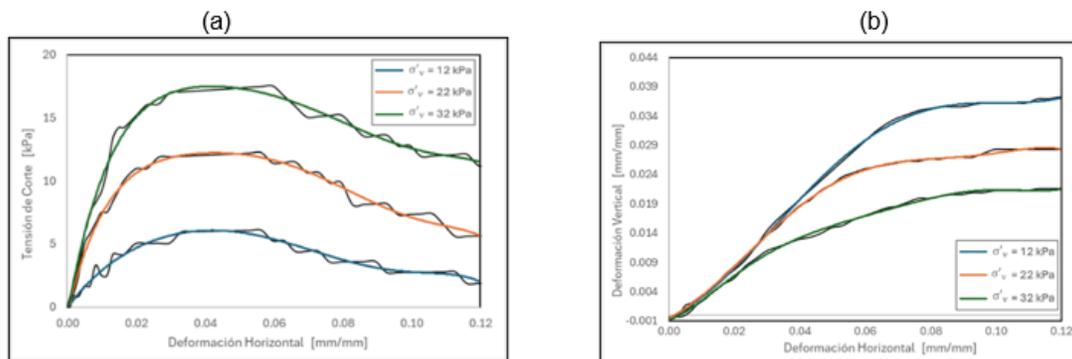
**Tabla 4:** Límites de Densidad e Índice de Vacíos [elaboración propia]

Mezcla	Densidad Mínima [g/cm <sup>3</sup> ]	Densidad Máxima [g/cm <sup>3</sup> ]	Gravedad específica, G <sub>s</sub>	e <sub>MIN</sub>	e <sub>MAX</sub>
<b>Arena</b>	1.441	1.757	2.74	0.56	0.90
<b>Caucho</b>	0.439	0.555	0.99	0.76	1.20
<b>Gravilla</b>	1.207	1.510	2.65	0.78	1.25
<b>SRG 80/20/0</b>	1.304	1.585	2.13	0.51	0.83
<b>SRG 75/25/0</b>	1.288	1.584	2.01	0.46	0.81
<b>SRG 70/30/0</b>	1.252	1.565	1.84	0.41	0.77
<b>SRG 50/45/5</b>	1.144	1.387	1.59	0.45	0.79
<b>SRG 50/40/10</b>	1.119	1.355	1.58	0.52	0.80
<b>SRG 50/30/20</b>	1.048	1.331	1.65	0.57	0.85

#### 4.1.3 Ensayo de Corte Directo

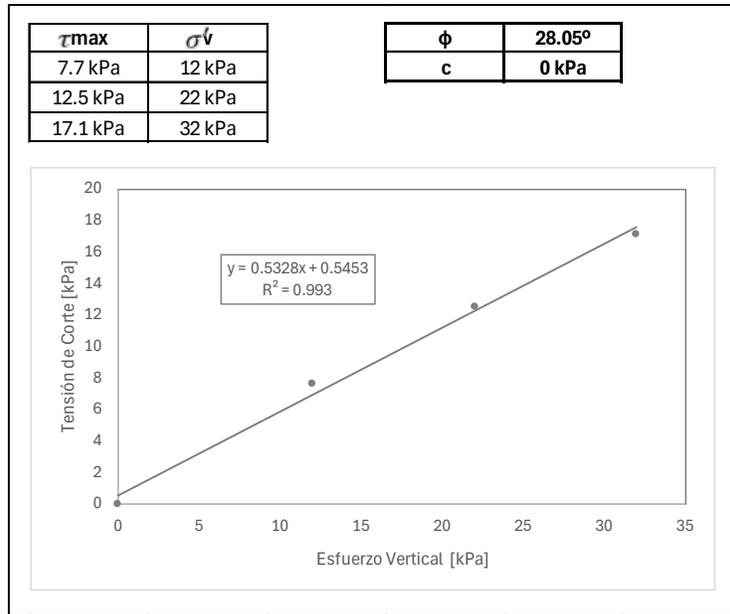
En esta sección se presenta un resumen de los ensayos de corte directo realizados a la muestra de control (100% arena) y a las 6 mezclas SGR. Los resultados completos del

ensayo de corte directo se encuentran en el **Anexo 7.2**. La **Figura 23** muestra los resultados de la mezcla **SRG 70/30/0**. Los datos brutos recopilados del ensayo de corte directo permiten graficar la relación entre la tensión de corte y la deformación cortante [**Figura 23 a**], como también la relación entre la deformación vertical y la deformación cortante [**Figura 23 b**]. Se observa que la mezcla en cuestión alcanza una deformación horizontal de 0.04 mm/mm para su tensión máxima de corte en los tres niveles de confinamiento.



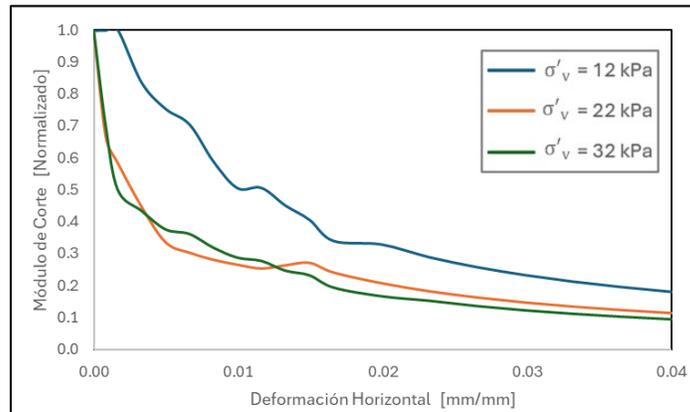
**Figura 23:** a) Tensión de corte v/s Deformación cortante. b) Deformación vertical v/s Deformación cortante. Mezcla SRG 70/30/0. [elaboración propia]

A partir de los valores máximos de tensión de corte y su deformación horizontal correspondiente de cada mezcla, se construyó la envolvente de falla M $\ddot{o}$ hr – Coulomb utilizando sus tres niveles de confinamiento. La **Figura 24** muestra la envolvente de falla de la mezcla **SRG 70/30/0**. Se unieron los tres puntos m $\acute{a}$ ximos de los c $\acute{i}$ rculos de M $\ddot{o}$ hr con una l $\acute{i}$ nea de tendencia que mejor se ajustara a los datos, obteniendo el  $\acute{a}$ ngulo de fricci $\acute{o}$ n interna a partir de la pendiente de esta l $\acute{i}$ nea. Si bien se observa que la envolvente no pasa exactamente por el origen, se aproxima la cohesi $\acute{o}$ n de la mezcla igual a 0. Esta aproximaci $\acute{o}$ n se justifica en base a que en mezclas granulares, la resistencia al corte proviene principalmente del rozamiento interno entre part $\acute{i}$ culas. Adem $\acute{a}$ s, los valores peque $\acute{n}$ os de cohesi $\acute{o}$ n que a veces se obtienen en estos ensayos pueden deberse al propio ajuste lineal de la envolvente de falla, lo que produce una cohesi $\acute{o}$ n “aparente” que no representa el comportamiento real del material en terreno, por lo que en algunos casos se observa que la envolvente interseca al eje de tensi $\acute{o}$ n de corte en la secci $\acute{o}$ n negativa. [**Anexo 7.2.3**]



**Figura 24:** Envolvente de falla Mohr – Coulomb. Mezcla SRG 70/30/0 [elaboración propia]

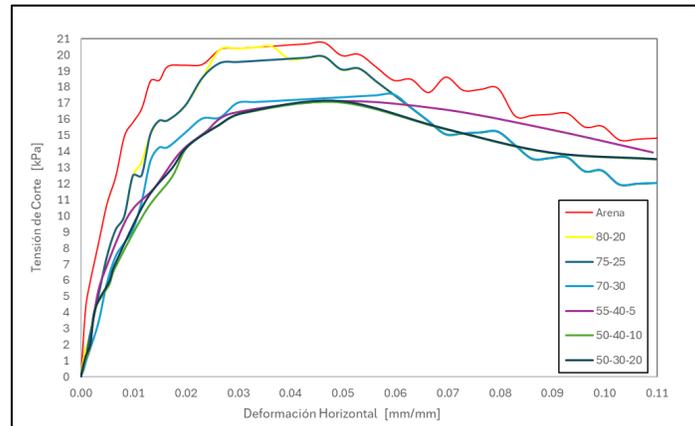
A partir de la **Ecuación 2**, se elaboró la curva de degradación del módulo de corte secante normalizado. La **Figura 25** muestra el ejemplo de esta curva de la mezcla 3 para los 3 niveles de confinamiento de la mezcla **SRG 70/30/0**. Se observa una rápida degradación del módulo de corte para pequeñas deformaciones [0 – 0.01 mm/mm], formando una curva logarítmica para los tres niveles de confinamiento.



**Figura 25:** Degradación del Módulo de Corte. Mezcla SRG 70/30/0. [elaboración propia]

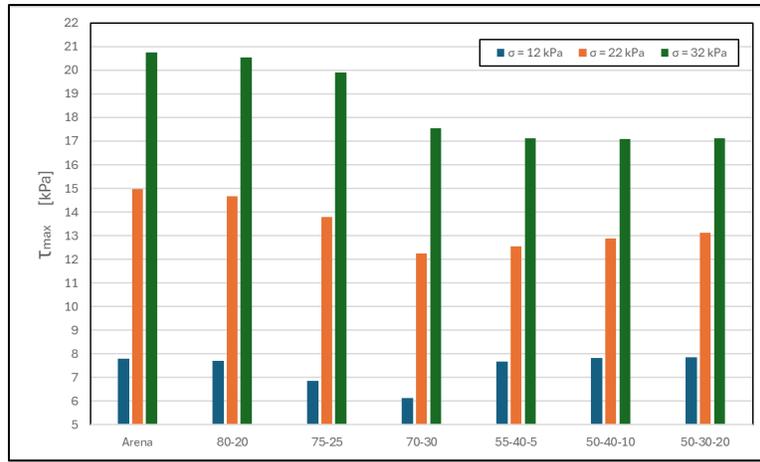
La **Figura 26** muestra la variación de la tensión de corte a medida que se incrementa la deformación horizontal, para todas las mezclas ensayadas, para una presión de confinamiento de 32 kPa. Se observa que la muestra de control presenta la mayor resistencia al corte, mientras que a medida que se aumenta el porcentaje de caucho,

disminuye la máxima tensión de corte, lo que coincide con los resultados obtenidos en el estudio de (Tsiavos et al., 2019). Además, se observa que, al aumentar el porcentaje de caucho, la tensión máxima de corte ocurre a una mayor deformación horizontal.



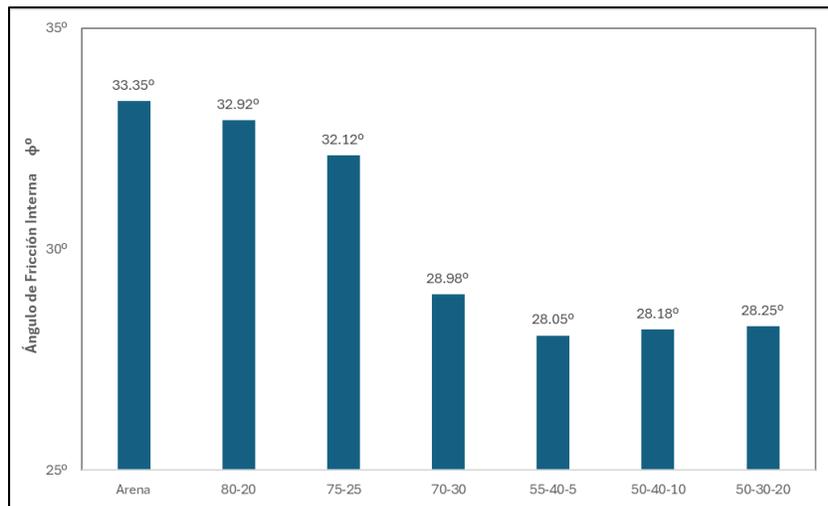
**Figura 26:** Tensión de Corte v/s Deformación Horizontal (elaboración propia)

La **Figura 27** muestra la máxima resistencia al corte que alcanza cada mezcla en cada nivel de confinamiento. Se observa que la muestra de control alcanza una tensión de corte de alrededor de 21 kPa, mientras que la tensión de las mezclas con mayor porcentaje de caucho ronda los 17 kPa. Además, se observa una clara disminución de la resistencia al corte cuando se sobre pasa el umbral de 30% de porcentaje de caucho, lo que coincide con los resultados del estudio de (Salman & Erdin, 2015). Por otro lado, se observa que las mezclas que contienen gravilla muestran muy poca variación en su tensión máxima de corte para el nivel de confinamiento de 32 kPa, mientras que para los niveles de menor confinamiento (22 kPa y 12 kPa), la tensión máxima de corte aumenta levemente al aumentar el porcentaje de gravilla en la mezcla.



**Figura 27:** Máxima Tensión de Corte por Mezcla (elaboración propia)

La **Figura 28** muestra el ángulo de fricción interna por cada mezcla ensayada. Se observa que el ángulo de fricción interna disminuye a medida que se aumenta la proporción de caucho, notándose un cambio significativo cuando la proporción de caucho llega a un 30%. Además, se observa un leve aumento del valor del ángulo de fricción interna a medida que aumenta la proporción de gravilla en las mezclas 4, 5, y 6.



**Figura 28:** Ángulo de Fricción Interna (elaboración propia)

Por otro lado, la **Figura 29** muestra la máxima deformación vertical de cada muestra en los tres niveles de confinamiento. Como es de esperarse, a medida que aumenta el porcentaje de caucho, aumenta la máxima deformación vertical. Sin embargo, al introducir un 20% de gravilla en las mezclas, se observa que la deformación vertical disminuye considerablemente.

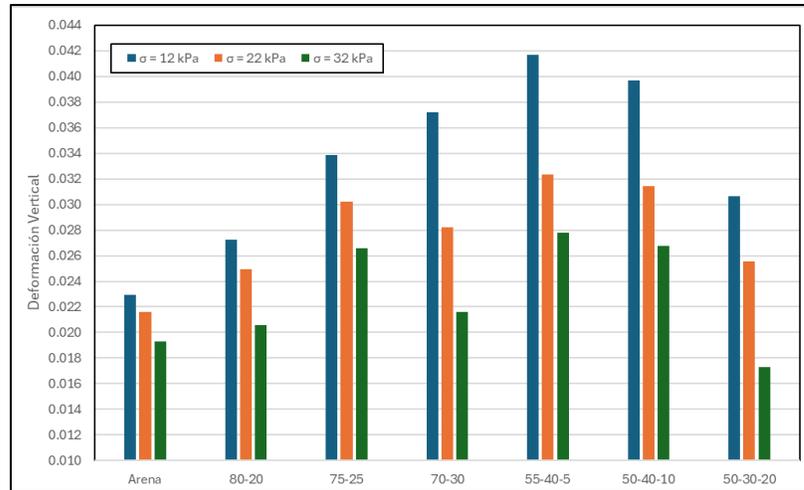


Figura 29: Deformación vertical máxima por mezcla (elaboración propia)

La Figura 30 muestra la variación del módulo de corte máximo por cada mezcla ensayada para los tres niveles de confinamiento. Se observa una disminución abrupta del módulo de corte al introducir caucho a la mezcla estudiada. La presencia de gravilla incrementa levemente el módulo de corte.

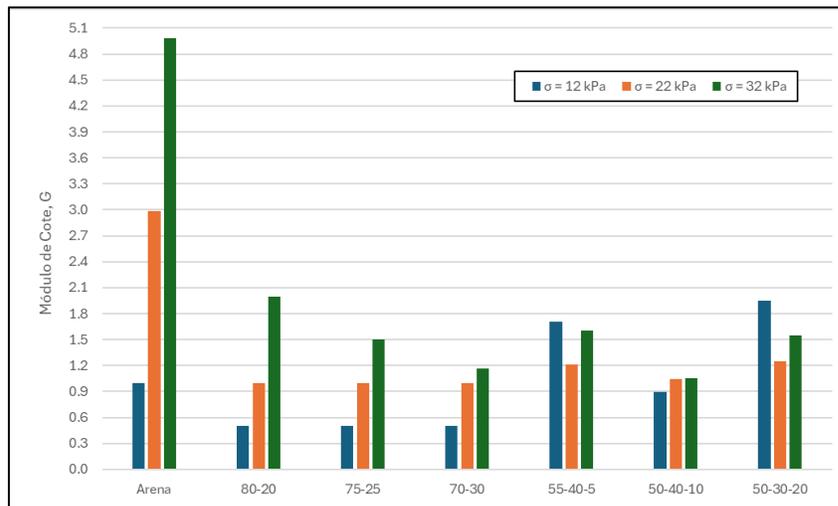
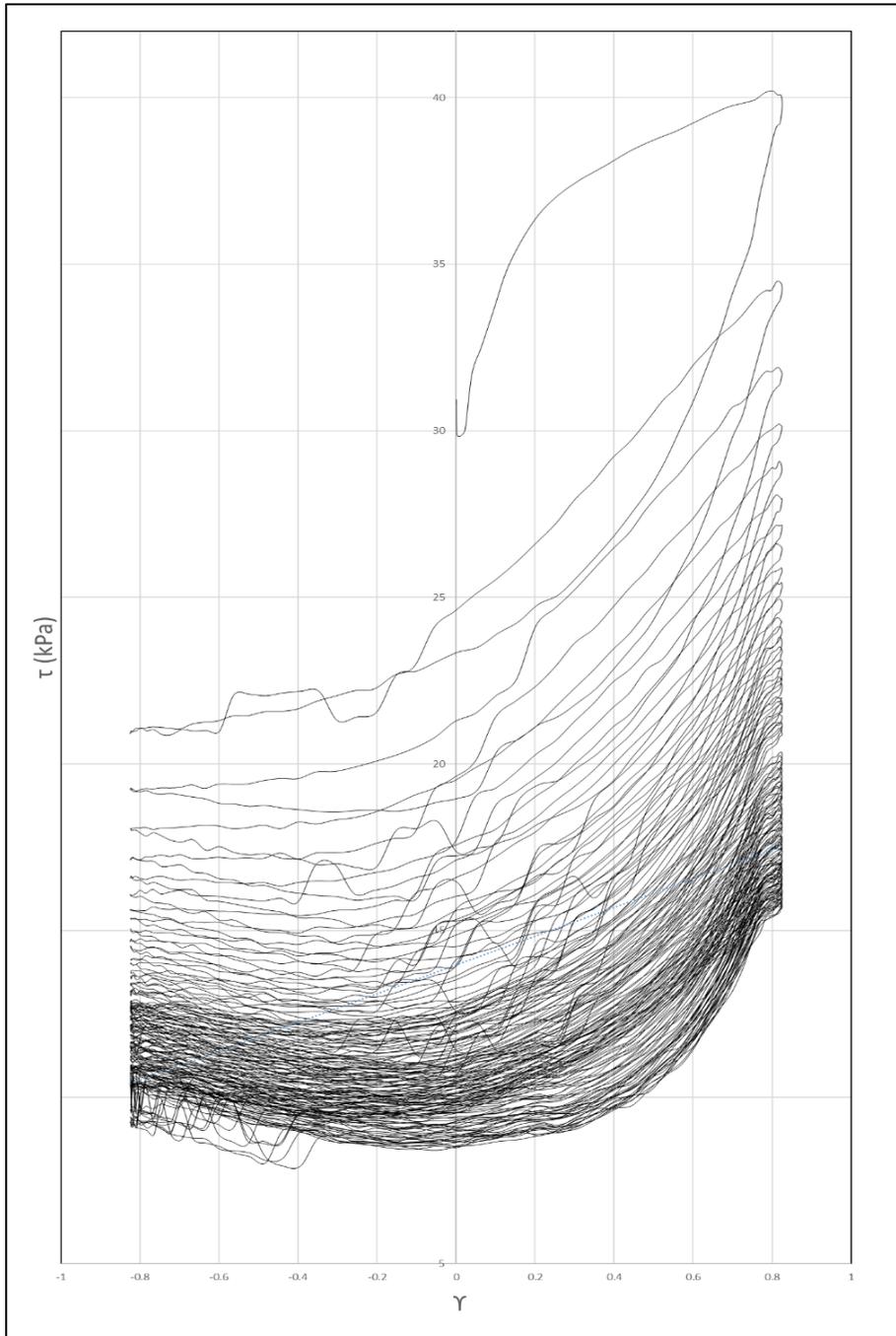


Figura 30: Módulo de corte por mezcla (elaboración propia)

## 4.2 Ensayo Triaxial

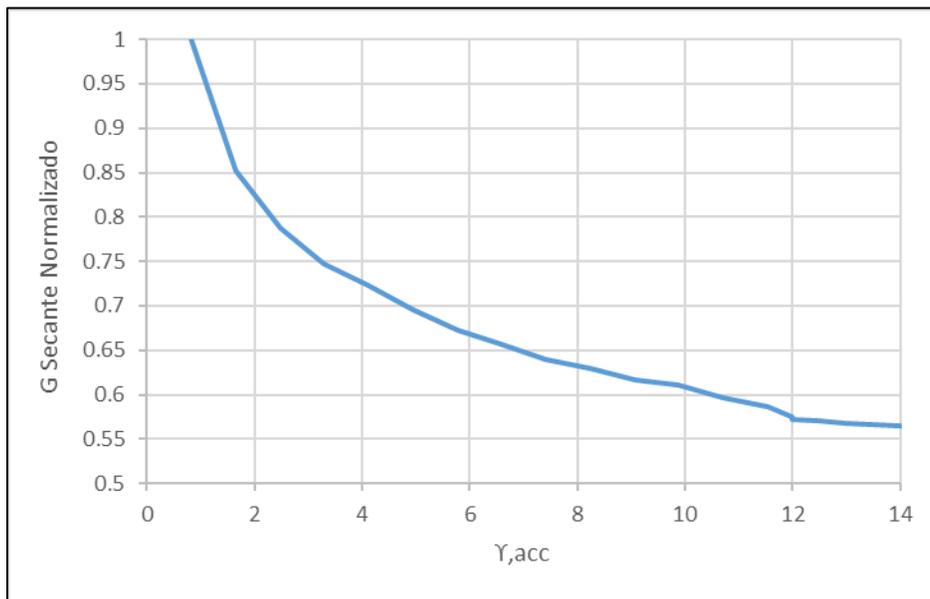
Esta sección describe los resultados obtenidos a partir de un ensayo triaxial cíclico consolidado no – drenado aplicado a la mezcla SRG 70/30/0. La Figura 31 muestra un conjunto de curvas esfuerzo cortante versus deformación cortante. Las trayectorias de carga muestran la formación progresiva de lazos histeréticos, donde se observa una acumulación de deformación plástica cíclica, evidenciada por el desplazamiento horizontal progresivo del centro de cada ciclo hacia valores positivos de la deformación

cortante, característica que también se observa en el estudio de (Senthen Amuthan et al., 2020). Además, en la presente investigación, se observa que la amplitud de los ciclos tiende a incrementarse ligeramente con el tiempo, y la pendiente en las fases iniciales de cada ciclo se reduce, indicando una pérdida de rigidez.



**Figura 31:** Curva histerética de esfuerzo cortante versus deformación cortante. [elaboración propia]

La **Figura 32** muestra la degradación del módulo de corte secante normalizado en función de la deformación de corte acumulada para la mezcla **SRG 70/30/0**, obtenida a partir del ensayo triaxial cíclico. La curva desciende progresivamente, indicando una pérdida significativa de rigidez a medida que aumentan las deformaciones, con una caída rápida en los primeros tramos ( $\gamma_{acc} < 2\%$ ) y una estabilización en torno a  $G/G_{max} \approx 0.55$  para deformaciones mayores. Esta evolución refleja el reacomodo de partículas, la pérdida de contactos efectivos y el comportamiento viscoelástico del caucho dentro de la mezcla.



**Figura 32:** Degradación del Módulo de Corte (Triaxial). [elaboración propia]

El ensayo triaxial revela una respuesta más controlada y tridimensional, adecuada para caracterizar la rigidez en condiciones de confinamiento, mientras que el ensayo de corte directo muestra una respuesta más frágil y sensible a pequeñas deformaciones, capturando los efectos localizados de corte puro.

### 4.3 Ensayo de Modelación Numérica

En esta sección se resumen los resultados obtenidos a partir del ensayo de modelación numérica en *OpenSees*. La **Figura 33** muestra la figura deformada del sistema en su primer modo de vibrar. Se observa un aplastamiento en el eje X del sistema, consecuente con la señal armónica en esta misma dirección. Este modo presenta un periodo de 0.077 segundos.

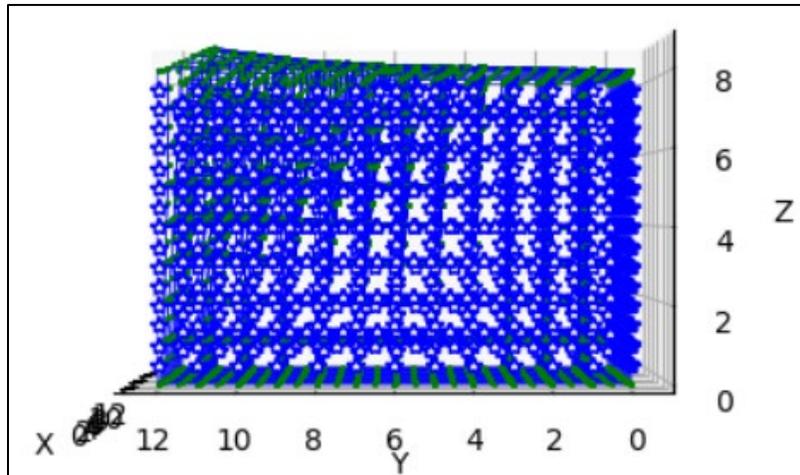


Figura 33: Figura deformada [elaboración propia]

### 4.3.1 Desplazamiento y Aceleración

Se registró el desplazamiento y aceleración y diversos nodos del sistema. La **Figura 34** muestra la ubicación de los nodos registrados.

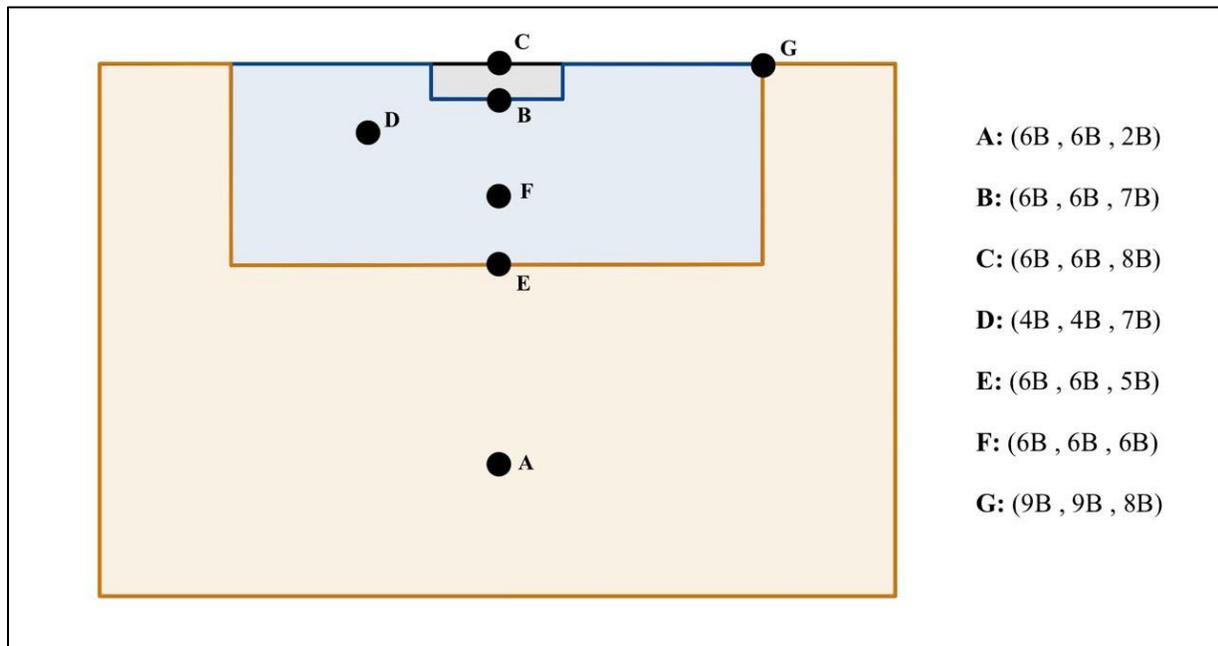


Figura 34: Nodos registrados [elaboración propia]

El **Nodo A**, ubicado en el suelo natural, alejado de la fundación, es útil como punto de referencia para registrar el movimiento libre del terreno, sin la influencia directa de la fundación ni del suelo GSI. El **Nodo B** se encuentra en la base de la fundación, justo en el contacto con el suelo mejorado. Es clave para registrar el movimiento de la fundación,

ya que representa el punto de transmisión de esfuerzos desde la estructura hacia el suelo GSI. El **Nodo C**, ubicado en la parte superior de la fundación, este punto es importante para analizar la respuesta dinámica de la estructura y calcular la aceleración máxima transmitida a la superestructura. El **Nodo D**, ubicado dentro del volumen del suelo mejorado, cerca de la superficie. Su respuesta permite estudiar cómo se disipa la energía sísmica dentro del suelo GSI en comparación a la respuesta de los nodos C y G. El **Nodo E**, se encuentra justo debajo de la fundación, en el interior del suelo mejorado. Su respuesta ayuda a entender la transmisión de esfuerzos y el amortiguamiento vertical dentro del suelo GSI. El **Nodo F**, también dentro del suelo GSI, pero a media profundidad. Es útil para observar la evolución de esfuerzos internos y su propagación hacia zonas más profundas. Finalmente, el **Nodo G**, situado en la superficie del suelo natural, alejado lateralmente de la fundación y en la intersección entre el suelo GSI y el suelo natural, permite evaluar la propagación lateral de ondas sísmicas y comparar la respuesta del suelo mejorado con el suelo sin tratamiento.

La **Figura 35** muestra el desplazamiento ante un forzante armónico para los puntos C, D y G, reflejando cómo varía la respuesta dinámica dentro del sistema suelo–fundación–estructura. El punto C presenta el menor desplazamiento, lo que indica una mayor rigidez y control estructural. El punto G registra una amplitud intermedia, representando la respuesta libre del terreno sin mejora. En cambio, el punto D muestra la mayor amplitud de desplazamiento, evidenciando una respuesta amplificada y más flexible. Aunque las oscilaciones ocurren en fase temporal, se observa un **desfase en términos de amplitud** en el punto D respecto a los otros puntos.

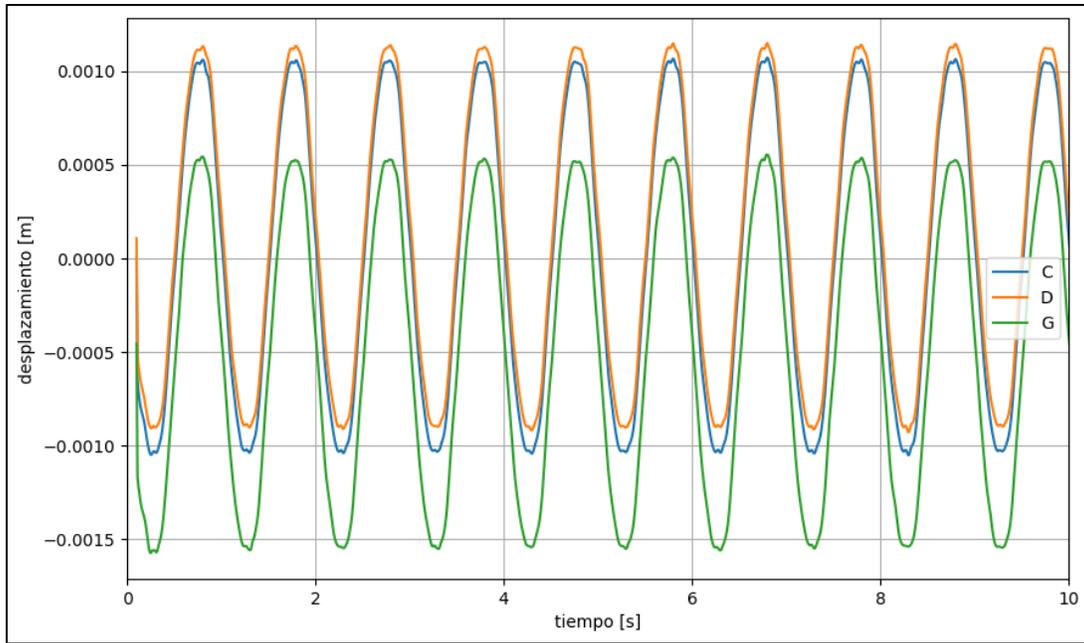


Figura 35: Desplazamiento de los nodos C, D, y G [elaboración propia]

La **Figura 36** muestra el desplazamiento máximo absoluto registrado en los puntos **A**, **B**, **E** y **F** del modelo. El **nodo B** presenta el mayor desplazamiento (ligeramente por sobre 1.0 mm), seguido por el **nodo F** (aproximadamente 1.0 mm), y luego por el **nodo E** con un valor cercano a 0.9 mm. En contraste, el **nodo A** registra el menor desplazamiento, alcanzando apenas 0.47 mm. Estos valores reflejan una distribución no uniforme del desplazamiento dentro del dominio, con claras diferencias entre zonas más superficiales y profundas, así como entre regiones de suelo GSI y natural.

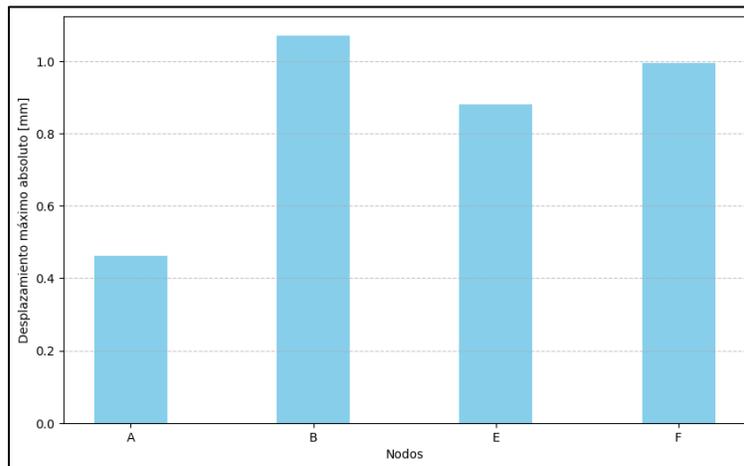
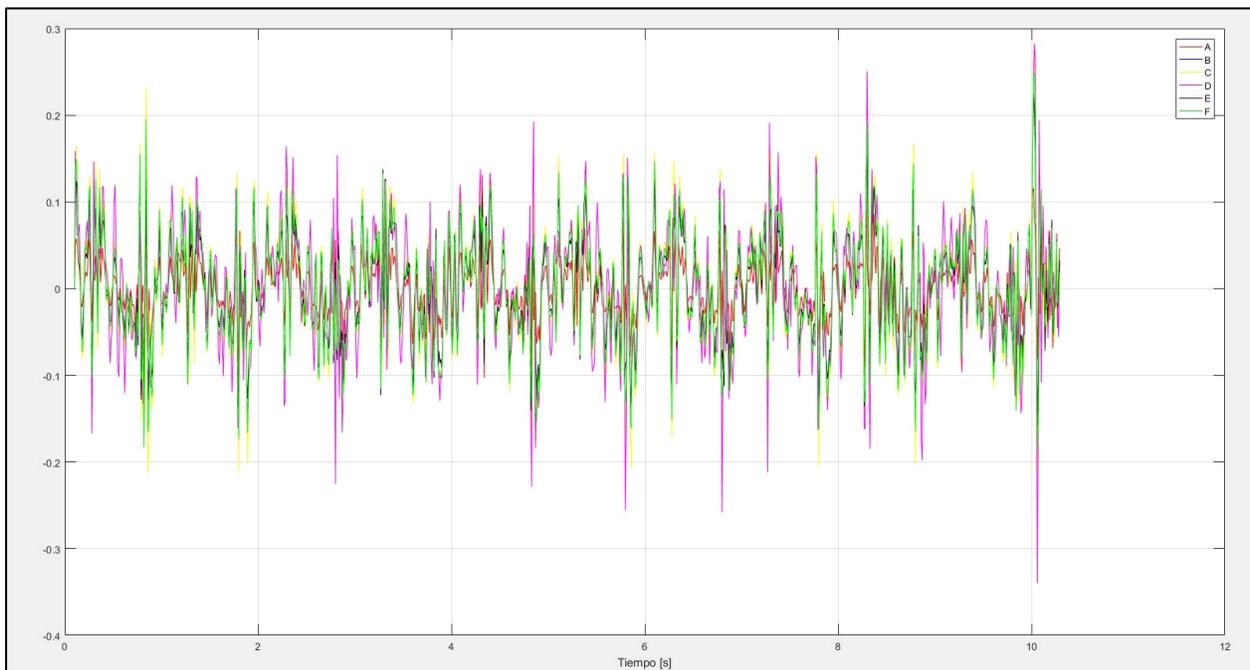


Figura 36: Desplazamiento máximo de los nodos A, B, E y F [elaboración propia]

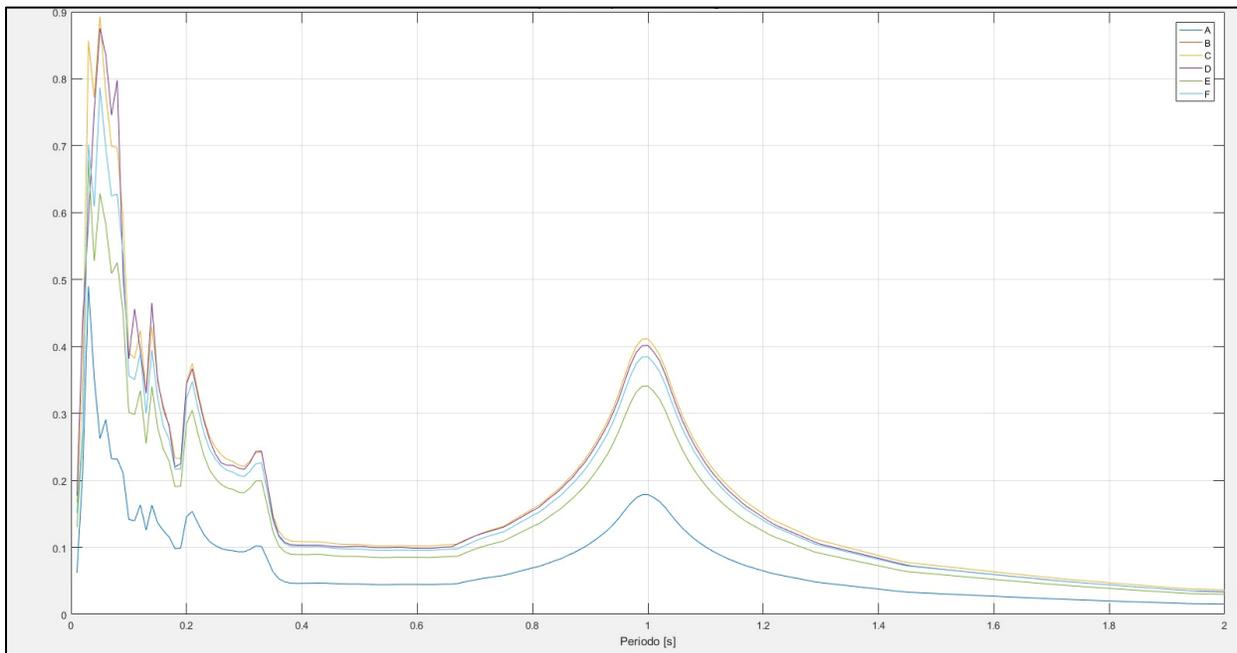
En cuanto a las aceleraciones en los nodos registrados, la **Figura 37** muestra la aceleración en función del tiempo, permitiendo observar cómo se propagan e intensifican las vibraciones a lo largo del modelo. Se aprecia que los nodos **D** y **C**, ubicados en la parte superior del modelo (D en el suelo mejorado y C en la parte superior de la fundación), presentan las **aceleraciones más altas**, lo que indica una mayor amplificación del movimiento en las zonas cercanas a la superficie. En contraste, el nodo **A**, ubicado más profundamente en el suelo natural, muestra **valores más atenuados**, como es esperable en una zona de menor excitación dinámica y mayor confinamiento. Los nodos **B**, **E** y **F**, situados en la interfase fundación-suelo mejorado y en el interior del GSI, presentan aceleraciones intermedias, con ligeras variaciones entre ellos, que reflejan cómo la energía sísmica se disipa progresivamente desde la base hacia la superficie.



**Figura 37:** Aceleraciones en nodos registrados [elaboración propia]

A partir del registro de aceleraciones, se obtuvo el espectro de aceleraciones. Para esto, se aplicó una transformada de Fourier rápida al registro (*FFT, Fast Fourier Transform*) para identificar las frecuencias dominantes del movimiento y conocer el contenido espectral de la señal. Se definió un rango de periodos de vibración y se estableció un nivel de amortiguamiento del 5%. Para cada periodo, resolvió la ecuación de movimiento

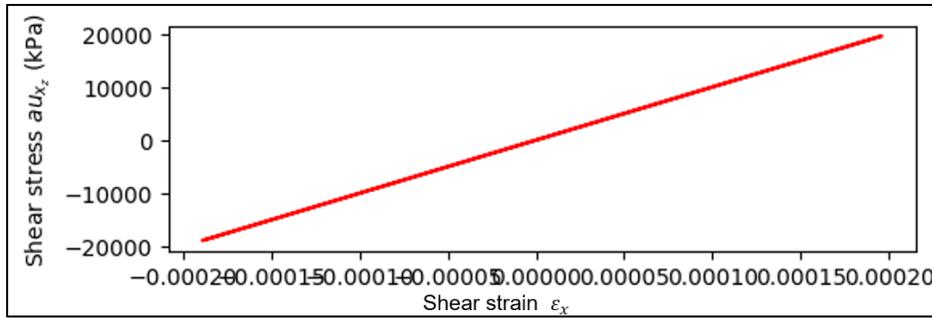
de un sistema de un grado de libertad (SDOF) sometido al movimiento del suelo. La **Figura 38** muestra el espectro de aceleraciones del sistema, el cual representa la máxima respuesta dinámica en función del periodo. Se observa que todos los espectros presentan un primer máximo significativo en torno a los 0.1 segundos, y un segundo máximo más amplio en torno a 1.0 segundo. En general, los nodos B, C, D, E, F y G presentan valores similares entre sí, especialmente en los periodos intermedios y largos, mientras que el nodo A mantiene valores de aceleración significativamente más bajos en todo el espectro. El nodo D alcanza el mayor valor espectral en los periodos cortos, seguido muy de cerca por los nodos E, G y F.



**Figura 38:** Espectro de aceleraciones [elaboración propia]

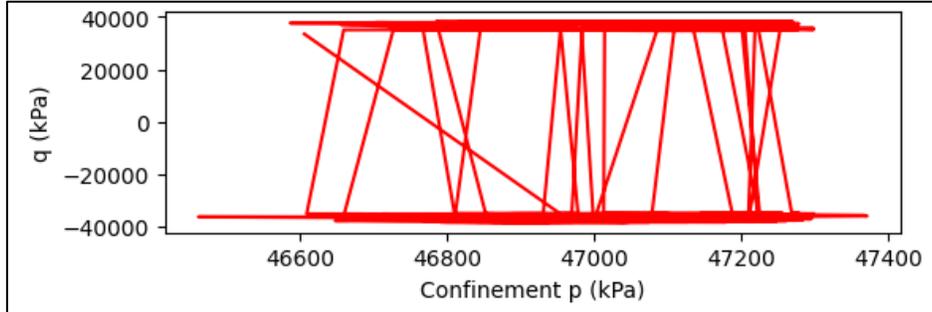
### 4.3.2 Esfuerzos y Deformaciones

La **Figura 39** muestra el esfuerzo de corte en función de la deformación por corte del elemento en la posición del **Nodo F**. Se observa una recta lineal ya que el suelo GSI no entró en su rango no lineal.



**Figura 39:** Esfuerzo de corte versus Deformación por corte [elaboración propia]

La **Figura 40** muestra el esfuerzo desviador ( $q$ ) en función del esfuerzo de confinamiento ( $p$ ). El gráfico presenta múltiples bucles histéricos que indican la aplicación repetida de cargas y descargas. El esfuerzo de confinamiento se mantiene en un rango estrecho entre aproximadamente 46,500 y 47,300 kPa, mientras que el esfuerzo desviador varía de manera significativa entre  $\pm 40,000$  kPa, lo que evidencia ciclos de carga completamente desarrollados. Las trayectorias de carga forman figuras cerradas y repetitivas que revelan el comportamiento cíclico del material bajo condiciones constantes de confinamiento.



**Figura 40:** Esfuerzo desviador versus esfuerzo de confinamiento [elaboración propia]

## 5 CONCLUSIONES

La presente investigación se centró en el estudio de una mezcla granular compuesta por **arena, caucho y gravilla**, con el objetivo de evaluar su desempeño como material de aislación sísmica de bajo costo. Se realizaron **ensayos de caracterización geotécnica** para determinar propiedades básicas como la densidad máxima y mínima, el peso específico y los índices de vacíos, lo que permitió definir rangos de compacidad representativos para su aplicación en terreno. Posteriormente, se llevaron a cabo **ensayos de corte directo** para evaluar la resistencia al corte y la estabilidad vertical de distintas proporciones de la mezcla. Complementariamente, se realizó un **ensayo triaxial cíclico no drenado** sobre la mezcla óptima, lo que permitió caracterizar su comportamiento dinámico en términos de histéresis, acumulación de deformaciones y degradación del módulo de corte. Finalmente, se desarrolló una **modelación numérica tridimensional en OpenSees**, considerando la fundación sobre suelo GSI y su interacción con el suelo natural circundante. Esta modelación permitió evaluar la respuesta dinámica del sistema ante excitaciones armónicas, validando el efecto aislante del suelo deformable a través del análisis de desplazamientos, aceleraciones y espectros de respuesta en distintos puntos del dominio.

- Entre todas las mezclas evaluadas, la mezcla **SRG 50/30/20** demuestra ser la opción más prometedora para **aislamiento sísmico geotécnico (GSI)**. Esta mezcla logró una reducción significativa en los parámetros de rigidez sin comprometer excesivamente la estabilidad estructural. Dado que esta mezcla no pudo ser sometida a ensayos triaxiales por la presencia de partículas de gravilla, se optó por evaluar la **Muestra SRG 70/30/0** ya resultó ser la mejor opción para aislamiento sísmico dentro de las mezclas que no contienen gravilla. El ensayo triaxial demostró que esta mezcla presenta una respuesta histerética clara bajo cargas cíclicas, reflejando su capacidad para disipar energía mediante deformaciones no lineales.
- El análisis numérico no logró capturar el comportamiento no – lineal del suelo debido a que la señal armónica **NO** excita el sistema en su periodo fundamental.

- El análisis del sistema fundación – suelo GSI – suelo natural mostró un **desfase en amplitud en el** suelo GSI, con respecto al suelo natural. Esto sugiere que el suelo GSI actúa como una **zona de desacople sísmico**, permitiendo deformaciones sin transmitir las directamente a la fundación, lo que contribuye a la disipación de energía. En contraste, la fundación filtró parte del movimiento, reduciendo la respuesta estructural.

Los resultados de la investigación confirman que la mezcla granular de arena, caucho y gravilla estudiada posee un comportamiento adecuado para su uso como sistema de aislación sísmica geotécnica. Se evidenció una reducción del ángulo de fricción con el aumento del contenido de caucho, favoreciendo el deslizamiento controlado, mientras que las curvas histeréticas mostraron una alta capacidad de disipación de energía; se identificó un comportamiento histerético típico, con acumulación de deformaciones plásticas, degradación progresiva de la rigidez, y una respuesta dependiente del contenido de caucho y de la densidad, sugiriendo un equilibrio óptimo en mezclas con contenido intermedio de caucho.

La modelación numérica tridimensional permitió evaluar la interacción suelo–estructura bajo excitaciones armónicas y sísmicas, confirmando que el GSI actúa como una capa de desacople dinámico, amplificando el desplazamiento en su interior pero reduciendo la aceleración transmitida a la fundación. Los desplazamientos y espectros de aceleración obtenidos en distintos nodos del modelo mostraron que la energía sísmica se disipa en el suelo mejorado, mientras que el suelo natural profundo presenta una respuesta más estable y amortiguada. En conjunto, los resultados validan que el uso de mezclas deformables como la estudiada es una alternativa viable y eficiente para la aislación sísmica de estructuras, especialmente en contextos de bajo costo o en edificaciones de baja a mediana altura, aportando una solución sustentable y de buen desempeño frente a eventos sísmicos severos.

## 6 REFERENCIAS

Abate, G., Fiamingo, A., Massimino, M. R., & Pitilakis, D. (2023). FEM investigation of full-scale tests on DSSI, including gravel-rubber mixtures as geotechnical seismic isolation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 172.

<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.108033>

*Ajuste de Curvas de Degradacion de Modulo de Corte y Razón de amortiguamiento.* (n.d.).

*Análisis experimental de la aislación sísmica de un estanque con líquido con interfaz de geosintéticos.* (n.d.).

Anastasiadis, A., Senetakis, K., & Pitilakis, K. (2012). Small-Strain Shear Modulus and Damping Ratio of Sand-Rubber and Gravel-Rubber Mixtures. *Geotechnical and Geological Engineering*, 30(2), 363–382. <https://doi.org/10.1007/s10706-011-9473-2>

Banović, I. , R. J. , G. N. et al. (2023). Effectiveness of several low-cost geotechnical seismic isolation methods: a shake-table study. *Springer Nature Link*.

Brunet, S., de la Llera, J. C., & Kausel, E. (2016). Non-linear modeling of seismic isolation systems made of recycled tire-rubber. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 85, 134–145. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2016.03.019>

*Concurso IDeA I+D 2025.* (n.d.).

Das, B. M. (n.d.). *Advanced Soil Mechanics; Fifth Edition.*

Dhanya, J. S., Boominathan, A., & Banerjee, S. (2020). Response of low-rise building with geotechnical seismic isolation system. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106187>

Edinson Guanchez. (2025, January 3). *Interacción Suelo Estructura aplicada al Diseño de Cimentaciones.* <https://Sismica-Institute.Com/Interaccion-Suelo-Estructura-Aplicada-al-Diseno-de-Cimentaciones/>.

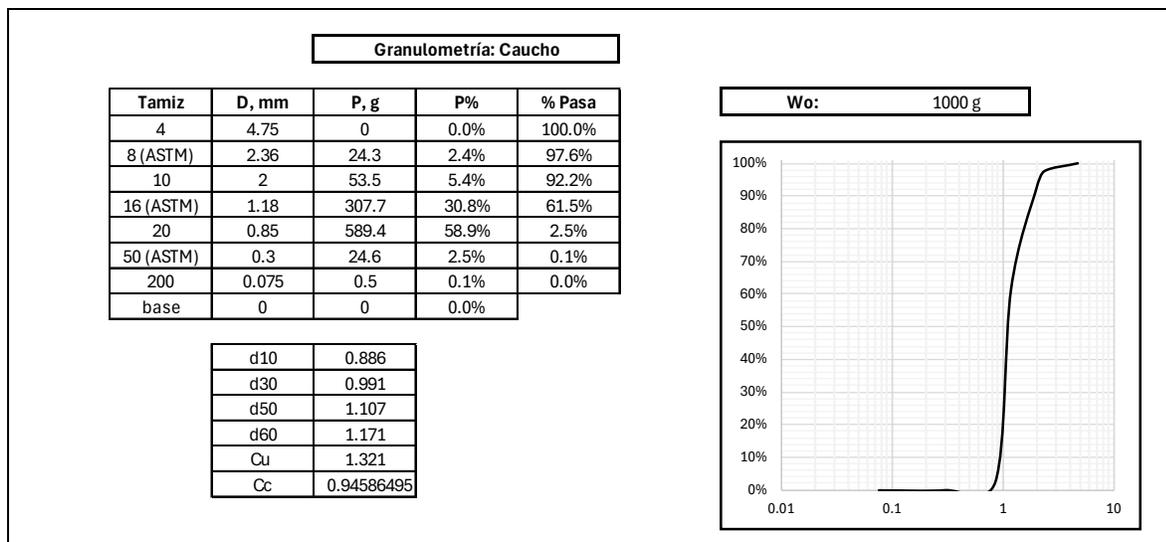
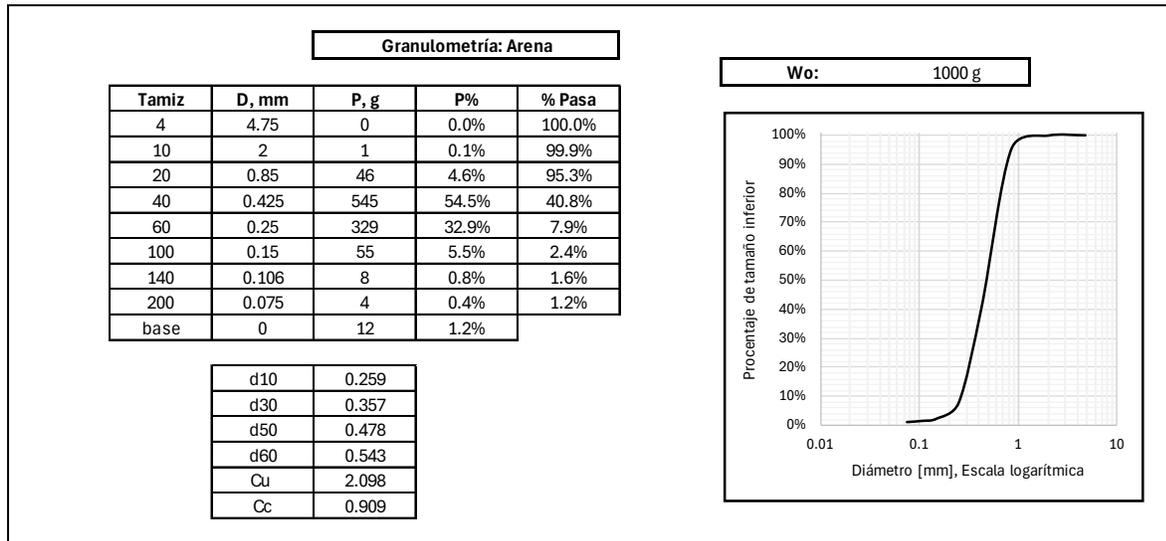
- Forcellini, D. (2020). Assessment of geotechnical seismic isolation (GSI) as a mitigation technique for seismic hazard events. *Geosciences (Switzerland)*, 10(6), 1–14. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060222>
- Forcellini, D., Chiaro, G., Palermo, A., Banasiak, L., & Tsang, H. H. (2024). Energy Dissipation Efficiency of Geotechnical Seismic Isolation with Gravel-Rubber Mixtures: Insights from FE Non-Linear Numerical Analysis. *Journal of Earthquake Engineering*, 28(9), 2422–2439. <https://doi.org/10.1080/13632469.2024.2312915>
- INN. (1980). Mecánica de Suelos – Determinación de la Densidad de Partículas Sólidas. In *NCh 1532 Of.80*.
- INN. (2007). Mecánica de Suelos – Métodos de Ensayo – Corte Directo de Suelos bajo condición Consolidada Drenada. In *NCh 3085 Of.2007*.
- INN. (2009). Mecánica de Suelos – Determinación de las Densidades Máxima y Mínima y Cálculo de la Densidad Relativa en Suelos No Cohesivos. In *NCh 1726/1-2009*.
- José Luis Almazán. (2010). *Comportamiento de estructuras antisísmicas durante el terremoto del maule y su posible efecto en las normas de diseño sísmico en Chile*. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2010/>
- Kechidi, S., Colaço, A., Alves Costa, P., Castro, J. M., & Marques, M. (2021). Modelling of soil-structure interaction in OpenSees: A practical approach for performance-based seismic design. *Structures*, 30, 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.01.006>
- Kelly, J. M. (2002). Seismic isolation systems for developing countries. *Earthquake Spectra*, 18(3), 385–406. <https://doi.org/10.1193/1.1503339>
- Lou, M., Wang, H., Chen, X., & Zhai, Y. (2011). Structure-soil-structure interaction: Literature review. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 31(12), 1724–1731. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2011.07.008>

- Makris, N. (2019). Seismic isolation: Early history. In *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* (Vol. 48, Issue 2, pp. 269–283). John Wiley and Sons Ltd.  
<https://doi.org/10.1002/eqe.3124>
- Mario Paz. (2009). *Dinámica Estructural*. Editorial Reverté.
- Mata, R., Nuñez, E., Hernández, M., Correa, C., & Bustamante, G. (2023). Seismic Performance of RC Moment Frame Buildings Considering SSI Effects: A Case Study of the New Venezuelan Seismic Code. *Buildings*, 13(7).  
<https://doi.org/10.3390/buildings13071694>
- Metamorworks. (2024, October 25). *Conventional structure and isolated building*. 2024.
- Miguel Medalla, et al. (2024). *Evaluacion de la Demanda Sismica en Chile*.
- Miura, Takumi., & Ikeda, Yuuki. (2009a). *Earthquake engineering : new research*. Nova Science Publishers.
- Miura, Takumi., & Ikeda, Yuuki. (2009b). *Earthquake engineering : new research*. Nova Science Publishers.
- Modelo-de-negocio-para-una-empresa.Recicladora-de-Neumaticos-Mineros-en-Chile*. (n.d.).
- Rouhanifar Salman, & Ibraim Erdin. (2015). *Laboratory investigation on the mechanics of soft-rigid soil mixtures*. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-601-9-1073>
- S, F. (2024a, December 17). *Soil Structure Interaction*.  
<https://www.Structuralengineeringsimplified.Com/MachineFoundation/Ssi/Ssi>.
- S, F. (2024b, December 29). *Apoyos de Neopreno: Definición y uso*.  
<https://Caelca.Com.Co/Apoyos-de-Neopreno/>.
- Seismic Isolation. History, Application, and Performance. A World View*. (n.d.).

- Senthen Amuthan, M., Boominathan, A., & Banerjee, S. (2020). Undrained cyclic responses of granulated rubber-sand mixtures. *Soils and Foundations*, 60(4), 871–885. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2020.06.007>
- Thermann, K., Gau, C., & Tiedemann, J. (2006). *Shear strength parameters from direct shear tests-influencing factors and their significance*.
- Timoshenko, S., & Goodier, J. N. (n.d.). *THEORY OF ELASTICITY*.
- Tsiavos, A., Alexander, N. A., Diambra, A., Ibraim, E., Vardanega, P. J., Gonzalez-Buelga, A., & Sextos, A. (2019). A sand-rubber deformable granular layer as a low-cost seismic isolation strategy in developing countries: Experimental investigation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105731>
- Vratsikidis, A., & Pitilakis, D. (2023). Field testing of gravel-rubber mixtures as geotechnical seismic isolation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 21(8), 3905–3922. <https://doi.org/10.1007/s10518-022-01541-6>
- Warn, G. P., & Ryan, K. L. (2012). A review of seismic isolation for buildings: Historical development and research needs. In *Buildings* (Vol. 2, Issue 3, pp. 300–325). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/buildings2030300>
- Xu, D. sheng, Liu, H. bei, Rui, R., & Gao, Y. (2019). Cyclic and postcyclic simple shear behavior of binary sand-gravel mixtures with various gravel contents. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 123, 230–241. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.04.030>
- Zhang, C., & Ali, A. (2021). The advancement of seismic isolation and energy dissipation mechanisms based on friction. In *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* (Vol. 146). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106746>

## 7 ANEXOS

### 7.1 Granulometría

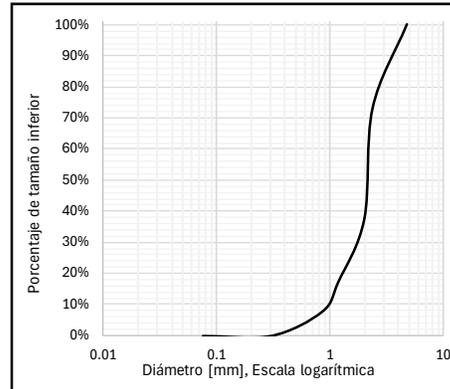


**Granulometría: Gravilla**

Tamiz	D, mm	P, g	P%	% Pasa
4	4.75	0	0.0%	100.0%
8 (ASTM)	2.36	270	27.0%	73.0%
10	2	354	35.4%	37.6%
16 (ASTM)	1.18	202	20.2%	17.4%
20	0.85	96	9.6%	7.8%
50 (ASTM)	0.3	78	7.8%	0.0%
200	0.075	0	0.0%	0.0%
base	0	0	0.0%	

d10	0.916
d30	1.640
d50	2.119
d60	2.221
Cu	2.424
Cc	1.321

**Wo: 1000 g**

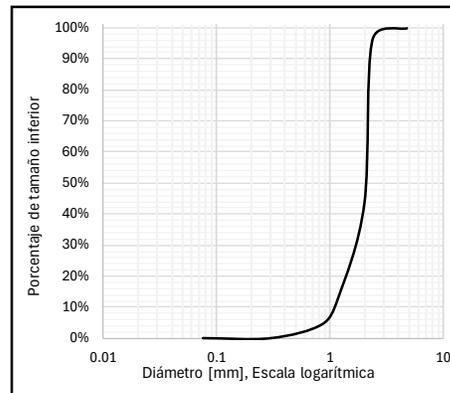


**Granulometría: M1 (80 - 20)**

Tamiz	D, mm	P, g	P%	% Pasa
4	4.75	0	0.0%	100.0%
8 (ASTM)	2.36	37	3.7%	96.3%
10	2	529	52.9%	43.4%
16 (ASTM)	1.18	302	30.2%	13.2%
20	0.85	87	8.7%	4.5%
50 (ASTM)	0.3	45	4.5%	0.0%
200	0.075	0	0.0%	0.0%
base	0	0	0.0%	

d10	1.046
d30	1.583
d50	2.042
d60	2.107
Cu	2.014
Cc	1.137

**Wo: 1000 g**

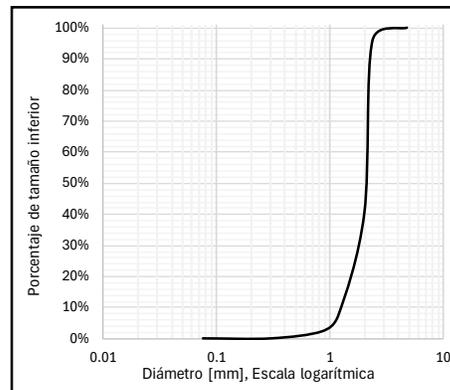


**Granulometría: M2 (75 - 25)**

Tamiz	D, mm	P, g	P%	% Pasa
4	4.75	0	0.0%	100.0%
8 (ASTM)	2.36	41	4.1%	95.9%
10	2	555	55.5%	40.4%
16 (ASTM)	1.18	329	32.9%	7.5%
20	0.85	52	5.2%	2.3%
50 (ASTM)	0.3	23	2.3%	0.0%
200	0.075	0	0.0%	0.0%
base	0	0	0.0%	

d10	1.228
d30	1.693
d50	2.058
d60	2.120
Cu	1.726
Cc	1.100

**Wo: 1000 g**

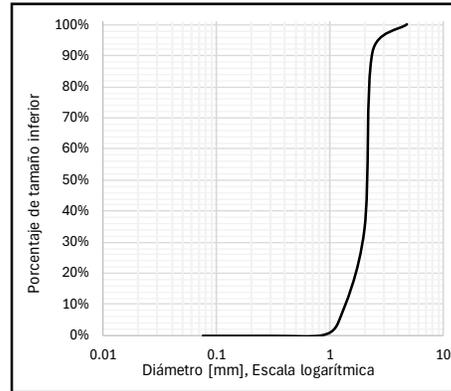


**Granulometría: M3 (70 - 30)**

Tamiz	D, mm	P, g	P%	% Pasa
4	4.75	0	0.0%	100.0%
8 (ASTM)	2.36	89	8.9%	91.1%
10	2	571	57.1%	34.0%
16 (ASTM)	1.18	296	29.6%	4.4%
20	0.85	42	4.2%	0.2%
50 (ASTM)	0.3	2	0.2%	0.0%
200	0.075	0	0.0%	0.0%
base	0	0	0.0%	

d10	1.304
d30	1.862
d50	2.095
d60	2.157
Cu	1.654
Cc	1.233

**Wo: 1000 g**

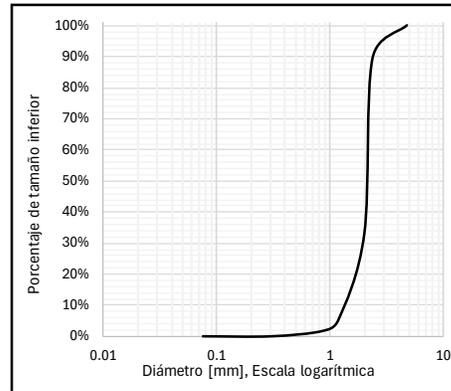


**Granulometría: M4 (50 - 45 - 5)**

Tamiz	D, mm	P, g	P%	% Pasa
4	4.75	0	0.0%	100.0%
8 (ASTM)	2.36	106	10.6%	89.4%
10	2	563	56.3%	33.1%
16 (ASTM)	1.18	278	27.8%	5.3%
20	0.85	36	3.6%	1.7%
50 (ASTM)	0.3	17	1.7%	0.0%
200	0.075	0	0.0%	0.0%
base	0	0	0.0%	

d10	1.290
d30	1.886
d50	2.102
d60	2.165
Cu	1.678
Cc	1.273

**Wo: 1000 g**

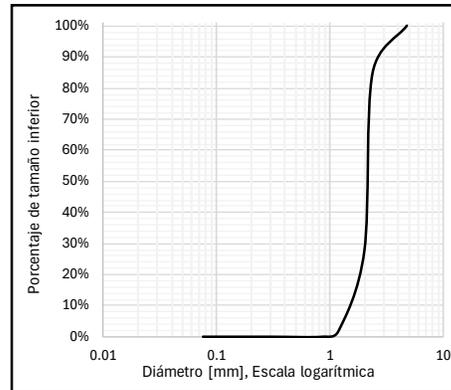


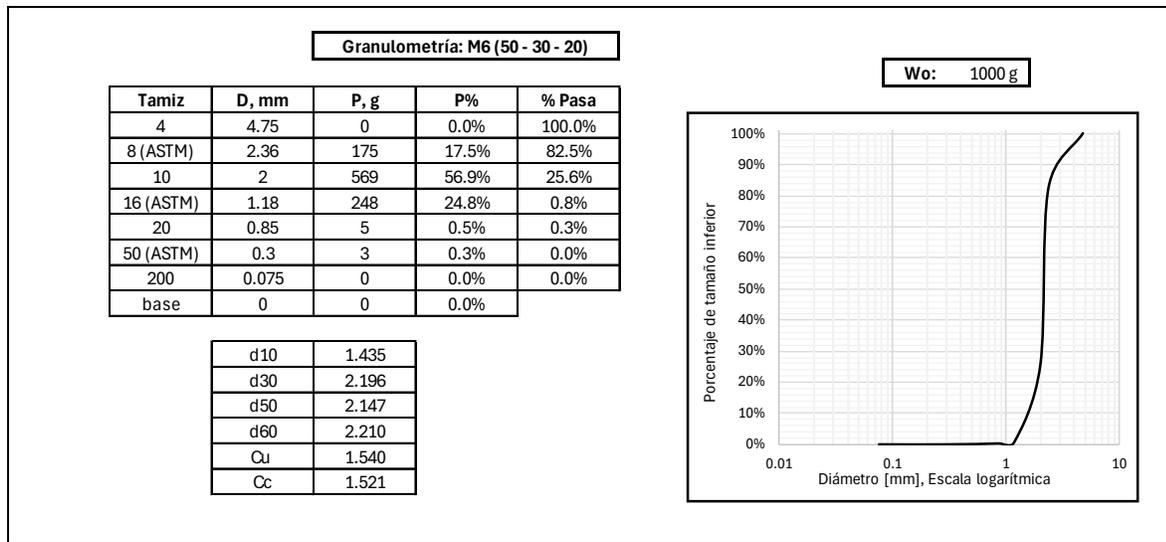
**Granulometría: M5 (50 - 40 - 10)**

Tamiz	D, mm	P, g	P%	% Pasa
4	4.75	0	0.0%	100.0%
8 (ASTM)	2.36	153	15.3%	84.7%
10	2	571	57.1%	27.6%
16 (ASTM)	1.18	258	25.8%	1.8%
20	0.85	18	1.8%	0.0%
50 (ASTM)	0.3	0	0.0%	0.0%
200	0.075	0	0.0%	0.0%
base	0	0	0.0%	

d10	1.395
d30	2.014
d50	2.134
d60	2.197
Cu	1.574
Cc	1.323

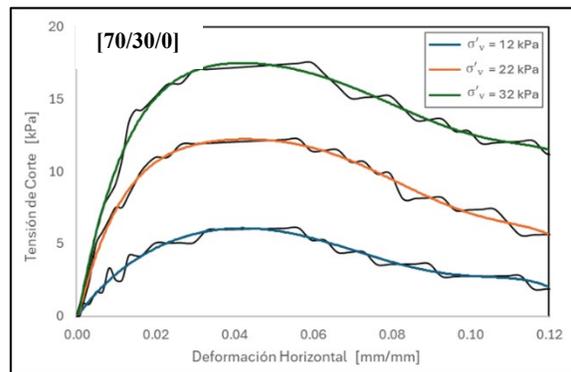
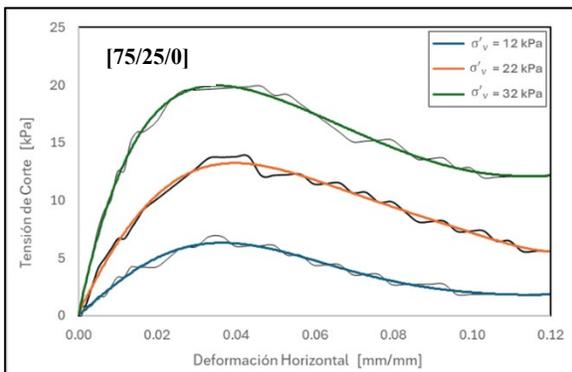
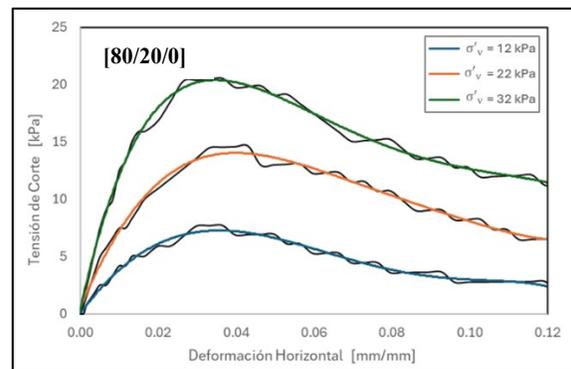
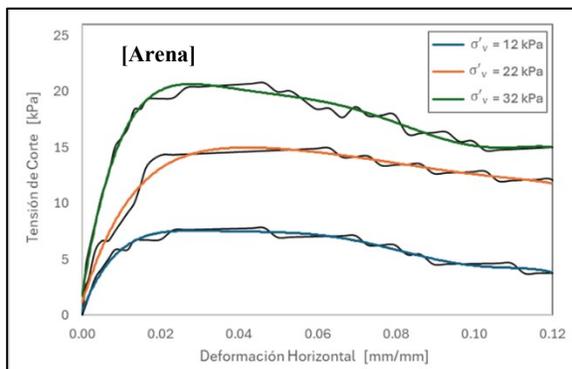
**Wo: 1000 g**

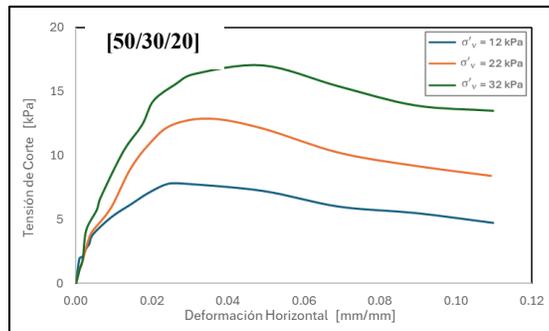
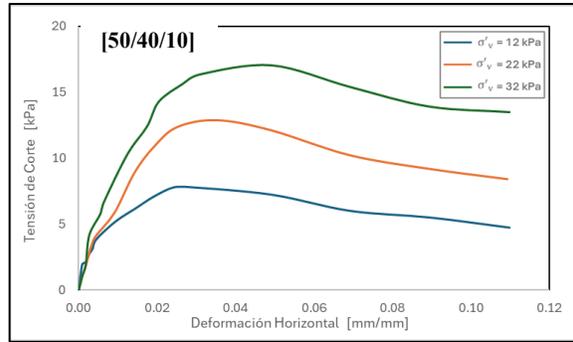
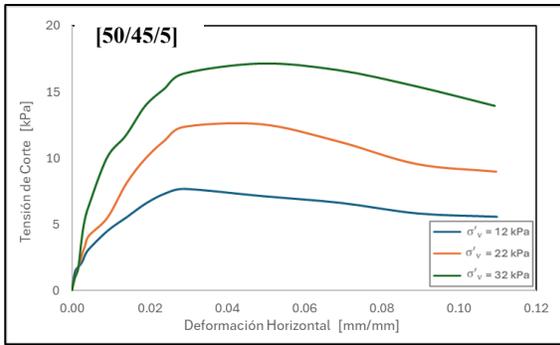




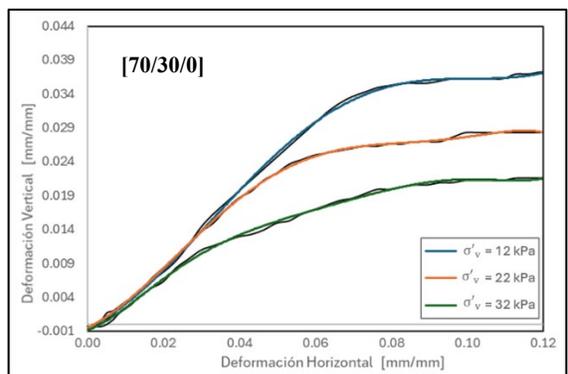
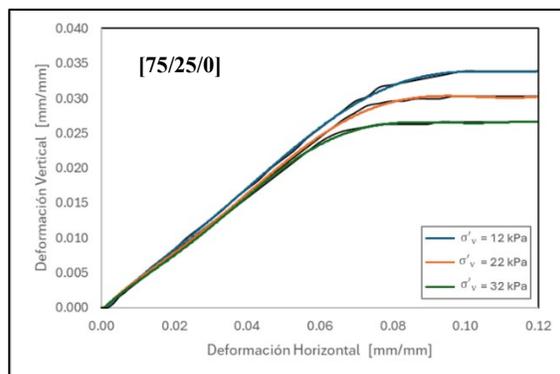
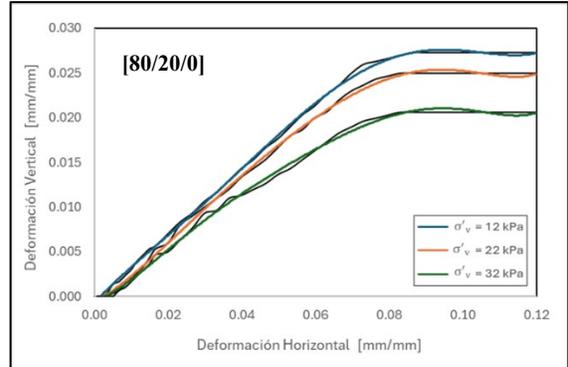
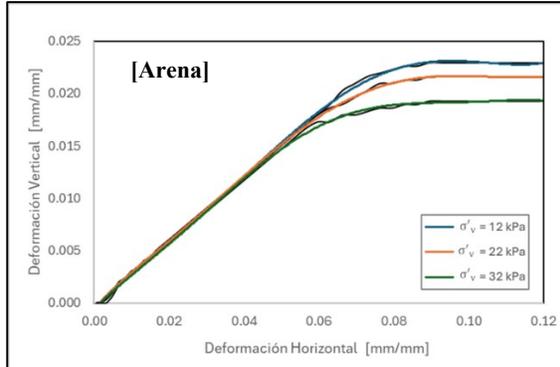
## 7.2 Corte Directo

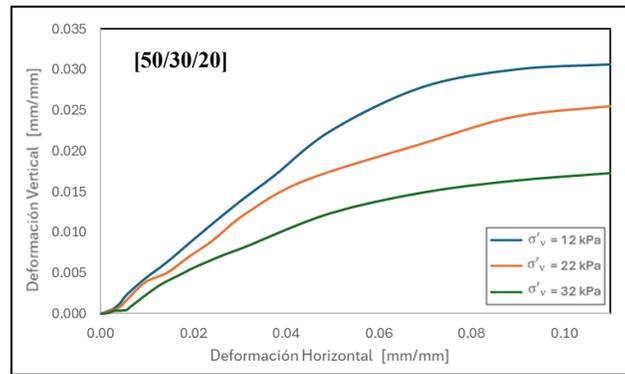
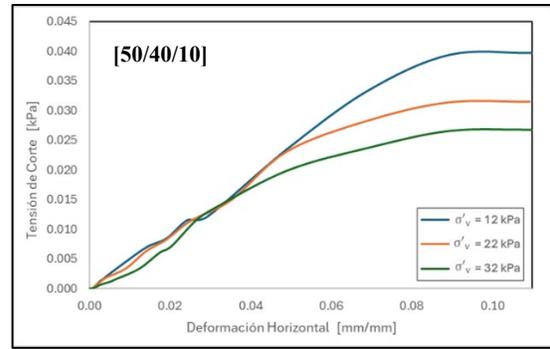
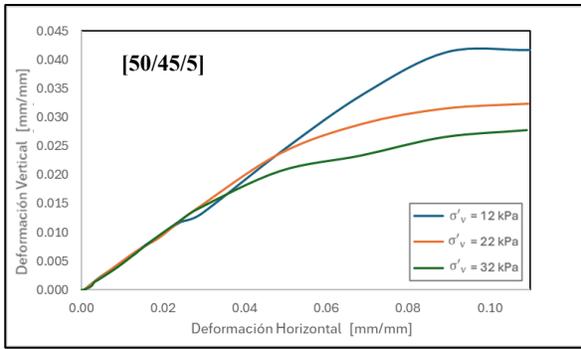
### 7.2.1 Tensión de Corte v/s Deformación Horizontal



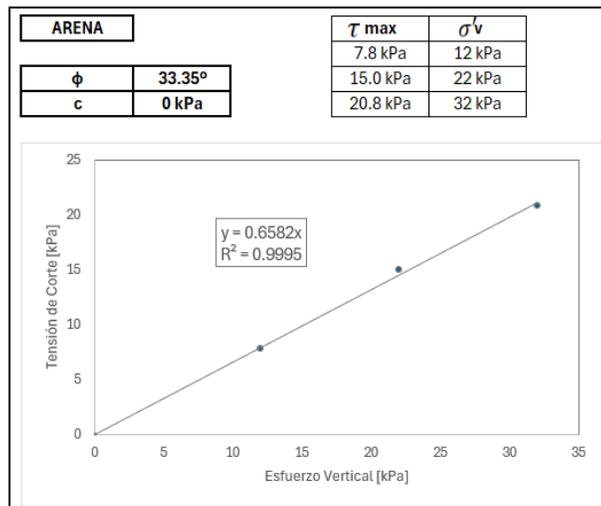


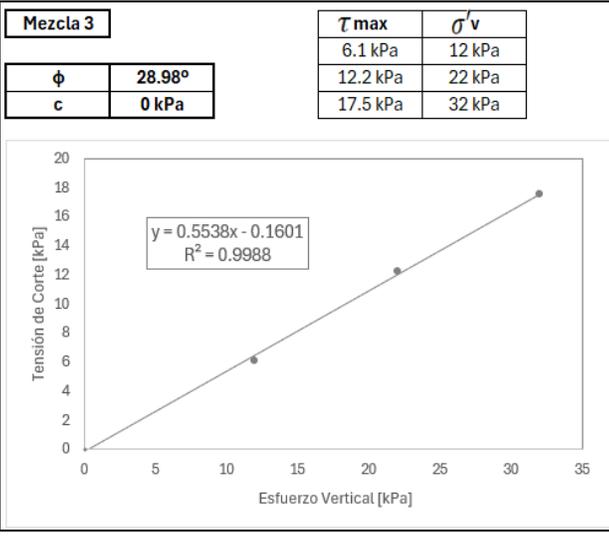
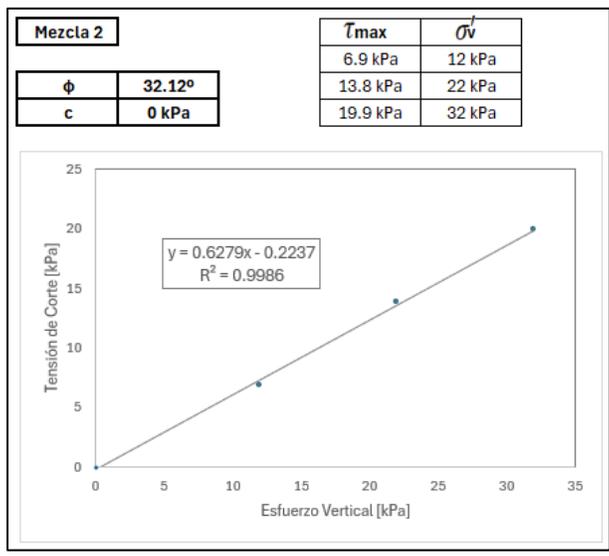
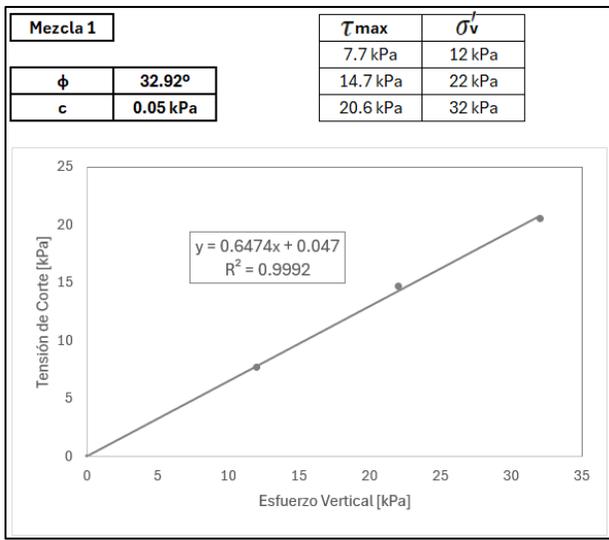
## 7.2.2 Deformación Vertical v/s Deformación Horizontal

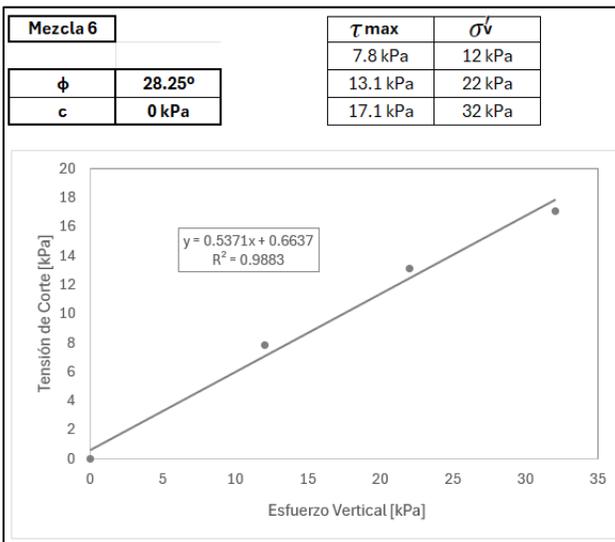
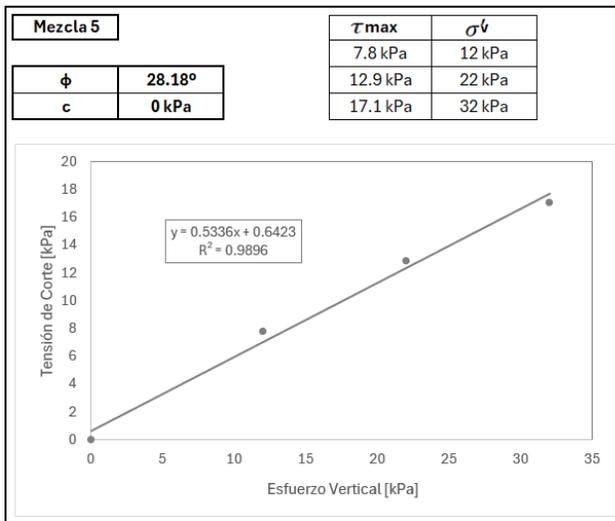
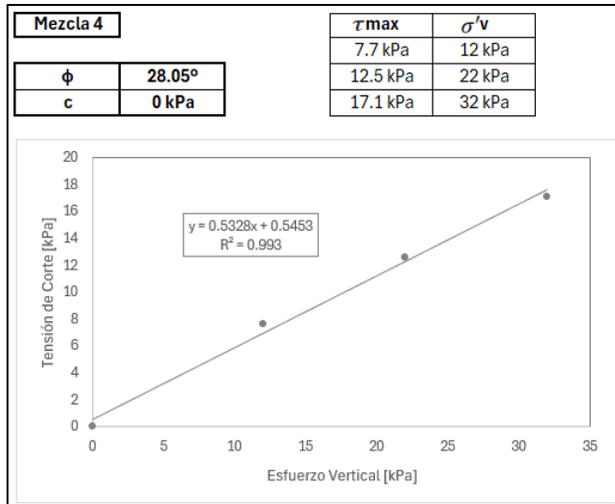




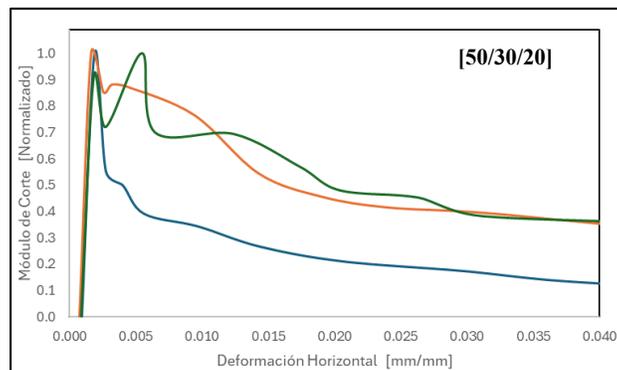
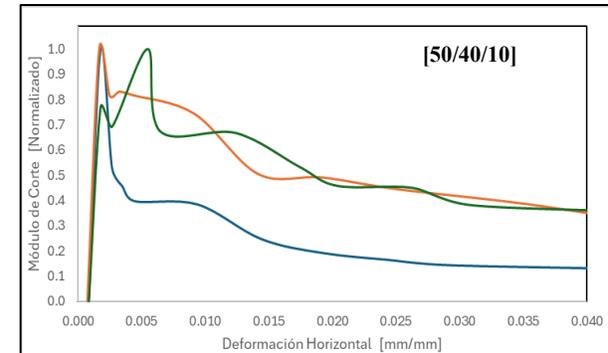
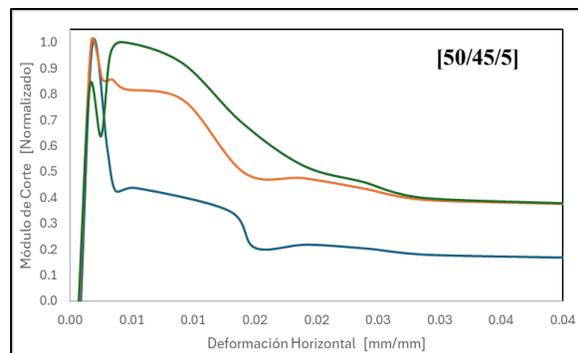
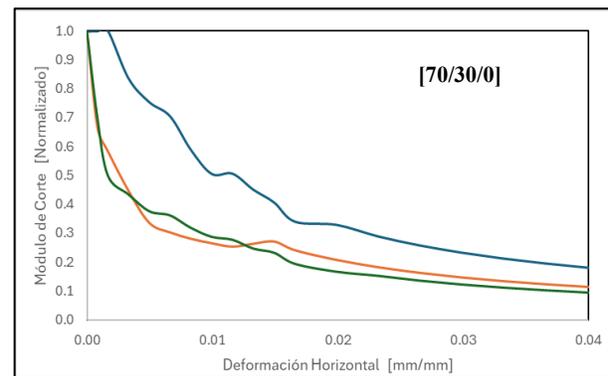
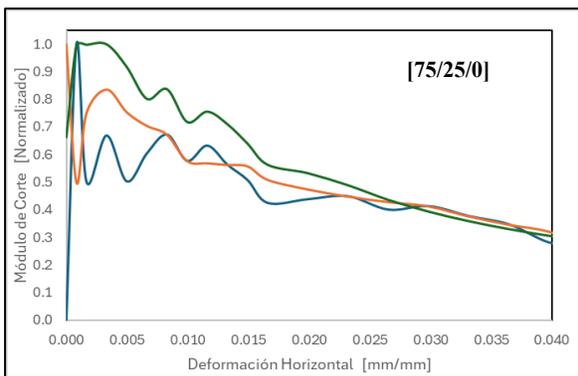
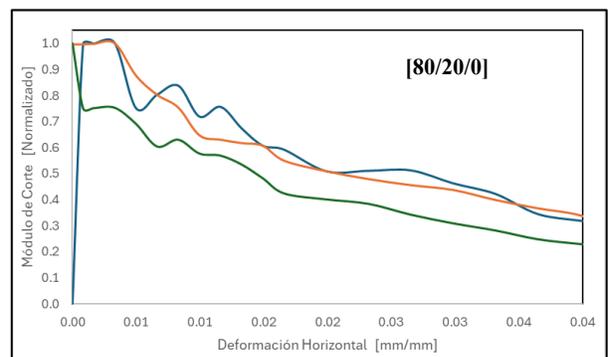
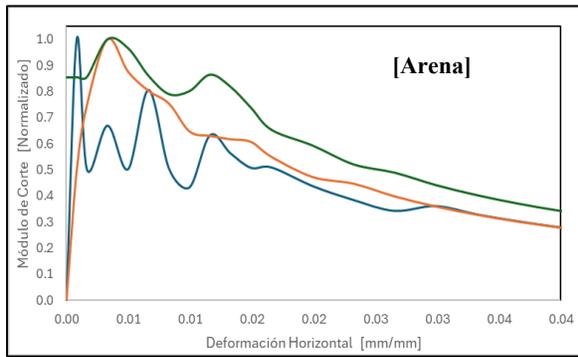
### 7.2.3 Ángulo de Fricción Interna







## 7.2.4 Degradación del Módulo de Corte



### 7.3 Script de Modelación Numérica

```
%pip install openseespy
%pip install opsvis

# LIBRERIAS
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from mpl_toolkits.mplot3d.art3d import Poly3DCollection
from itertools import product
import openseespy.opensees as ops
import opsvis as opsv
import warnings

warnings.filterwarnings("ignore")
%matplotlib inline

# UNIDADES DE MEDIDA
m = 1
kg = 1
s = 1

# Otras Unidades
cm = 0.01*m
kgf = 9.80665*kg*m/s**2
tonf = 1000*kgf
N = 1*kg*m/s**2
kPa = 1000*N/m**2
MPa = 1000*kPa

g = 9.81*m/s**2

# GEOMETRÍA DEL SÓLIDO
B = 1 * m
Lx, Ly, Lz = 12 * B, 12 * B, 8 * B # Dimensiones del sólido
Nx, Ny, Nz = 1 * Lx, 1 * Ly, 1 * Lz # Número de divisiones

# Borde entre fundación y suelo GSI
x_f_min, x_f_max = 5 * B, 7 * B
y_f_min, y_f_max = 5 * B, 7 * B
z_f_min, z_f_max = 7 * B, 8 * B
```

```

# Borde entre suelo GSI y suelo natural
x_s_min, x_s_max = 3 * B, 9 * B
y_s_min, y_s_max = 3 * B, 9 * B
z_s_min, z_s_max = 5 * B, 8 * B

dx, dy, dz = Lx / Nx, Ly / Ny, Lz / Nz # Tamaño de cada celda
# DEFINICIÓN DE MATERIALES
ops.wipe()
ops.model('BasicBuilder', '-ndm', 3, '-ndf', 3)

# MATERIAL DE FUNDACIÓN (Hormigón = 1)
fund = 1 # Material Tag
f_c = 30 #MPa # Resistencia a compresión
E_fund = 4730*np.sqrt(f_c) * MPa # Módulo de elasticidad
nu_fund = 0.3 # Coeficiente de Poisson
rho_fund = 2500 * kg/m**3 # Densidad
bf1 = 0.0 # Body Force X
bf2 = 0.0 # Body Force Y
bf3 = -g # Body Force Z

ops.nDMaterial('ElasticIsotropic', fund, E_fund, nu_fund, rho_fund)

# MATERIAL DE SUELO GSI
suelo_gsi = 2 # Material
Tag
ndm_gsi = 3 # Número de
dimensiones
friction_gsi = 28 # Ángulo de
fricción
peakShearStra_gsi = 0.04 # Peak shear
strain
refPress_gsi = 80 * kPa # Reference
pressure
pressDependCoe_gsi = 0.5 # Pressure
dependece coefficient
phaseTransform_gsi = 27 # Ángulo de
transformación de fase
cohesi_gsi = 0.0 * kgf/cm**2 # Apparent
cohesion at zero effective confinement
phaseTransform_gsi = 16.0 # Phase
transformation angle
contract_gsi = 0.11 # Contractive
behavior
dilat1_gsi = 0.35 # Contractive
behavior

```

```

dilat2_gsi = 1.7 # Contractive
behavior
dilat_gsi = [dilat1_gsi, dilat2_gsi] # Dilatancy
parameters
liq1_gsi = 5 * kPa # Parameter
for liquefaction
liq2_gsi = 0.005 # Parameter
for liquefaction
liq3_gsi = 1 # Parameter
for liquefaction
liquefac_gsi = [liq1_gsi, liq2_gsi, liq3_gsi] # Parameter
for liquefaction
noYield_gsi = 4 # N° of yield
surfaces
Yield_gsi = [0.1, 1.841, 0.1, 1.841, 0.1, 1.841, 0.1, 1.841] # Yield
surface
e0_gsi = 0.6 # Initial
void ratio
G1_gsi = 6.0e4 * kPa # Shear
modulus
v_gsi = 0.4 # Poisson's
ratio
B1_gsi = 1.9e5 * kPa # Bulk
modulus
gamma_gsi = 0.600 # Newmark
integration parameter
dT_gsi = 0.01 # Time step
numSteps_gsi = 2500 # Number of
steps
rhoS_gsi = 1500 * kg/m**3 # Saturated
mass density
perm_gsi = 1.e-5 * m/s #
Permeability (m/s)
perm_gsi = perm_gsi / g # Actual
value used in computation
accMul_gsi = 2 #
Acceleration multiplier
inclination_gsi = 0.0 # Inclination
of the ground surface
massProportionalDamping_gsi = 0.0 # Mass
proportional damping
InitStiffnessProportionalDamping_gsi = 0.003 # Initial
stiffness proportional damping
Cs1_gsi = 0
Cs2_gsi = 0

```

```

Cs3_gsi = 0
Pa_gsi = 101 * kPa
params_gsi = [Cs1_gsi, Cs2_gsi, Cs3_gsi, Pa_gsi]
c_gsi = 0.3 * kPa
gravityX_gsi = 0.0 # Body Force X
gravityY_gsi = 0.0 # Body Force Y
gravityZ_gsi = -g # Body Force Z

ops.ndMaterial('PressureDependMultiYield', suelo_gsi, ndm_gsi, rhoS_gsi, G1_gsi,
B1_gsi, friction_gsi, peakShearStra_gsi, refPress_gsi,
pressDependCoe_gsi, phaseTransform_gsi, contract_gsi, *dilat_gsi,
*liquefac_gsi, noYield_gsi, *Yield_gsi, e0_gsi, *params_gsi, c_gsi)

# MATERIAL DE SUELO NATURAL
suelo_nat = 3 # Material Tag
ndm_nat = 3 # Número de dimensiones
friction_nat = 38.0 # friction angle
peakShearStra_nat = 0.1 # peak shear strain
refPress_nat = 80 * kPa # reference pressure
pressDependCoe_nat = 0.5 # pressure dependece
coefficient
cohesi_nat = 0.0 * kPa # Apparent cohesion at zero
effective confinement
phaseTransform_nat = 27.0 # phase transformation angle
contract_nat = 0.037 # contractive behavior
dilat1_nat = 0.75 # contractive behavior
dilat2_nat = 4.5 # contractive behavior
dilat_nat = [dilat1_nat, dilat2_nat] # dilatancy parameters
liq1_nat = 0.1 * kPa
liq2_nat = 0.0
liq3_nat = 0.0
liquefac_nat = [liq1_nat, liq2_nat, liq3_nat]
noYield_nat = 4 # no yield surface
Yield_nat = [0.1, 2.74, 0.1, 2.74, 0.1, 2.74, 0.1, 2.74] # yield surface
e0_nat = 0.5 # initial void ratio
G1_nat = 1e5 * kPa # shear modulus
B1_nat = 3.7e5 * kPa #2.0e5 * kPa # bulk modulus
gamma_nat = 0.600 # Newmark integration
parameter
dT_nat = 0.01 # time step
numSteps_nat = 2500 # number of steps
rhoS_nat = 1800 * kg/m**3 # saturated mass density
perm_nat = 1.e-5 * m/s # permeability (m/s)
accGravity = 9.81 # gravity acceleration

```

```

perm_nat = perm_nat / accGravity # actual value used in
computation
inclination_nat = 0.0 # inclination of the ground
surface
massProportionalDamping_nat = 0.0 # mass proportional damping
InitStiffnessProportionalDamping_nat = 0.003 # initial stiffness
proportional damping
Cs1_nat = 0
Cs2_nat = 0
Cs3_nat = 0
Pa_nat = 101 * kPa
params_nat = [Cs1_nat, Cs2_nat, Cs3_nat, Pa_nat]
c_nat = 0.3 * kPa
gravityX_nat = 0.0 # Body Force X
gravityY_nat = 0.0 # Body Force Y
gravityZ_nat = -g # Body Force Z

ops.ndMaterial('PressureDependMultiYield', suelo_nat, ndm_nat, rhoS_nat, G1_nat,
B1_nat, friction_nat, peakShearStra_nat, refPress_nat,
pressDependCoe_nat, phaseTransform_nat, contract_nat, *dilat_nat,
*liquefac_nat, noYield_nat, *Yield_nat, e0_nat, *params_nat, c_nat)

# DEFINICIÓN DE NODOS

nodos = {} # Diccionario de nodos
nodo_id = 1 # Iniciar ID de nodo

def add_node(x, y, z, ndf=3): # Función para añadir nodos
    global nodo_id
    key = (round(x, 6), round(y, 6), round(z, 6))
    if key not in nodos:
        nodos[key] = nodo_id
        ops.node(nodo_id, x, y, z)
        nodo_id += 1
    return nodos[key]

for k in range(Nz): # Crear nodos
    for j in range(Ny):
        for i in range(Nx):
            # Nodos de las esquinas
            n1 = add_node(i * dx, j * dy, k * dz, 3)
            n2 = add_node((i + 1) * dx, j * dy, k * dz, 3)
            n3 = add_node((i + 1) * dx, (j + 1) * dy, k * dz, 3)
            n4 = add_node(i * dx, (j + 1) * dy, k * dz, 3)
            n5 = add_node(i * dx, j * dy, (k + 1) * dz, 3)

```

```

n6 = add_node((i + 1) * dx, j * dy, (k + 1) * dz, 3)
n7 = add_node((i + 1) * dx, (j + 1) * dy, (k + 1) * dz, 3)
n8 = add_node(i * dx, (j + 1) * dy, (k + 1) * dz, 3)
# Nodos en el centro de las aristas
n9 = add_node((i + 0.5) * dx, j * dy, k * dz, 3)
n10 = add_node((i + 1) * dx, (j + 0.5) * dy, k * dz, 3)
n11 = add_node((i + 0.5) * dx, (j + 1) * dy, k * dz, 3)
n12 = add_node(i * dx, (j + 0.5) * dy, k * dz, 3)
n13 = add_node((i + 0.5) * dx, j * dy, (k + 1) * dz, 3)
n14 = add_node((i + 1) * dx, (j + 0.5) * dy, (k + 1) * dz, 3)
n15 = add_node((i + 0.5) * dx, (j + 1) * dy, (k + 1) * dz, 3)
n16 = add_node(i * dx, (j + 0.5) * dy, (k + 1) * dz, 3)
# Nodos intermedios en caras
n17 = add_node(i * dx, j * dy, (k + 0.5) * dz, 3)
n18 = add_node((i + 1) * dx, j * dy, (k + 0.5) * dz, 3)
n19 = add_node((i + 1) * dx, (j + 1) * dy, (k + 0.5) * dz, 3)
n20 = add_node(i * dx, (j + 1) * dy, (k + 0.5) * dz, 3)

# VERIFICACIÓN
print(len(nodos), "nodos originales")

# NODOS FUNDACIÓN
# Se duplican todos los nodos de la fundación. Se eliminan los nodos originales
que están DENTRO de la fundación

def determinar_region(x, y, z):      # Función para determinar la región de un
nodo o elemento
    # Fundación
    if (x_f_min <= x <= x_f_max) and (y_f_min <= y <= y_f_max) and (z_f_min <= z
<= z_f_max):
        return 'Fundación'
    # Suelo GSI (excluyendo la región de la fundación)
    elif (x_s_min < x < x_s_max) and (y_s_min < y < y_s_max) and (z_s_min < z <
z_s_max) and not (
        (x_f_min < x < x_f_max) and (y_f_min < y < y_f_max) and (z_f_min < z <
z_f_max)):
        return 'Suelo GSI'
    # Suelo Natural (todo lo que no es fundación ni suelo GSI)
    else:
        return 'Suelo Natural'

nodos_duplicados_id = []              # Lista para almacenar el tag
de los nodos duplicados
mapa_nodos_duplicados = {}          # Diccionario para mapear
nodos originales a duplicados

```

```

nodos_duplicados = {} # Diccionario para almacenar
los nodos duplicados
nodo_duplicado_id = max(ops.getNodeTags()) + 1 # Comenzar con un tag mayor
al máximo tag existente

def add_duplicate_node(x, y, z, ndf=3): # Función para añadir nodos
    global nodo_duplicado_id
    key = (round(x, 6), round(y, 6), round(z, 6))
    if key not in nodos_duplicados:
        nodos_duplicados[key] = nodo_duplicado_id
        ops.node(nodo_duplicado_id, x, y, z)
        nodo_duplicado_id += 1
    return nodos_duplicados[key]

for nodo_tag in ops.getNodeTags():
    x, y, z = ops.nodeCoord(nodo_tag) # Obtener las coordenadas del
nodo
    region = determinar_region(x, y, z) # Determinar la región del
nodo

    if region == 'Fundación':
        if nodo_tag not in mapa_nodos_duplicados:
            add_duplicate_node(x, y, z, 3)
            mapa_nodos_duplicados[nodo_tag] = nodos_duplicados[(round(x, 6),
round(y, 6), round(z, 6))]
            print("ops.node(",nodo_duplicado_id,",",x,",",y,",",z,")")

ops.remove('node', 5348)
key = (6.0, 6.0, 8.0)
del nodos[key]
print('Nodo eliminado:', 5348, key)

ops.remove('node', 5349)
key = (6.0, 5.5, 8.0)
del nodos[key]
print('Nodo eliminado:', 5349, key)

ops.remove('node', 5350)
key = (5.5, 6.0, 8.0)
del nodos[key]
print('Nodo eliminado:', 5350, key)

ops.remove('node', 5351)
key = (6.0, 6.0, 7.5)
del nodos[key]

```

```

print('Nodo eliminado:', 5351, key)

ops.remove('node', 5354)
key = (6.5, 6.0, 8.0)
del nodos[key]
print('Nodo eliminado:', 5354, key)

ops.remove('node', 5400)
key = (6.0, 6.5, 8.0)
del nodos[key]
print('Nodo eliminado:', 5400, key)

# VERIFICACIÓN
print(len(nodos), "nodos originales restantes")
print(len(nodos_duplicados), "nodos duplicados")
print("NODOS ORIGINALES =", nodos)
print("NODOS DUPLICADOS =" ,nodos_duplicados)
print("ORIGINAL : DUPLICADO", mapa_nodos_duplicados)

# DEFINICIÓN DE ELEMENTOS
elementos_fundacion = []
elementos_gsi = []
elementos_nat = []
contador_elemento = 1

for k in range(Nz):
    for j in range(Ny):
        for i in range(Nx):
            # Nodos de las esquinas
            n1 = (round(i * dx, 6), round(j * dy, 6), round(k * dz, 6))
            n2 = (round((i + 1) * dx, 6), round(j * dy, 6), round(k * dz, 6))
            n3 = (round((i + 1) * dx, 6), round((j + 1) * dy, 6), round(k * dz,
6))

            n4 = (round(i * dx, 6), round((j + 1) * dy, 6), round(k * dz, 6))
            n5 = (round(i * dx, 6), round(j * dy, 6), round((k + 1) * dz, 6))
            n6 = (round((i + 1) * dx, 6), round(j * dy, 6), round((k + 1) * dz,
6))

            n7 = (round((i + 1) * dx, 6), round((j + 1) * dy, 6), round((k + 1) *
dz, 6))

            n8 = (round(i * dx, 6), round((j + 1) * dy, 6), round((k + 1) * dz,
6))

            # Nodos en el centro de las aristas
            n9 = (round((i + 0.5) * dx, 6), round(j * dy, 6), round(k * dz, 6))

```

```

n10 = (round((i + 1) * dx, 6), round((j + 0.5) * dy, 6), round(k *
dz, 6))
n11 = (round((i + 0.5) * dx, 6), round((j + 1) * dy, 6), round(k *
dz, 6))
n12 = (round(i * dx, 6), round((j + 0.5) * dy, 6), round(k * dz, 6))
n13 = (round((i + 0.5) * dx, 6), round(j * dy, 6), round((k + 1) *
dz, 6))
n14 = (round((i + 1) * dx, 6), round((j + 0.5) * dy, 6), round((k +
1) * dz, 6))
n15 = (round((i + 0.5) * dx, 6), round((j + 1) * dy, 6), round((k +
1) * dz, 6))
n16 = (round(i * dx, 6), round((j + 0.5) * dy, 6), round((k + 1) *
dz, 6))

# Nodos intermedios en caras
n17 = (round(i * dx, 6), round(j * dy, 6), round((k + 0.5) * dz, 6))
n18 = (round((i + 1) * dx, 6), round(j * dy, 6), round((k + 0.5) *
dz, 6))
n19 = (round((i + 1) * dx, 6), round((j + 1) * dy, 6), round((k +
0.5) * dz, 6))
n20 = (round(i * dx, 6), round((j + 1) * dy, 6), round((k + 0.5) *
dz, 6))

# Lista de coordenadas de los nodos del elemento
coordenadas_nodos = [n1, n2, n3, n4, n5, n6, n7, n8,
                    n9, n10, n11, n12, n13, n14, n15, n16,
                    n17, n18, n19, n20]

# Determinar la región del elemento usando su centroide
x_centroide = (i + 0.5) * dx
y_centroide = (j + 0.5) * dy
z_centroide = (k + 0.5) * dz
region_elemento = determinar_region(x_centroide, y_centroide,
z_centroide)

# Crear elementos
if region_elemento == 'Fundación':
    # Usar nodos duplicados para la fundación
    nodos_elemento = [nodos_duplicados[coord] for coord in
coordenadas_nodos]
    ops.element('20NodeBrick', contador_elemento, *nodos_elemento,
fund, bf1, bf2, bf3, rho_fund)
    elementos_fundacion.append(contador_elemento)

elif region_elemento == 'Suelo GSI':

```

```

        # Usar nodos originales para el suelo GSI
        nodos_elemento = [nodos[coord] for coord in coordenadas_nodos]
        ops.element('20NodeBrick', contador_elemento, *nodos_elemento,
suelo_gsi, gravityX_gsi, gravityY_gsi, gravityZ_gsi, rhoS_gsi)
        elementos_gsi.append(contador_elemento)

    elif region_elemento == 'Suelo Natural':
        # Usar nodos originales para el suelo natural
        nodos_elemento = [nodos[coord] for coord in coordenadas_nodos]
        ops.element('20NodeBrick', contador_elemento, *nodos_elemento,
suelo_nat, gravityX_nat, gravityY_nat, gravityZ_nat, rhoS_nat)
        elementos_nat.append(contador_elemento)

    contador_elemento += 1

# VERIFICACIÓN
print(f"Elementos en la fundación: {len(elementos_fundacion)}")
print(f"Elementos en el suelo GSI: {len(elementos_gsi)}")
print(f"Elementos en el suelo natural: {len(elementos_nat)}")
print("Elementos creados en OpenSees:", max(ops.getEleTags()))
nodos_fundacion = set()
for ele_tag in elementos_fundacion:
    nodos_fundacion.update(ops.eleNodes(ele_tag))
nodos_suelo_gsi = set()
for ele_tag in elementos_gsi:
    nodos_suelo_gsi.update(ops.eleNodes(ele_tag))
nodos_compartidos = nodos_fundacion.intersection(nodos_suelo_gsi)
if nodos_compartidos:
    print("Advertencia: Hay nodos compartidos entre la fundación y el suelo
GSI.")
    print("Nodos compartidos:", nodos_compartidos)
else:
    print("Verificación exitosa: No hay nodos compartidos entre la fundación y el
suelo GSI.")

# CONDICIONES DE BORDE Frontera Fundación - Suelo GSI

# Identificar los nodos superiores de la fundación
nodos_superiores = []
for coord, tag in nodos_duplicados.items():
    x, y, z = coord
    if z == z_f_max: # Verificar si el nodo está en el plano superior de la
fundación
        nodos_superiores.append(tag)

```

```

# EqualDOF a una esquina superior de la fundación
rNodeTag = nodos_superiores[0] # Nodo principal (puedes cambiarlo si lo deseas)
cNodeTags = nodos_superiores[1:] # Nodos secundarios
for node in cNodeTags:
    ops.equalDOF(rNodeTag, node, 1, 2, 3)
print(rNodeTag, ops.nodeCoord(rNodeTag))

# Coordenadas del nodo duplicado
coordenadas_nodo_duplicado = ops.nodeCoord(rNodeTag) # Obtener las coordenadas
del nodo duplicado

# Buscar el nodo original correspondiente
tag_original = None
for original, duplicado in mapa_nodos_duplicados.items():
    if duplicado == rNodeTag:
        tag_original = original
        break

if tag_original is not None:
    print(f"El nodo duplicado con tag {rNodeTag} y coordenadas
{coordenadas_nodo_duplicado} "
        f"corresponde al nodo original con tag {tag_original}.")
else:
    print(f"No se encontró un nodo original correspondiente al nodo duplicado con
tag {rNodeTag}.")

ops.equalDOF(tag_original, rNodeTag, 1, 2, 3) # Restringir los grados de
libertad del nodo original

ops.equalDOF( 4643 , 5682, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4647 , 5683, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4649 , 5684, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4651 , 5685, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4653 , 5686, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4694 , 5687, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4695 , 5688, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4698 , 5689, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4699 , 5690, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4700 , 5691, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4702 , 5692, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4703 , 5693, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4704 , 5694, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4745 , 5695, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4746 , 5696, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4749 , 5697, 1, 2, 3)

```

```

ops.equalDOF( 4750 , 5698, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4751 , 5699, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4753 , 5700, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4754 , 5701, 1, 2, 3)
ops.equalDOF( 4755 , 5702, 1, 2, 3)

# Los nodos del suelo GSI se conectan a la fundación mediante ZeroLengthElements
y simulan la interacción entre la fundación y el suelo GSI

A_sup = dx * dz           # Área Superficial
e_f = B                   # Altura de la
zapata
mu = np.tan(friction_gsi * 2 / 3) # Coeficiente de roce
e_y = 1.0e-7              # Deformación de fluencia
F_n = rhoS_gsi * e_f * A_sup*mu/ 8 # Fuerza Normal
E_n = F_n / e_y           # Tangente Normal
F_l = cohesi_gsi * A_sup * e_y / 10 / 8 # Fuerza de fricción
E_l = F_l / e_y           # Tangente de fricción
Ft= F_n+F_l              # Fuerza Total
E_t= Ft/e_y              # Tangente Total
KL_gsi = 4                # matTag Rigidez Longitudinal
KT_gsi = 5                # matTag Rigidez Transversal

print("KL_gsi =", KL_gsi)
print("KT_gsi =", KT_gsi)

ops.uniaxialMaterial('ElasticPP', KL_gsi, E_n, e_y, -e_y, 0)
ops.uniaxialMaterial('ElasticPP', KT_gsi, E_t, e_y, -e_y, 0)
contador_Zlgth = max(ops.getEleTags()) + 1

# [5.0, 5.0, 7.5]
ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, 5296, 5704, '-mat', KT_gsi, KT_gsi, '-
dir', 1, 2)
ops.equalDOF(5296, 5704, 3)
contador_Zlgth += 1

# [6.0, 5.0, 7.5]
ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, 5300, 5707, '-mat', KT_gsi, KL_gsi, '-
dir', 1, 2)
ops.equalDOF(5300, 5707, 3)
contador_Zlgth += 1

# [7.0, 5.0, 7.5]
ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, 5304, 5710, '-mat', KT_gsi, KT_gsi, '-
dir', 1, 2)

```

```

ops.equalDOF(5304, 5710, 3)
contador_Zlgth += 1

# [5.0, 7.0, 7.5]
ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, 5398, 5724, '-mat', KT_gsi, KT_gsi, '-
dir', 1, 2)
ops.equalDOF(5398, 5724, 3)
contador_Zlgth += 1

# [6.0, 7.0, 7.5]
ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, 5402, 5728, '-mat', KT_gsi, KL_gsi, '-
dir', 1, 2)
ops.equalDOF(5402, 5728, 3)
contador_Zlgth += 1

# [7.0, 7.0, 7.5]
ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, 5406, 5732, '-mat', KT_gsi, KT_gsi, '-
dir', 1, 2)
ops.equalDOF(5406, 5732, 3)
contador_Zlgth += 1

# [5.0, 6.0, 7.5]
ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, 5347, 5713, '-mat', KL_gsi, KT_gsi, '-
dir', 1, 2)
ops.equalDOF(5347, 5713, 3)
contador_Zlgth += 1

# [5.0, 5.0, 7.5]
ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, 5355, 5721, '-mat', KL_gsi, KT_gsi, '-
dir', 1, 2)
ops.equalDOF(5355, 5721, 3)
contador_Zlgth += 1

# VERIFICACIÓN
elementos_por_tipo = {}
for ele_tag in ops.getEleTags():
    ele_type = ops.eleType(ele_tag)
    if ele_type in elementos_por_tipo:
        elementos_por_tipo[ele_type] += 1
    else:
        elementos_por_tipo[ele_type] = 1
print("Cantidad de elementos por tipo:")
for ele_type, count in elementos_por_tipo.items():
    print(f"{ele_type}: {count}")
print("Elementos zeroLength creados:")

```

```

for ele_tag in ops.getEleTags():
    ele_type = ops.eleType(ele_tag)
    if ele_type == "ZeroLength":
        nodes = ops.eleNodes(ele_tag)
        print(f"Elemento {ele_tag}: Conecta nodos {nodes}")

# CONDICIONES DE BORDE Frontera Suelo Natural
# Aplicar Zero Length Elements a los nodos de la frontera del suelo natural

A_sup = dx * dz # Área Superficial
e_f = Lz # Altura del
bloque
mu = np.tan(friction_nat * 2 / 3) # Coeficiente de roce
e_y = 1.0e-7 # Deformación de fluencia
F_n = rhoS_nat * e_f * A_sup * mu / 8 # Fuerza Normal
E_n = F_n / e_y # Tangente Normal
F_l = cohesi_gsi * A_sup * e_y / 10 / 8 # Fuerza de fricción
E_l = F_l / e_y # Tangente de fricción
Ft = F_n + F_l # Fuerza Total
E_t= Ft / e_y # Tangente Total
E_nat = 2 * B1_nat # Módulo de elasticidad (GSI)
KL_nat = 6 # matTag Rigidez Longitudinal
KT_nat = 7 # matTag Rigidez Transversal

print("KL_nat =", KL_nat)
print("KT_nat =", KT_nat)

ops.uniaxialMaterial('ElasticPP', KL_nat, E_n, e_y, -e_y, 0)
ops.uniaxialMaterial('ElasticPP', KT_nat, E_t, e_y, -e_y, 0)
print("E_n=", E_n, "E_t=",E_t)
contador_Zlgth = max(ops.getEleTags()) + 1
new_node_id = 100000000

for node_id in ops.getNodeTags():
    x, y, z = ops.nodeCoord(node_id)

    # Costados Laterales sin considerar la base ni z_s_max
    if (x == 0 or x == Lx) and (0 < z < Lz):
        new_node_id = new_node_id + node_id
        ops.node(new_node_id, x, y, z)
        ops.fix(new_node_id, 1, 1, 1)
        ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, new_node_id, node_id, '-mat',
KT_nat, KL_nat, '-dir', 1, 2)
        ops.equalDOF(new_node_id, node_id, 3)
        contador_Zlgth += 1

```

```

    if (y == 0 or x == Ly) and (0 < z < Lz):
        new_node_id = new_node_id + node_id
        ops.node(new_node_id, x, y, z)
        ops.fix(new_node_id, 1, 1, 1)
        ops.element('zeroLength', contador_Zlgth, new_node_id, node_id, '-mat',
KL_nat, KT_nat, '-dir', 1, 2)
        ops.equalDOF(new_node_id, node_id, 3)
        contador_Zlgth += 1

# Base del bloque
if z == 0:
    ops.fix(node_id, 1, 1, 1)

if (z == Lz) and (x == 0 or x == Lx) and (y == 0 or y == Ly):
    ops.fix(node_id, 1, 1, 1)

opsv.plot_model(0,0, False)

w2 = ops.eigen('genBandArpack',2)
w = np.sqrt(w2)
T = 2 * np.pi / w
print(w2, w, T)

opsv.plot_mode_shape(1, unDefoFlag = 0,
                    fmt_defo_faces = {'alpha' : 0.5, 'edgecolors': 'k',
'linewidths' : 0.1}, az_el=(90.0,90.0), node_supports = False)
opsv.plot_mode_shape(1, unDefoFlag = 0,
                    fmt_defo_faces = {'alpha' : 0.5, 'edgecolors': 'k',
'linewidths' : 0.1}, az_el=(180.0,0.0), node_supports = False)

def obtener_tags_por_coordenada(x_deseado, y_deseado, z_deseado, tolerancia=1e-
9):
    tags_encontrados = []

    for nodo_tag in ops.getNodeTags():
        x, y, z = ops.nodeCoord(nodo_tag) # Obtener las coordenadas del nodo

        if (abs(x - x_deseado) <= tolerancia and
            abs(y - y_deseado) <= tolerancia and
            abs(z - z_deseado) <= tolerancia):
            tags_encontrados.append(nodo_tag)

    return tags_encontrados

```

```

def identificar_nodo_fundacion(tags_encontrados, mapa_nodos_duplicados):

    for tag in tags_encontrados:
        if tag in mapa_nodos_duplicados.keys():
            return tag
    return None

# Ejemplo de uso
x_deseado = 6 * B
y_deseado = 6 * B
z_deseado = 7 * B
tags = obtener_tags_por_coordenada(x_deseado, y_deseado, z_deseado)
print(tags)
nodo_base_fundacion = identificar_nodo_fundacion(tags, mapa_nodos_duplicados)

# Imprimir los resultados
print(f"Tags de los nodos en la coordenada ({x_deseado}, {y_deseado},
{z_deseado}): {tags}")
if nodo_base_fundacion:
    print(f"El nodo de la base de la fundación en esta coordenada es:
{nodo_base_fundacion}")
else:
    print("No se encontró un nodo de la fundación en esta coordenada.")

print(nodo_base_fundacion)

def obtener_tag_nodo(coordenadas, nodos):
    coordenadas_redondeadas = tuple(round(c, 6) for c in coordenadas) #
Redondear coordenadas a 6 decimales
    return nodos.get(coordenadas_redondeadas, None) # Obtener el tag del nodo

coordenadas_A = (6 * B, 6 * B, 2 * B)
coordenadas_C = (6 * B, 6 * B, 8 * B)
coordenadas_D = (4 * B, 4 * B, 7 * B)
coordenadas_E = (6 * B, 6 * B, 5 * B)
coordenadas_F = (6 * B, 6 * B, 6 * B)
coordenadas_G = (9 * B, 9 * B, 8 * B)

tag_A = obtener_tag_nodo(coordenadas_A, nodos)
tag_C = obtener_tag_nodo(coordenadas_C, nodos_duplicados)
tag_D = obtener_tag_nodo(coordenadas_D, nodos)
tag_E = obtener_tag_nodo(coordenadas_E, nodos)
tag_F = obtener_tag_nodo(coordenadas_F, nodos)
tag_G = obtener_tag_nodo(coordenadas_G, nodos)

```

```

print(f"Tag del nodo A: {tag_A}")
print(f"Tag del nodo C: {tag_C}")
print(f"Tag del nodo D: {tag_D}")
print(f"Tag del nodo E: {tag_E}")
print(f"Tag del nodo F: {tag_F}")
print(f"Tag del nodo G: {tag_G}")

ops.mass(tag_A, - 20 * kg)

def obtener_tag_por_primer_nodo(primer_nodo):

    # Buscar en los elementos de la fundación
    for ele_tag in elementos_fundacion:
        nodos_elemento = ops.eleNodes(ele_tag) # Obtener nodos del elemento
        coordenada_primer_nodo = ops.nodeCoord(nodos_elemento[0]) # Coordenada
del primer nodo
        if tuple(round(coord, 6) for coord in coordenada_primer_nodo) ==
primer_nodo:
            return ele_tag

    # Buscar en los elementos del suelo GSI
    for ele_tag in elementos_gsi:
        nodos_elemento = ops.eleNodes(ele_tag)
        coordenada_primer_nodo = ops.nodeCoord(nodos_elemento[0])
        if tuple(round(coord, 6) for coord in coordenada_primer_nodo) ==
primer_nodo:
            return ele_tag

    # Buscar en los elementos del suelo natural
    for ele_tag in elementos_nat:
        nodos_elemento = ops.eleNodes(ele_tag)
        coordenada_primer_nodo = ops.nodeCoord(nodos_elemento[0])
        if tuple(round(coord, 6) for coord in coordenada_primer_nodo) ==
primer_nodo:
            return ele_tag

    # Si no se encuentra, devolver None
    return None

# Ejemplo de uso
primer_nodoA = (6 * B, 6 * B, 2 * B)
primer_nodoB = (6 * B, 6 * B, 5 * B)
primer_nodoC = (9 * B, 9 * B, 6 * B)
primer_nodoD = (3 * B, 3 * B, 6 * B)

```

```

primer_nodoE = (6 * B, 6 * B, 6 * B)

tagEle_A = obtener_tag_por_primer_nodo(primer_nodoA)
tagEle_B = obtener_tag_por_primer_nodo(primer_nodoB)
tagEle_C = obtener_tag_por_primer_nodo(primer_nodoC)
tagEle_D = obtener_tag_por_primer_nodo(primer_nodoD)
tagEle_E = obtener_tag_por_primer_nodo(primer_nodoE)

print(f"El tag del elemento correspondiente al primer nodo {primer_nodoA} es:
{tagEle_A}")
print(f"El tag del elemento correspondiente al primer nodo {primer_nodoB} es:
{tagEle_B}")
print(f"El tag del elemento correspondiente al primer nodo {primer_nodoC} es:
{tagEle_C}")
print(f"El tag del elemento correspondiente al primer nodo {primer_nodoD} es:
{tagEle_D}")
print(f"El tag del elemento correspondiente al primer nodo {primer_nodoE} es:
{tagEle_E}")

chi = 0.02
w1 = 81.34990447
w2 = 109.18051723
A0 = 2 * chi * (w1 * w2) / (w1 + w2)
A1 = 2 * chi / (w1 + w2)
print("A0 =", A0)
print("A1 =", A1)

#GRAVITY ANALYSIS (ELASTIC BEHAVIOR)
# Define analysis
ops.numberer('Plain')
ops.system('ProfileSPD')
ops.test('NormDispIncr', 1.0e-4, 20, 1)
ops.algorithm('KrylovNewton')
ops.constraints('Penalty', 1.e16, 1.e18)
ops.rayleigh(A0, A1, 0.0, 0.0) # Rayleigh damping
nw = 1.5
nw2 = (nw + 0.5) ** 2 / 4
ops.integrator('Newmark', nw, nw2)
dT = 0.01

# Recorders de desplazamiento
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Ag.txt', '-time', '-node', tag_A, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Bg.txt', '-time', '-node',
nodo_base_fundacion, '-dof', 1, 2, 3, '-dT', dT, 'disp')

```

```

ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Cg.txt', '-time', '-node', tag_C, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Dg.txt', '-time', '-node', tag_D, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Eg.txt', '-time', '-node', tag_E, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Fg.txt', '-time', '-node', tag_F, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Gg.txt', '-time', '-node', tag_G, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')

# Recorders de acceleraci3n
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Ag.txt', '-time', '-node', tag_A, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Bg.txt', '-time', '-node',
nodo_base_fundacion, '-dof', 1, 2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Cg.txt', '-time', '-node', tag_C, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Dg.txt', '-time', '-node', tag_D, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Eg.txt', '-time', '-node', tag_E, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Fg.txt', '-time', '-node', tag_F, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Gg.txt', '-time', '-node', tag_G, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')

# Recorders de tensi3n
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_A, '-time', '-file', 'stressA', '-dT', dT,
'material', suelo_nat, 'stress')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_B, '-time', '-file', 'stressB', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'stress')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_C, '-time', '-file', 'stressC', '-dT', dT,
'material', suelo_nat, 'stress')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_D, '-time', '-file', 'stressD', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'stress')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_E, '-time', '-file', 'stressE', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'stress')

# Recorders de deformaci3n
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_A, '-time', '-file', 'strainA', '-dT', dT,
'material', suelo_nat, 'strain')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_B, '-time', '-file', 'strainB', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'strain')

```

```

ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_C, '-time', '-file', 'strainC', '-dT', dT,
'material', suelo_nat, 'strain')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_D, '-time', '-file', 'strainD', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'strain')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_E, '-time', '-file', 'strainE', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'strain')

ops.analysis('Transient', 'noWarnings')

# Perform analysis
ops.analyze(1,0.1) #(10, 1.e1) (1, 0.01)

ops.setTime(0.0) # reset time, otherwise reference time is not zero for time
history analysis
ops.wipeAnalysis()

# Define sine wave time series
accMul = 2 # acceleration multiplier
massProportionalDamping = 0.0
InitStiffnessProportionalDamping = 0.003
gamma = 0.600 # Newmark integration parameter
numSteps = 2500 # number of analysis steps
ops.timeSeries('Trig', 1, 0.0, 10, 1, '-factor', accMul) #sin function with 10
seconds of duration and period 1s
# Define dynamic loading using UniformExcitation
ops.pattern('UniformExcitation', 1, 1, '-accel', 1)
ops.rayleigh(massProportionalDamping, 0.0, InitStiffnessProportionalDamping, 0.0)
ops.integrator('Newmark', gamma, (gamma + 0.5) ** 2 / 4)
ops.constraints('Penalty', 1.e18, 1.e18)
ops.test('NormDispIncr', 1.0e-3, 25, 0)
ops.algorithm('KrylovNewton')
ops.system('ProfileSPD')
ops.numberer('Plain')
ops.analysis('VariableTransient')
ops.analyze(numSteps, dT,dT/64,dT,15)

# Recorders de desplazamiento
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Ag.txt', '-time', '-node', tag_A, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Bg.txt', '-time', '-node',
nodo_base_fundacion, '-dof', 1, 2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Cg.txt', '-time', '-node', tag_C, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Dg.txt', '-time', '-node', tag_D, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')

```

```

ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Eg.txt', '-time', '-node', tag_E, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Fg.txt', '-time', '-node', tag_F, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')
ops.recorder('Node', '-file', 'disp_Gg.txt', '-time', '-node', tag_G, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'disp')

# Recorders de aceleración
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Ag.txt', '-time', '-node', tag_A, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Bg.txt', '-time', '-node',
nodo_base_fundacion, '-dof', 1, 2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Cg.txt', '-time', '-node', tag_C, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Dg.txt', '-time', '-node', tag_D, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Eg.txt', '-time', '-node', tag_E, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Fg.txt', '-time', '-node', tag_F, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')
ops.recorder('Node', '-file', 'acc_Gg.txt', '-time', '-node', tag_G, '-dof', 1,
2, 3, '-dT', dT, 'accel')

# Recorders de tensiòn
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_A, '-time', '-file', 'stressA', '-dT', dT,
'material', suelo_nat, 'stress')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_B, '-time', '-file', 'stressB', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'stress')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_C, '-time', '-file', 'stressC', '-dT', dT,
'material', suelo_nat, 'stress')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_D, '-time', '-file', 'stressD', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'stress')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_E, '-time', '-file', 'stressE', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'stress')

# Recorders de deformaciòn
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_A, '-time', '-file', 'strainA', '-dT', dT,
'material', suelo_nat, 'strain')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_B, '-time', '-file', 'strainB', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'strain')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_C, '-time', '-file', 'strainC', '-dT', dT,
'material', suelo_nat, 'strain')
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_D, '-time', '-file', 'strainD', '-dT', dT,
'material', suelo_gsi, 'strain')

```

```
ops.recorder('Element', '-ele', tagEle_E, '-time', '-file', 'strainE', '-dT', dT,  
'material', suelo_gsi, 'strain')  
  
print("Analysis complete.")
```