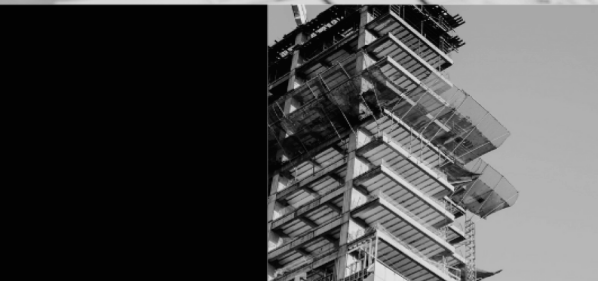


COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MURO DE SUELO REFORZADO EN INFLUENCIA DE LA CARGA SISMICA

ALBERTO CRISTOBAL FLORES QUISPE
MARIO PEDRO RODRÍGUEZ VÁSQUEZ
FABRIZIO DEL CARPIO DELGADO
DELMER HUAYRA ROMANI
HIRBIN FÉLIX CÉSPEDES REYNAGA



COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MURO DE SUELO REFORZADO EN INFLUENCIA DE LA CARGA SISMICA

ALBERTO CRISTOBAL FLORES QUISPE
MARIO PEDRO RODRÍGUEZ VÁSQUEZ
FABRIZIO DEL CARPIO DELGADO
DELMER HUAYRA ROMANI
HIRBIN FÉLIX CÉSPEDES REYNAGA

Editor Chefe

Ivanio Folmer

Bibliotecária

Eliane de Freitas Leite

Revisora Técnica

Gabriella Eldereti Machado

Diagramação e Projeto Gráfico

Gabriel Eldereti Machado

Imagem capa

www.canva.com

Revisão

Organizadores e Autores(as)

Conselho Editorial

Prof. Dr. Adilson Tadeu Basquerote Silva - UNIDAVI

Prof. Dr. Astor João Schönell Júnior - IFFAR

Prof. Dr. Alan Ricardo Costa - UFRR

Profa. Dra. Andréia Bulaty - UNESPAR

Profa. Dra. Carla da Conceição de Lima - UFVJM

Prof. Dr. Camilo Darsie de Souza - UNISC

Profa. Dra. Clarice Caldeira Leite - UFRGS

Profa. Dra. Cecilia Decarli - UFRGS

Prof. Dr. Carlos Adriano Martins - UNICID

Prof. Dr. Christian Dennys Monteiro de Oliveira - UFCE

Profa. Dra. Dayse Marinho Martins - UFMA

Prof. Dr. Deivid Alex dos Santos - UEL

Prof. Dr. Dioni Paulo Pastorio - UFRGS

Prof. Dr. Douglas Manoel Antonio de Abreu Pestana dos Santos - FASESP

Profa. Dra. Elane da Silva Barbosa - UERN

Profa. Dra. Elen Gomes Pereira - IFBA

Profa. Dra. Francielle Benini Agne Tybusch - UFN

Prof. Dr. Francisco Odécio Sales - IFCE

Prof. Dr. Francisco Ricardo Miranda Pinto - UFCAT

Prof. Dr. Gilvan Charles Cerqueira de Araújo - UCB

Prof. Dr. Ismar Inácio dos Santos Filho - UFAL

Prof. Dr. Leonardo Bigolin Jantsch - UFSM

Profa. Dra. Liziany Müller Medeiros - UFSM

Profa. Dra. Marcela Mary José - UFRB

Prof. Dr. Mateus Henrique Köhler - UFSM

Prof. Dr. Michel Canuto de Sena - UFMS

Profa. Dra. Mônica Aparecida Bortolotti - UNICENTRO

Prof. Nilton David Vilchez Galarza - UPLA

Prof. Dr. Olavo Barreto de Souza - UEPB

Prof. Dr. Rafael Nogueira Furtado - UFABC

Prof. Dr. Roberto Araújo da Silva Vasques Rabelo - UNILUS

Prof. Dr. Rodrigo Toledo - USCS

Prof. Dr. Rodolfo Rodrigues de Souza - UERJ

Prof. Dr. Sidnei Renato Silveira - UFSM

Prof. Dr. Thiago Ribeiro Rafagnin - UFOB

Prof. Dr. Tomás Raúl Gómez Hernández - UCLV

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Comportamiento estructural del muro de suelo
reforzado en influencia de la carga sísmica
[livro eletrônico] / Alberto Cristobal Flores
Quispe... [et al.]. -- Santa Maria,
RS : Arco Editores, 2024.
PDF

Outros autores: Mario Pedro Rodríguez Vásquez,
Fabrizio Del Carpio Delgado, Delmer Huayra Romani,
Hirbin Félix Céspedes Reynaga.

Bibliografia.

ISBN 978-65-5417-285-1

1. Ciência do solo 2. Mecânica do solo 3. Pesquisa
científica 4. Solos 5. Terremotos I. Quispe, Alberto
Cristobal Flores. II. Vásquez, Mario Pedro Rodríguez.
III. Delgado, Fabrizio Del Carpio. IV. Romani, Delmer
Huayra. V. Reynaga, Hirbin Félix Céspedes.

24-211889

CDD-631.4

Índices para catálogo sistemático:

1. Ciência dos solos 631.4

Eliane de Freitas Leite - Bibliotecária - CRB 8/8415



10.48209/978-65-5417-285-1

Este livro é o resultado de uma pesquisa científica em
atividades de ciência e tecnologia.

O trabalho foi revisado por pares acadêmicos externo antes
de ser publicado.



CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
CAPÍTULO I.....	13
NOCIONES BÁSICAS SOBRE EL MURO DE SUELO REFORZADO.....	13
1.1. Definición del muro de suelo reforzado.....	14
1.2. Muro de suelo reforzado: diseño y planificación.....	16
1.3. Tipos de muros de suelo reforzado.....	18
1.4. Tendencias y avances en la tecnología de muros de suelo reforzado acorde con la sostenibilidad.....	21
1.5. Sistema Terramesh® en el muro de suelo reforzado.....	23
CAPÍTULO II.....	27
CARGA SÍSMICA.....	27
2.1. ¿Qué es el sismo?.....	28
2.2. Conceptualización de carga sísmica.....	31
2.3. Zonificación sísmica y mapas de peligrosidad.....	33
2.4. Tipos de cargas sísmica.....	36
2.5. Efectos sísmicos en distintos tipos de estructuras.....	38
CAPÍTULO III.....	42
CONCEPCIONES CENTRALES EN RELACIÓN CON EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL.....	42
3.1. Descripción del comportamiento estructural.....	43
3.2. Tipos de deformaciones en estructuras.....	46
3.3. Análisis de esfuerzos y deformaciones.....	49

3.4. Interacción suelo-estructura.....	52
3.5. Herramientas de simulación y modelado estructural: uso de software de análisis estructural.....	55
CAPÍTULO IV.....	58
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MURO DE SUELO REFORZADO EN INFLUENCIA DE LA CARGA SÍSMICA.....	58
CAPÍTULO V.....	70
RELEVANCIA DEL REFORZAMIENTO DEL MURO DE SUELO EN CENTROS COMERCIALES ANTE UNA CARGA SÍSMICA.....	70
5.1. Importancia de la seguridad sísmica en estructuras comerciales.....	71
5.2. Vulnerabilidades estructurales en centros de comercio.....	73
5.3. Estrategias de reforzamiento del muro de suelo en centros comerciales...	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	80
SOBRE LOS AUTORES.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Criterios de búsqueda.....	61
Tabla 2	Resultados cualitativos.....	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Elementos del sistema Terramesh®.....	24
Figura 2 Mapa sísmico 2023.....	34
Figura 3 Diagrama PRISMA.....	62

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo determinar la incidencia de la carga sísmica en muros de suelos reforzados. Para esto, se realizó una revisión sistemática de la literatura, específicamente de artículos publicados en revistas desde el 2019 hasta el 2023, en las bases de datos Google Académico, Dialnet y SciELO. Se utilizó el método PRISMA. El propósito fue obtener artículos que respondan al objetivo y pregunta de investigación del presente estudio. Para su selección, se aplicaron una serie de criterios de inclusión y exclusión. Como resultado de la revisión se obtuvieron 14 artículos a partir de los cuales se determinó que la incidencia de la carga sísmica en muros de suelos reforzados es significativa porque causa daños en la estructura, así como derrumbes, hundimientos y deformaciones, sobre todo si la construcción no ha sido realizada considerando los sismos que puedan o suelen ocurrir en el área, y si el diseño y los materiales son de baja calidad. Como conclusión del estudio, se determina que la incidencia de la carga sísmica en muros de suelos reforzados es significativa, ya que causa diversos daños en su estructura.

Palabras clave: carga sísmica, muros de suelo reforzado, construcción, sismos

ABSTRACT

The present research aims to determine the incidence of seismic loading in reinforced soil walls. For this, a systematic literature review was performed, specifically of journal articles published from 2019 to 2023 in Google Scholar, Dialnet and Scielo databases, making use of the PRISMA method, with the purpose of obtaining articles that respond to the objective and research question of the present study. A series of inclusion and exclusion criteria were applied for their selection. As a result of the review, 14 articles were obtained from which it was determined that the incidence of seismic load on reinforced soil walls is significant because it causes damage to the structure, collapse, subsidence and deformation, especially if the construction has not been carried out considering the earthquakes that may or usually occur in the area. As a conclusion of the study, it is determined that the incidence of seismic loading on reinforced soil walls is significant in causing various damages to their structure.

Keywords: seismic load, reinforced soil walls, construction, earthquakes

INTRODUCCIÓN

La carga sísmica tiene un impacto crucial en la estabilidad y el rendimiento del muro de suelo reforzado. Los cambios en deformaciones, desplazamientos y factor de seguridad pueden ser significativos ante esta carga, especialmente en áreas propensas a terremotos. Por lo tanto, es esencial comprender la respuesta del muro ante estas fuerzas para garantizar su capacidad de resistencia y adaptación a eventos sísmicos. Un análisis exhaustivo de esta incidencia puede revelar áreas de mejora en el diseño y la construcción del muro, permitiendo implementar medidas adecuadas para fortalecer su capacidad de resistencia ante futuros terremotos.

Para iniciar con esta investigación, el primer capítulo se centra en las nociones básicas sobre el muro de suelo reforzado. En este aspecto, se consideró su definición, así como también su diseño y planificación. Asimismo, se exponen los tipos de muros de suelo reforzado y la implementación de la tecnología con base en la sostenibilidad. Finalmente, se explica el Sistema Terramesh® en el muro de suelo reforzado. El segundo capítulo abarca los fundamentos medulares sobre la carga sísmica, partiendo desde la descripción del sismo y culminando con los efectos sísmicos en distintos tipos de estructuras.

Respecto al tercer capítulo teórico, se detallan las concepciones centrales en relación con el comportamiento estructural. Para ello, se hace una descripción teórica, para luego continuar con los tipos de deformaciones en estructuras, el análisis de esfuerzos y deformaciones, la interacción suelo-estructura y las herramientas de simulación y modelado estructural (uso de *software* de análisis estructural).

El cuarto capítulo presenta el meollo de la investigación, centrándose en el análisis de la incidencia de la carga sísmica en el comportamiento estructural del muro de suelo reforzado. Finalmente, se culmina estableciendo la relevan-

cia del reforzamiento del muro de suelo en centros comerciales ante una carga sísmica, atendiendo las vulnerabilidades estructurales en centros comerciales y las estrategias de reforzamiento del muro de suelo en tales espacios. En ese sentido, el objetivo de esta publicación ha sido determinar la incidencia de las cargas sísmicas en el muro de suelo reforzado.

CAPÍTULO I

NOCIONES BÁSICAS SOBRE EL MURO DE SUELO REFORZADO

Adentrarse en las nociones básicas sobre el muro de suelo reforzado implica ingresar en un campo de la ingeniería geotécnica donde la estabilidad estructural y la adaptabilidad se fusionan de manera crucial. En términos generales, el muro de suelo reforzado se define como una estructura ingenieril diseñada para superar las limitaciones geotécnicas del terreno, empleando elementos de refuerzo estratégicamente ubicados. Su concepción y planificación requieren un análisis profundo de las propiedades geotécnicas del suelo, la determinación precisa de cargas aplicadas y la selección adecuada de materiales de refuerzo. Esta disciplina abarca diversos tipos de muros, desde los masivos muros de gravedad hasta los innovadores muros de panel prefabricado, cada uno adaptándose a contextos específicos y demandas estructurales (Velásquez y Guadalupe, 2023).

En la constante evolución de la tecnología de muros de suelo reforzado, Doulala-Rigby y Pérez (2021) indican que las tendencias actuales se orientan hacia enfoques más sostenibles, incorporando innovaciones en materiales y métodos constructivos respetuosos con el medio ambiente. En este contexto, el sistema Terramesh® de Maccaferri emerge como una solución vanguardista, destacando por su versatilidad y eficacia en la estabilización de taludes y estructuras de contención. Este sistema, que combina elementos geosintéticos y malla metálica, se erige como un ejemplo paradigmático de cómo la tecnología puede no solo mejorar la estabilidad estructural, sino también abrazar la sostenibilidad.

nibilidad en la ingeniería geotécnica. A través de estas nociones fundamentales, se revela un panorama dinámico donde la ingeniería y la innovación convergen para crear soluciones sólidas y respetuosas con el entorno.

En suma, las nociones básicas sobre el muro de suelo reforzado han guiado a través de un viaje fascinante en la intersección de la ingeniería y la geotecnia. Desde la definición y diseño meticuloso hasta la variedad de tipos de muros que abordan desafíos específicos, se ha explorado un campo diverso y esencial para la estabilidad de las infraestructuras. Al mirar hacia el futuro, las tendencias sostenibles y los avances tecnológicos revelan un compromiso creciente con prácticas que no solo fortalecen estructuras, sino que también respetan el entorno. En este contexto, el sistema Terramesh® destaca como un ejemplo de innovación, fusionando eficacia técnica con sostenibilidad ambiental. En conjunto, estas nociones básicas subrayan no solo la complejidad y la importancia del muro de suelo reforzado, sino también la capacidad continua de la ingeniería para moldear un futuro donde la estabilidad estructural y la armonía con el entorno convergen de manera equilibrada y eficiente.

1.1. Definición del muro de suelo reforzado

De acuerdo con Velásquez y Guadalupe (2023), el muro de suelo reforzado es una estructura geotécnica y de contención que integra principios de ingeniería del suelo y diseño estructural con el propósito de estabilizar y contener masas de tierra. Este tipo de muro se distingue por la implementación de elementos de refuerzo, tales como geotextiles, geomallas o armaduras, estratégicamente dispuestos en el suelo para mejorar sus características de resistencia y comportamiento frente a cargas externas, con especial énfasis en la carga lateral inducida por la presión del suelo. Dichos elementos de refuerzos son utilizados debido a las particularidades que poseen, así como por mejorar la calidad del suelo (Revelo y Huertas, 2022). A continuación, se describen de manera sucinta:

- Geotextiles: son productos permeables y planos, de origen textil, que se utilizan en obras de geotecnia, principalmente, en ingeniería.
- Geomallas: También conocidos como geogrillas. Están formadas por una red regular de elementos conectados, con aberturas para permitir el intertrabado con aquellos materiales que se usen.

La esencia del muro de suelo reforzado radica en su capacidad para optimizar la interacción entre los componentes constitutivos del suelo y los elementos de refuerzo, dando lugar a una entidad estructural compuesta que sobrepasa las limitaciones inherentes a la geotecnia del terreno. Este enfoque ingenieril no solo se orienta hacia la provisión de estabilidad, sino que también se compromete con la gestión efectiva de las deformaciones y la facilitación de un asentamiento estructural equitativo. Asimismo, el muro de suelo reforzado se posiciona como una solución proactiva para la mitigación de potenciales riesgos relacionados con fenómenos como deslizamientos y colapsos, al ofrecer una respuesta estructural robusta y adaptable a variaciones en las condiciones geotécnicas del entorno (Arqueñiva y Romero, 2021).

Según Torres (2020), la sinergia entre los materiales del suelo y los elementos de refuerzo en el diseño de muros de suelo reforzado no solo contribuye a la mejora de la resistencia a esfuerzos externos, sino que además se erige como una estrategia eficaz para asegurar la estabilidad a largo plazo de estructuras de contención. Al gestionar las complejidades geotécnicas inherentes a diferentes contextos, este enfoque busca alcanzar una cohesión estructural que minimice las posibilidades de desviaciones no deseadas en la geometría y estabilidad del muro, proporcionando así una solución integral y duradera en el ámbito de la ingeniería geotécnica.

Para Briceño *et al.* (2022), el diseño meticuloso de un muro de suelo reforzado demanda un análisis exhaustivo de las propiedades geotécnicas inherentes al suelo de fundación, así como la meticulosa determinación de las cargas aplicadas que actúan sobre la estructura. Este proceso integral requiere una

cuidadosa selección de los materiales de refuerzo, considerando su idoneidad para resistir las tensiones y deformaciones esperadas. Al fusionar principios de mecánica de suelos, geotecnia y diseño estructural, se forja un marco de trabajo que asegura la resistencia y estabilidad óptimas del muro de suelo reforzado, consolidándose como una solución eficiente y sostenible en el campo de la ingeniería geotécnica y las obras civiles.

En resumen, el muro de suelo reforzado se presenta como una amalgama ingenieril donde la ciencia de la geotecnia y el diseño estructural convergen para crear una solución eficaz ante desafíos geotécnicos. Este enfoque no solo persigue la estabilidad y resistencia estructural, sino que también demuestra una conciencia sostenible al optimizar la interacción entre los materiales del suelo y los elementos de refuerzo. La definición del muro de suelo reforzado abarca no solo su capacidad para superar limitaciones geotécnicas, sino también su compromiso con la seguridad, la durabilidad y la armonía con el entorno. Es, en esencia, un testimonio de la ingeniería moderna que busca no construir estructuras robustas y establecer un equilibrio armonioso entre la ingeniería y la naturaleza del terreno.

1.2. Muro de suelo reforzado: diseño y planificación

Para Arqueñiva y Romero (2021), el diseño del muro de suelo reforzado constituye un proceso intrincado y multidisciplinario que se fundamenta en la meticulosa comprensión de las propiedades geotécnicas del suelo de fundación. Este enfoque, esencial para la ingeniería geotécnica, se inicia con un exhaustivo análisis del subsuelo, incluyendo la determinación de características como la resistencia al corte, la compresibilidad y la capacidad de carga. La evaluación precisa de las cargas aplicadas, tanto verticales como horizontales, desempeña un papel crucial en la selección de los materiales de refuerzo y en la definición de la geometría óptima del muro.

La síntesis de elementos de mecánica de suelos, geotecnia y diseño estructural se convierte en el núcleo del proceso de diseño. La elección del tipo de refuerzo, ya sea mediante el uso de geotextiles, geomallas o elementos tridimensionales, se adapta cuidadosamente a las condiciones específicas del sitio. Aspectos como la altura del muro, las condiciones de carga y la estabilidad global son meticulosamente considerados. Asimismo, se emplean herramientas avanzadas de modelado estructural y análisis geotécnico para prever el comportamiento del muro bajo diferentes escenarios. La meta final del diseño del muro reforzado es alcanzar una solución que no solo supere los desafíos geotécnicos, sino que también demuestre eficiencia y sostenibilidad. La coexistencia de estos elementos en el diseño no garantiza la robustez estructural del muro y asegura una respuesta duradera y armoniosa con el entorno geotécnico circundante (Avendaño *et al.*, 2023).

Alva y Aguilar (2021) detallan que la planificación del muro de suelo reforzado, intrínsecamente ligada a su diseño, es una fase crucial que se despliega como un proceso continuo de toma de decisiones. La información obtenida durante el análisis geotécnico y el diseño estructural orienta la definición de estrategias de construcción y la implementación de medidas de mitigación de riesgos. La selección de la secuencia constructiva, la logística del sitio y la coordinación eficiente de los recursos son elementos centrales en esta etapa.

Asimismo, la planificación abarca desde la estimación de los tiempos de construcción hasta la logística para el suministro y manejo de materiales de refuerzo. Es crucial considerar factores como las condiciones climáticas, la accesibilidad al sitio y la implementación de controles de calidad a lo largo del proceso constructivo. La integración de planes de monitoreo y evaluación continua durante la construcción permite ajustes en tiempo real, asegurando la coherencia entre el diseño original y la ejecución práctica del proyecto (Arqueñiva y Romero, 2021). El éxito de la planificación del muro de suelo reforzado reside en la capacidad de anticiparse a posibles obstáculos y en la implementación de estrategias que optimicen la eficiencia y la seguridad del proceso constructivo.

Al enlazar el diseño con una planificación detallada, se garantiza la cohesión entre la visión teórica del proyecto y su realización práctica, contribuyendo así a la ejecución exitosa y duradera de la estructura reforzada.

En ese sentido, la asociación entre el diseño y la planificación del muro de suelo reforzado se manifiesta como el epicentro de la ingeniería geotécnica contemporánea. La meticulosa evaluación de las propiedades geotécnicas del suelo, el análisis detallado de las cargas aplicadas y la selección precisa de materiales de refuerzo representan los pilares fundamentales de un diseño que aspira a superar los retos inherentes al terreno. La planificación estratégica, guiada por este diseño riguroso, implica consideraciones cruciales como la geometría del muro, la integración con el entorno y la anticipación de posibles cambios en las condiciones del subsuelo. Este proceso integrado no solo busca la estabilidad estructural del muro, sino también establecer un equilibrio armónico entre la ingeniería y el entorno geotécnico, proporcionando soluciones duraderas, eficientes y respetuosas con el contexto natural. Así, el diseño y la planificación del muro de suelo reforzado se erigen como un testimonio de la ingeniería moderna que no solo construye estructuras robustas, sino que además forja una conexión sostenible y armoniosa con la tierra que sustentan.

1.3. Tipos de muros de suelo reforzado

La diversidad de desafíos geotécnicos y las variadas condiciones de proyecto en el ámbito de la ingeniería civil han dado lugar a una gama ecléctica de tipos de muro de suelo reforzado. Entre estos, destacan los muros de gravedad, que aprovechan su propio peso para contrarrestar las presiones del suelo; los muros cantilever, cuya geometría proporciona una estabilidad inherente; los muros de contrarresto, que emplean contrafuertes para equilibrar las fuerzas laterales; y los muros de panel prefabricado, que ofrecen una solución eficiente mediante la integración de elementos prefabricados. Cada categoría exhibe características únicas que se adaptan a distintas aplicaciones y requisitos de

diseño, reflejando la adaptabilidad y versatilidad del enfoque de muros de suelo reforzado en la ingeniería geotécnica. En esta diversidad, se encuentra la capacidad de los ingenieros de seleccionar la tipología más idónea en función de las especificidades del proyecto y las demandas geotécnicas, destacando la flexibilidad inherente a esta disciplina (Tenorio y Santa Cruz, 2022).

Para empezar, Gamero (2023) sostiene que los muros de gravedad son estructuras masivas que aprovechan su propio peso para contrarrestar las fuerzas laterales del suelo. Su diseño se fundamenta en la capacidad de la masa del muro para resistir la presión del suelo, proporcionando una solución robusta y eficiente. Este tipo de muro es especialmente adecuado para aplicaciones donde la estética y la simplicidad estructural son prioritarias, y su desempeño es destacado en situaciones donde se requiere una rápida construcción.

Erol *et al.* (2019) indican que los muros de gravedad son usualmente utilizados como sistemas de retención de tierra porque tienen la capacidad de soportar pendientes de relleno adyacentes a zonas residenciales o carreteras. Asimismo, son empleados para construir muelles, debido a su durabilidad, facilidad de uso y capacidad de alcanzar y resistir el fondo marino. Para usar los muros de gravedad, se deben considerar tres importantes criterios de diseño: deslizamiento, tensión de soporte y vuelco, con el fin de que las cargas sean correctamente distribuidas y se evite el colapso de la construcción.

Por otro lado, los muros cantiléver tienen una extensión hacia adelante desde la base hasta la parte superior, creando una estructura en forma de T. La geometría de este tipo de muro brinda una estabilidad inherente, al aprovechar el momento de fuerza creado por la carga del suelo. Esta tipología es comúnmente empleada en aplicaciones donde se busca una solución eficaz y estéticamente agradable, como en terraplenes de carreteras y proyectos de desarrollo urbano (Konai *et al.*, 2020).

Los muros cantiléver son elaborados con hormigón armado y a base de pasta de concreto en cuyo interior se agrega mallas de acero o un armado de

barras. Se construyen con gran frecuencia en áreas sísmicas o en subsuelos de cimentación con características mecánicas y físicas diferentes. Es importante considerar que la construcción de estos muros tiene una estrecha interacción con el tipo de suelo, la rigidez y las estructuras. Cabe precisar que, además de los movimientos sísmicos y las condiciones del suelo, los muros cantiléver cumplen un rol determinante en el diseño de muros de contención en voladizo (Ozturk *et al.*, 2023).

Ahora bien, Fianchini *et al.* (2022) detallan que los muros de contrarresto se distinguen por la incorporación de contrafuertes o contrafuertes inclinados en la parte trasera del muro, que proporcionan resistencia adicional a las fuerzas laterales. Este diseño permite una distribución más uniforme de las cargas, y es particularmente efectivo en situaciones donde se requiere una mayor estabilidad estructural. Los muros de contrarresto son idóneos para proyectos que implican alturas significativas y en los que se busca una solución que combine eficiencia y resistencia.

A su vez, Meireles *et al.* (2024) indican que los muros de panel prefabricado ofrecen una alternativa eficiente y versátil al emplear elementos prefabricados que se ensamblan *in situ*. Este enfoque agiliza el proceso constructivo y garantiza una mayor consistencia en la calidad. Son ideales para proyectos que requieren rapidez en la ejecución y donde la uniformidad estética es esencial. Los muros de panel prefabricado han ganado popularidad en aplicaciones como muros de contención en áreas urbanas y proyectos comerciales. Su diseño modular permite adaptarse a diversas configuraciones y condiciones geotécnicas, añadiendo una capa de flexibilidad al repertorio de soluciones en ingeniería geotécnica.

En conclusión, la diversidad de tipos de muro de suelo reforzado, desde los masivos muros de gravedad hasta los elegantes muros cantiléver, pasando por la estabilidad adicional proporcionada por los muros de contrarresto y la eficiencia constructiva de los muros de panel prefabricado, refleja la riqueza

y versatilidad de esta disciplina en la ingeniería geotécnica. Cada tipología se adapta a diferentes contextos, requisitos de diseño y condiciones geotécnicas, resaltando la flexibilidad intrínseca de los muros de suelo reforzado como soluciones adaptables y eficientes. En este abanico de opciones, los ingenieros encuentran la capacidad de seleccionar la tipología más adecuada para cada proyecto, demostrando que la ingeniería geotécnica no solo busca la estabilidad estructural, sino también la armonía con el entorno y la optimización de recursos. La variedad de enfoques disponibles refleja la capacidad de esta disciplina para abordar una amplia gama de desafíos, destacando la creatividad y la ingeniería innovadora en la construcción de soluciones sólidas y sostenibles.

1.4. Tendencias y avances en la tecnología de muros de suelo reforzado acorde con la sostenibilidad

En el panorama actual de la ingeniería geotécnica, Chou *et al.* (2020) puntualizan que las tendencias y avances en la tecnología de muros de suelo reforzado han experimentado un notable crecimiento y desarrollo. La búsqueda continua de soluciones más eficientes, sostenibles y adaptables ha impulsado la innovación en este campo, dando lugar a una serie de avances que transforman la manera en que se conciben, diseñan y construyen los muros de contención y de contención de suelo. Desde el uso de nuevos materiales de refuerzo hasta la aplicación de técnicas de modelado avanzadas y la integración de sistemas inteligentes de monitoreo, la tecnología de muros de suelo reforzado está experimentando una evolución significativa que promete mejorar tanto la seguridad como la eficacia de estas estructuras en una amplia variedad de aplicaciones y entornos geotécnicos.

En cuanto a las innovaciones en la tecnología de muros de suelo reforzado, destaca de manera prominente el enfoque hacia la sostenibilidad a través de avances significativos en materiales. La búsqueda constante de alternativas más amigables con el medio ambiente ha dado lugar a la introducción de materiales ecoeficientes y reciclados para el refuerzo de suelos. La incorporación

de fibras naturales, geosintéticos reciclados y compuestos orgánicos en lugar de materiales convencionales no solo reduce la huella ambiental, sino que también ofrece propiedades mejoradas de resistencia y durabilidad (Doulala-Rigby y Pérez, 2021).

Asimismo, González *et al.* (2023) dilucidan que las investigaciones se centran en el desarrollo de materiales que puedan proporcionar beneficios adicionales, como la absorción de CO₂ durante su ciclo de vida o la capacidad de autorreparación frente a pequeños daños. Estos avances abordan las preocupaciones ambientales, a la vez que se alinean con la creciente demanda de soluciones de ingeniería que integren principios de sostenibilidad. La evolución de los materiales utilizados en muros de suelo reforzado refleja el compromiso de la ingeniería geotécnica con prácticas más responsables y respetuosas con el medio ambiente, allanando el camino hacia un futuro donde la eficacia estructural y la sostenibilidad convergen de manera armoniosa.

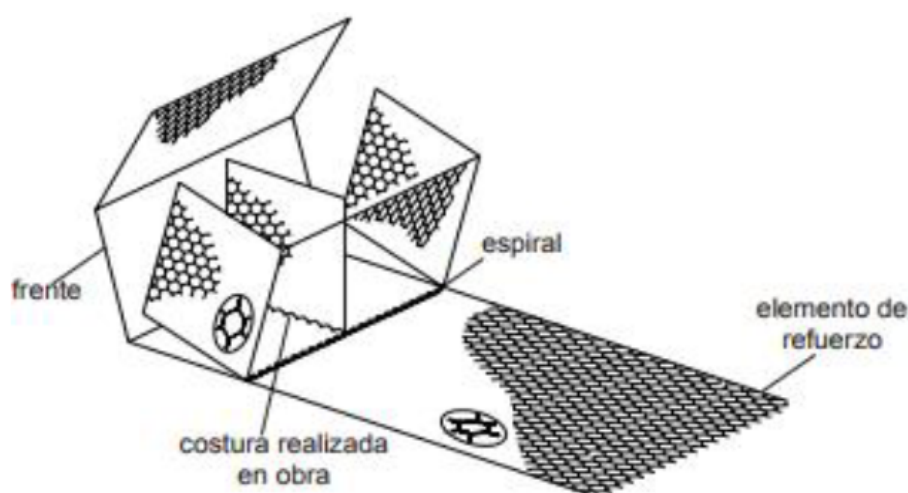
En cuanto a los desarrollos en métodos constructivos, se sostiene sobre su cambio significativo hacia la sostenibilidad ambiental. La introducción de prácticas constructivas más respetuosas con el medio ambiente está redefiniendo la manera en que se conciben y ejecutan estos proyectos. Desde la adopción de procesos de construcción más eficientes que reducen los desperdicios y la huella de carbono hasta la integración de materiales reciclados y técnicas de construcción modular, los avances actuales están abriendo un camino hacia una ingeniería geotécnica más sostenible. Asimismo, la optimización de los métodos constructivos no solo busca mejorar la eficiencia y la durabilidad de los muros de suelo reforzado, sino también minimizar el impacto ambiental, promoviendo así un enfoque holístico que equilibra la necesidad de infraestructuras sólidas con la responsabilidad hacia el propio entorno. Este impulso hacia la sostenibilidad en los métodos constructivos refleja una tendencia prometedora hacia la coexistencia armoniosa entre la ingeniería y el medio ambiente (Xu *et al.*, 2022).

En resumen, las actuales tendencias y avances en la tecnología de muros de suelo reforzado están delineando un horizonte innovador y sostenible en la ingeniería geotécnica. La evolución constante en materiales, enfoques constructivos y técnicas de modelado —todos orientados hacia la sostenibilidad— reflejan un compromiso creciente con la responsabilidad ambiental en el diseño y la construcción de infraestructuras. La incorporación de materiales ecoamigables, la aplicación de métodos constructivos eficientes y la integración de tecnologías inteligentes de monitoreo no solo buscan fortalecer estructuras, sino también fomentar prácticas respetuosas con el entorno. Este paradigma emergente en la tecnología de muros de suelo reforzado responde a las demandas actuales de la ingeniería, a la vez que sienta las bases para un futuro donde la resiliencia estructural se combina armoniosamente con la sostenibilidad medioambiental. En última instancia, estas tendencias representan un paso significativo hacia una ingeniería geotécnica que no solo edifica infraestructuras sólidas, sino que también promueve la preservación y el respeto por el entorno natural.

1.5. Sistema Terramesh® en el muro de suelo reforzado

El sistema Terramesh® está constituido por un parámetro externo, de un metro de espesor; además, está relleno con piedras angulares cuyas dimensiones son estándares. Dentro de su perímetro interior se coloca la geomalla de acero con la finalidad de evitar la fuga de los finos del relleno estructural; dicho de otro modo, su interior está conformado por tierra reforzada con alta densidad y calidad. Los elementos que conforman este sistema se observan en la Figura 1.

Figura 1: *Elementos del sistema Terramesh®*



Nota. Tomado de Vilchez y Toledo (2018)

Según Lu *et al.* (2021), el sistema Terramesh® ha surgido como una innovación destacada en el ámbito de las soluciones geotécnicas y de retención del suelo. Además, su creación se consiguió por la labor de la reconocida empresa de ingeniería geotécnica Maccaferri; así, Terramesh® representa un enfoque vanguardista para la estabilización de taludes y muros de contención. Este sistema se distingue por su combinación única de flexibilidad, durabilidad y facilidad de instalación, lo que lo convierte en la opción preferida de ingenieros y diseñadores en una variedad de contextos geotécnicos. Ya sea en aplicaciones de control de erosión, protección contra deslizamientos de tierra o en proyectos de ingeniería civil a gran escala, Terramesh® ha establecido un estándar de excelencia al proporcionar soluciones versátiles y sostenibles para desafíos geotécnicos específicos.

De acuerdo con Vilchez y Toledo (2018), el sistema Terramesh® posee una serie de ventajas y desventajas, las cuales se enlistan a continuación:

Ventajas

- Tiene una excelente relación costo/beneficio.
- Tiene la capacidad de resistir a una gran presión en la parte superior del talud soportado por el muro, dado que las geomallas ayudan con la distribución de los esfuerzos cortantes al suelo armado.

Desventajas

- Para poder colocar las geomallas al interior, es necesario cortar los grandes taludes del suelo.
- Se necesitan muchos equipos y maquinarias para colocar y tratar el suelo reforzado donde el muro será construido.
- Solo puede construirse en épocas poco lluviosas; caso contrario, las propiedades y características del suelo de relleno pueden modificarse.

Pese a las desventajas que posee, el sistema Terramesh® ha ganado una gran popularidad debido a sus bajos costos, facilidad de instalación y durabilidad, la cual se garantiza al galvanizar la malla de alambre o al usar geomallas poliméricas de alta resistencias, que se caracterizan por proporcionar estabilidad estructural (Govender y Schulz-Poblete, 2023).

En la implementación de muros de suelo reforzado, el sistema Terramesh® utiliza una combinación de elementos de refuerzo geosintéticos y unidades modulares de malla metálica, proporcionando una solución integral y resistente. A su vez, la flexibilidad del sistema permite su adaptación a una variedad de condiciones geotécnicas, desde la contención de suelos hasta la protección contra la erosión. La incorporación de unidades modulares prefabricadas simplifica el proceso constructivo, permitiendo una instalación eficiente y precisa. Además, Terramesh® destaca por su durabilidad a largo plazo, asegurando una respuesta estructural efectiva frente a las fuerzas del suelo y minimizando los riesgos asociados a deslizamientos o colapsos (Ćwirko y Jastrzębska, 2021).

Para Campos (2020), la implementación de dicho sistema en muros de suelo reforzado se destaca como un paradigma de ingeniería geotécnica que combina pragmatismo, fiabilidad y sostenibilidad. Este enfoque pragmático se materializa en la capacidad de adaptación del sistema a una amplia gama de desafíos geotécnicos, desde la contención de suelos hasta la estabilización de taludes, ofreciendo respuestas estructurales específicas para cada proyecto. La fiabilidad inherente de Terramesh® se manifiesta en su capacidad para resistir

las fuerzas del suelo a lo largo del tiempo, proporcionando una solución robusta y duradera para proyectos que requieren retención de suelos y estructuras de contención.

La sostenibilidad, por su parte, se incorpora en la esencia misma de Terramesh®, desde la selección de materiales hasta su eficiencia constructiva. La combinación de elementos geosintéticos y malla metálica no solo optimiza la resistencia del muro, sino que también minimiza el impacto ambiental y los recursos necesarios para la construcción. Al abordar las demandas específicas de proyectos geotécnicos, Terramesh® no solo proporciona una solución técnica precisa, sino que también abraza una perspectiva holística al integrar prácticas sostenibles en la ingeniería geotécnica moderna. En última instancia, su aplicación destaca como un ejemplo tangible de cómo la ingeniería puede converger de manera efectiva con la sostenibilidad, trascendiendo los límites tradicionales para ofrecer soluciones equilibradas y duraderas en la retención de suelos y estructuras de contención (Lu *et al.*, 2021).

En síntesis, el sistema Terramesh® no solo representa un hito en la ingeniería geotécnica, sino que reconfigura el panorama de los muros de suelo reforzado. Su versatilidad, eficacia y facilidad de instalación lo posicionan como una opción líder para ingenieros y diseñadores en la estabilización de taludes y la construcción de estructuras de contención. La combinación de elementos geosintéticos y malla metálica, junto con su durabilidad a largo plazo, refuerzan la fiabilidad de Terramesh® en entornos geotécnicos diversos. En última instancia, este sistema no solo mejora la eficiencia constructiva, sino que además establece un estándar de excelencia en la búsqueda de soluciones sostenibles y robustas en la ingeniería de muros de suelo reforzado.

CAPÍTULO II

CARGA SÍSMICA

En el ámbito de la ingeniería estructural, la comprensión de los fundamentos esenciales en relación con la carga sísmica se erige como un pilar fundamental para el diseño y la construcción de estructuras resilientes. Se comienza por definir el sismo, un fenómeno geofísico que se manifiesta como movimientos bruscos y vibraciones de la Tierra, capaces de generar fuerzas significativas sobre las construcciones. La carga sísmica, entonces, se refiere a las fuerzas dinámicas ejercidas por un sismo sobre las estructuras. La zonificación sísmica y los mapas de peligrosidad desempeñan un papel clave al delinear las áreas geográficas propensas a la actividad sísmica y proporcionar una representación gráfica de las probabilidades y magnitudes de sismos (Sariol *et al.*, 2022).

Dentro de este marco, Sampaio *et al.* (2021) señalan que es esencial explorar los tipos de carga sísmica que actúan sobre las estructuras durante un evento sísmico, como la carga sísmica horizontal, la carga sísmica vertical y las cargas de inercia y pseudoestáticas. Cada una de estas fuerzas presenta desafíos específicos que deben abordarse durante el diseño estructural. Además, entender los efectos sísmicos en distintos tipos de estructuras, como edificaciones de concreto armado, estructuras de acero, puentes y viaductos, es crucial para desarrollar estrategias de diseño efectivas que aseguren la seguridad y resiliencia de las construcciones.

En este contexto, explorar los fundamentos centrales relacionados con la carga sísmica es la base para un enfoque informado y proactivo en la ingenie-

ría sísmica, ya que contribuye a la construcción de infraestructuras capaces de resistir los desafíos dinámicos de los sismos. Esto es de suma importancia porque garantiza que las estructuras puedan cumplir el objetivo por las cuales son construidas y, principalmente, para evitar que las edificaciones se derrumben y causen daños materiales o humanos.

2.1. ¿Qué es el sismo?

El origen del sismo, también conocido como terremoto, se encuentra en la liberación repentina de energía acumulada en la corteza terrestre debido a la liberación de tensiones acumuladas. Este fenómeno se produce principalmente en los límites de las placas tectónicas, donde las enormes fuerzas geológicas generan movimientos y desplazamientos en la corteza terrestre. Cuando la resistencia de las rocas subyacentes a estas fuerzas se ve superada, se produce una ruptura repentina que libera una gran cantidad de energía en forma de ondas sísmicas (Sariol *et al.*, 2022).

Los sismos se concentran en franjas que armonizan con los límites de las placas tectónicas. Esto es producto de que el mecanismo de generación de los sismos y la acumulación de energía elástica en los bordes de una falla se relacionan. En este punto, debe aclararse que los tipos de los bordes de las placas tectónicas se dividen en tres: convergencia, divergencia y transformación. El límite de convergencia entre dos placas consiste en que una de ellas se inserta bajo la otra mediante un movimiento denominado subducción. El límite de divergencia se ubica donde dos placas se separan para dar origen a una corteza nueva, usualmente oceánica. En el límite de transformación, las dos placas se deslizan sin ocasionar creación o destrucción de corteza. El deslizamiento entre las dos placas involucradas no sucede de forma suave, sino que la superficie de contacto impide el deslizamiento al tener una zona más rugosa. Este atoramiento entre las placas acumula energía elástica, la cual es liberada de manera súbita, dando origen a los sismos (Pérez-Gavilán *et al.*, 2018).

Como sostienen Beigt *et al.* (2023), los sismos pueden clasificarse en dos tipos principales: tectónicos y volcánicos. Los sismos tectónicos —los más prevalentes en la actividad sísmica global— encuentran su origen en la interacción dinámica de las placas tectónicas que conforman la litosfera terrestre. En los límites de estas placas, sea en zonas de subducción, convergencia, divergencia o transformación, se acumulan tensiones significativas debido a la fricción y la resistencia en las zonas de contacto. A medida que las placas se desplazan, estas tensiones aumentan gradualmente hasta alcanzar un punto crítico. Cuando la resistencia de las rocas subyacentes no puede soportar más la creciente presión, se produce una ruptura súbita y se libera energía. Esta liberación de energía se manifiesta en forma de ondas sísmicas que se propagan por el interior de la Tierra, generando el fenómeno conocido como sismo. La magnitud y la intensidad del sismo dependen de la cantidad de energía liberada durante este proceso, un fenómeno que sigue siendo objeto de estudio e investigación en la disciplina de la sismología.

Por otro lado, Bravo *et al.* (2020) puntualizan que los sismos volcánicos, en contraste con los tectónicos, encuentran su origen en la actividad magmática que caracteriza a las regiones volcánicas de la Tierra. La presión generada por el magma en el interior de la corteza terrestre puede desencadenar sismos al causar fracturas y desplazamientos en las capas rocosas circundantes. Cuando la presión acumulada supera la resistencia de las rocas circundantes, se producen fisuras y grietas que dan lugar a movimientos sísmicos. Estos sismos, conocidos como sismos volcánicos, pueden ser precursores de actividad eruptiva y están intrínsecamente ligados al complejo sistema de fuerzas que impulsa la actividad de un volcán.

En este escenario, la interacción entre el magma ascendente y las estructuras rocosas circundantes crea un entorno dinámico propenso a la generación de sismos. La liberación de energía en este contexto puede variar en magnitud y duración, y su monitoreo es esencial para evaluar el estado de actividad vol-

cánica y prever posibles erupciones. La comprensión de los sismos volcánicos desempeña un papel crucial en la gestión del riesgo volcánico y en la protección de las comunidades ubicadas en zonas cercanas a volcanes activos (Beigt *et al.*, 2023).

La magnitud de un sismo, un parámetro fundamental para evaluar su intensidad, se cuantifica mediante la escala de Richter, desarrollada por Charles F. Richter en 1935. Esta escala asigna un número único al evento sísmico, reflejando la cantidad de energía liberada durante el mismo. La escala es logarítmica, lo que significa que cada incremento de un número en la escala implica un aumento de aproximadamente 32 veces en la energía liberada. La comprensión detallada del origen y la definición de los sismos es esencial en la gestión del riesgo sísmico. La evaluación de riesgos, la planificación urbana y la implementación de medidas de mitigación en regiones propensas a la actividad sísmica dependen directamente de una interpretación precisa de la magnitud sísmica. Esta información no solo evidencia la respuesta sísmica esperada, sino que también guía la toma de decisiones críticas para garantizar la seguridad de las comunidades afectadas y la resiliencia de las infraestructuras frente a eventos sísmicos (Cerón *et al.*, 2022).

En resumen, la comprensión del origen y la definición de los sismos revela la intrincada danza de fuerzas geológicas que subyacen en estos eventos naturales. Desde los sismos tectónicos, desencadenados por las tensiones acumuladas en los bordes de las placas tectónicas, hasta los sismos volcánicos, vinculados a la actividad magmática que modela la corteza terrestre, cada evento sísmico es una manifestación única de la dinámica del planeta. La cuantificación de su magnitud a través de la escala de Richter proporciona una herramienta esencial para evaluar riesgos, planificar el desarrollo urbano e implementar estrategias de mitigación. En última instancia, la continua investigación y comprensión de estos fenómenos geofísicos fundamentales son esenciales para fortalecer la resiliencia de las comunidades y las infraestructuras frente a la complejidad de la actividad sísmica global.

2.2. Conceptualización de carga sísmica

La conceptualización de carga sísmica emerge como una piedra angular en el diseño estructural, destacando su importancia crucial, sobre todo en áreas propensas a actividad sísmica (Mesa *et al.*, 2020). Este proceso implica la minuciosa representación y evaluación de las fuerzas dinámicas que un sismo ejerce sobre las estructuras, reconociendo la naturaleza impredecible y potencialmente devastadora de estos eventos geofísicos. La carga sísmica se manifiesta como fuerzas horizontales y verticales que buscan desafiar la integridad estructural de edificaciones, puentes y otras infraestructuras. La comprensión precisa de estas fuerzas es esencial para el diseño de estructuras que puedan resistir y absorber la energía liberada durante un sismo, contribuyendo así a la seguridad de las personas y la protección de bienes materiales.

En regiones propensas a la actividad sísmica, la conceptualización de carga sísmica se convierte en una tarea crítica, ya que las estructuras deben estar diseñadas no solo para soportar las cargas estáticas convencionales, sino también para resistir las fuerzas dinámicas imprevistas de un sismo. Este enfoque meticuloso implica considerar factores como la aceleración sísmica, la masa de la estructura y las propiedades del suelo en el que se asienta. Al adherirse a normativas y códigos sísmicos específicos, los ingenieros pueden aplicar de manera efectiva esta conceptualización para garantizar que las estructuras sean resilientes ante la amenaza sísmica, contribuyendo así a la seguridad y estabilidad de las comunidades afectadas por estos eventos (Sariol *et al.*, 2022).

Por otro lado, Cagua-Gómez *et al.* (2022) sostienen que la carga sísmica, al manifestarse como fuerzas horizontales y verticales, persigue alterar la forma o desplazar las edificaciones, puentes y demás estructuras, representando un desafío significativo para la estabilidad de las construcciones en regiones propensas a la actividad sísmica. Esta carga dinámica impone tensiones y sollicitaciones excepcionales sobre las estructuras, requiriendo un enfoque de diseño cuidadoso y preciso. La conceptualización de la carga sísmica implica una

evaluación integral de factores cruciales, entre ellos la aceleración sísmica, que determina la intensidad del movimiento del suelo durante un sismo. Además, se considera la masa de la estructura, puesto que estructuras más pesadas pueden experimentar mayores fuerzas sísmicas, y también las características geotécnicas del suelo, que influyen en la forma en que las ondas sísmicas se transmiten y afectan a la estructura.

Este proceso de conceptualización busca anticipar y entender la respuesta de las estructuras ante la dinámica compleja de un sismo, lo que permite a los ingenieros diseñar edificaciones capaces de resistir las cargas sísmicas y minimizar el riesgo de colapso. La selección de materiales, la geometría estructural y la consideración cuidadosa de las condiciones del suelo son elementos esenciales en este proceso, ya que cada uno desempeña un papel crítico en la capacidad de la estructura para absorber y disipar la energía sísmica. En definitiva, la conceptualización de la carga sísmica se erige como un fundamento esencial en el diseño estructural, garantizando la seguridad y resiliencia de las infraestructuras en entornos propensos a la actividad sísmica (Mesa *et al.*, 2020).

En este contexto, los ingenieros se valen de normativas y códigos sísmicos como herramientas fundamentales para calcular y aplicar de manera efectiva las cargas sísmicas en el diseño estructural. Estas regulaciones proporcionan lineamientos específicos para considerar la ubicación geográfica, el tipo de estructura y la probabilidad de eventos sísmicos. Al adherirse a estas normativas, los ingenieros garantizan que las estructuras estén diseñadas con márgenes de seguridad adecuados para resistir los efectos potenciales de un sismo, preservando así la seguridad pública y reduciendo los riesgos asociados a la actividad sísmica (Hurtado-López y Mayoral-Villa, 2020).

De este modo, la conceptualización de la carga sísmica no solo representa una pieza fundamental en el diseño estructural, sino que además es un testimonio del compromiso ingenieril hacia la seguridad y la resiliencia. Al abordar las fuerzas dinámicas desencadenadas por los sismos, los ingenieros no solo

consideran la complejidad de las fuerzas horizontales y verticales que buscan deformar o desplazar las estructuras, sino que también integran factores críticos como la aceleración sísmica, la masa de la estructura y las características geotécnicas del suelo. Este enfoque holístico, respaldado por normativas y códigos sísmicos rigurosos, garantiza que las estructuras sean concebidas para soportar las cargas estáticas convencionales y resistir los embates imprevisibles de un sismo. En última instancia, la conceptualización de la carga sísmica emerge como un faro de conocimiento y cuidado, guiando el diseño de estructuras robustas que preservan la seguridad pública y contribuyen a la construcción de comunidades más resilientes frente a los desafíos sísmicos.

2.3. Zonificación sísmica y mapas de peligrosidad

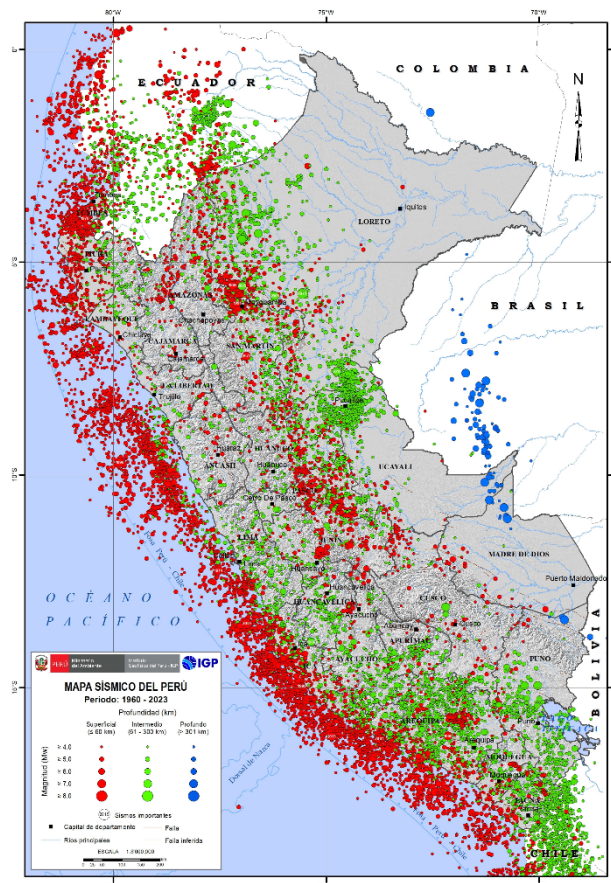
La zonificación sísmica es una guía de los valores mínimos que deben ser considerados durante el diseño de estructuras, en conjunto con el tipo de suelo (blando o firme). Consiste en dividir una región en porciones y especificar en cada una de estas los parámetros constantes de diseño sísmico. Es una herramienta de gran utilidad porque indica las zonas que se encuentran más susceptibles o propensas a sufrir una sollicitación sísmica mayor (Moya, 2018).

La zonificación sísmica también se define como el resultado de haber distribuido el espacio del territorio de una nación, a la cual se corresponde una actividad sísmica específica. Esto se fundamenta en la observación de una serie de registros generados. Las zonas identificadas poseen el factor “Z” para su respectivo registro (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, 2018).

Para Viera *et al.* (2020), la zonificación sísmica desempeña un papel crucial en la planificación y el diseño estructural, pues ofrece una representación detallada de la distribución de riesgos sísmicos en una determinada región. Esta herramienta esencial categoriza áreas geográficas según su nivel de actividad sísmica y la probabilidad de experimentar sismos de diversas magnitudes. La importancia de la zonificación sísmica radica en su capacidad para proporcionar

información precisa sobre los riesgos potenciales; ello permite que ingenieros, urbanistas y autoridades locales puedan tomar decisiones informadas en cuanto al diseño de infraestructuras y la implementación de medidas de seguridad.

Figura 2: *Mapa sísmico 2023*



Nota. Tomado de Instituto Geofísico del Perú [IGP] (s.f.)

Asimismo, la zonificación sísmica no solo influye en el diseño de estructuras, sino que también orienta la planificación urbana y la gestión del riesgo en comunidades vulnerables. Conociendo la amenaza sísmica específica en una zona determinada, es posible implementar códigos de construcción más estrictos, diseñar edificaciones más resistentes y establecer protocolos de respuesta adecuados. Esto no solo preserva la seguridad pública, sino que también contribuye a la resiliencia a largo plazo de las comunidades ante posibles eventos sísmicos. En última instancia, la zonificación sísmica se erige como una herramienta esencial para mitigar los riesgos asociados a la actividad sísmica y

garantizar un desarrollo sostenible y seguro en regiones propensas a sismos (Mitac *et al.*, 2021).

Investigadores como Viera *et al.* (2020) resaltan que la determinación de la peligrosidad sísmica es un proceso fundamental en la evaluación de riesgos y diseño de infraestructuras resilientes. Diversos métodos se emplean para medir la amenaza sísmica en una región específica, proporcionando información valiosa para la planificación y toma de decisiones. Uno de los métodos prominentes es el análisis histórico, que examina registros históricos de sismos para identificar patrones, frecuencias y magnitudes. Sin embargo, este enfoque tiene limitaciones, ya que puede no captar eventos de baja frecuencia pero de alta peligrosidad.

Otro método es el análisis probabilístico, que utiliza modelos estadísticos para evaluar la probabilidad de sismos de diversas magnitudes en un período específico. Este enfoque considera la recurrencia de eventos sísmicos y proporciona una visión más completa de la peligrosidad a lo largo del tiempo. Además, el análisis de microzonificación sísmica implica estudios detallados de las características geotécnicas del suelo en una zona, debido a que estas pueden influir significativamente en la amplitud y duración de las ondas sísmicas. En conjunto, la combinación de estos métodos ofrece una evaluación más integral de la peligrosidad sísmica, permitiendo la implementación de estrategias de mitigación adecuadas y la toma de decisiones informadas en la planificación urbana y el diseño estructural (Álvarez *et al.*, 2022).

En este contexto, Salcedo (2022) señala que la interpretación de mapas de peligrosidad sísmica es un proceso clave para comprender y visualizar los riesgos potenciales asociados a la actividad sísmica en una región específica. Estos mapas, elaborados a partir de datos obtenidos mediante diversos métodos, ofrecen representaciones gráficas de las probabilidades de ocurrencia de sismos de diferentes magnitudes en un área determinada. La interpretación de estos mapas implica evaluar las zonas de mayor peligrosidad, identificando áreas con mayor probabilidad de experimentar movimientos sísmicos signi-

ficativos. Además, permite discernir las variaciones en la intensidad sísmica, destacando áreas donde la respuesta estructural puede ser más desafiante.

Los mapas de peligrosidad sísmica se convierten en herramientas fundamentales para la toma de decisiones en planificación urbana y diseño estructural. Al entender la información proporcionada por estos mapas, los planificadores y profesionales de la ingeniería pueden implementar medidas de mitigación específicas en áreas de mayor riesgo, desarrollar códigos de construcción adaptados a las condiciones sísmicas locales y promover la resiliencia de las comunidades ante posibles eventos sísmicos. La interpretación precisa de estos mapas facilita la adopción de estrategias preventivas y contribuye a un enfoque proactivo en la gestión del riesgo sísmico (Viera *et al.*, 2020).

En conclusión, la zonificación sísmica y la interpretación de mapas de peligrosidad sísmica se erigen como herramientas fundamentales para la comprensión y gestión efectiva de los riesgos sísmicos en nuestras comunidades. Estos instrumentos delinean las áreas geográficas propensas a la actividad sísmica, a la vez que ofrecen una visión detallada de las probabilidades y magnitudes de sismos en diferentes regiones. La interpretación cuidadosa de esta información guía la planificación urbana, el diseño estructural y la implementación de estrategias de mitigación, promoviendo la seguridad y resiliencia frente a posibles eventos sísmicos. Al adoptar un enfoque informado y estratégico basado en la zonificación y los mapas de peligrosidad sísmica, se establecen las bases para la construcción de comunidades más seguras y adaptadas a los desafíos sísmicos, contribuyendo así a la salvaguarda del bienestar público y la preservación de la infraestructura.

2.4. Tipos de cargas sísmica

En el diseño estructural ante la amenaza sísmica, la consideración de diferentes tipos de carga sísmica desempeña un papel esencial para garantizar la resistencia y estabilidad de las edificaciones. Estas cargas, derivadas de la

actividad sísmica, se dividen en tres categorías fundamentales: carga sísmica horizontal, carga sísmica vertical y cargas de inercia y pseudoestáticas. Comprender la interacción y magnitudes de estos diferentes tipos de carga sísmica es crucial para diseñar estructuras capaces de resistir eficazmente las fuerzas dinámicas generadas por los sismos (Sampaio *et al.*, 2021).

Como sostienen Flores *et al.* (2020), la carga sísmica horizontal constituye una de las fuerzas primordiales que actúan durante un evento sísmico, ejerciendo presión lateral sobre las estructuras. Estas fuerzas buscan desplazar las edificaciones en una dirección horizontal, representando un desafío crítico para la estabilidad estructural. La capacidad de las estructuras para resistir y absorber estas cargas laterales se convierte en un factor clave en el diseño sísmico, con sistemas de resistencia lateral y dispositivos de amortiguación que se implementan para mitigar los efectos de estas fuerzas.

Por otro lado, Álvarez-Deulofeu *et al.* (2021) exponen que la carga sísmica vertical implica las fuerzas hacia arriba y hacia abajo generadas por la actividad sísmica. Estas cargas pueden influir en la capacidad de las estructuras para soportar cargas verticales adicionales, y deben ser cuidadosamente consideradas en el diseño para garantizar la estabilidad global. Las fuerzas verticales pueden afectar la resistencia de los cimientos y la capacidad de carga de los elementos estructurales, por lo que su evaluación precisa es esencial para el diseño sísmico efectivo.

Finalmente, las cargas de inercia y pseudoestáticas abordan la masa y aceleración de la estructura durante un sismo. La carga de inercia surge de la resistencia de la estructura al cambio de movimiento, mientras que las cargas pseudoestáticas representan una aproximación simplificada de las fuerzas inerciales. Ambas son esenciales en el cálculo de las fuerzas totales que buscan deformar o desplazar la edificación durante un evento sísmico. Evaluar con precisión estas cargas inerciales es vital para diseñar estructuras capaces de resistir y absorber eficientemente las fuerzas dinámicas desencadenadas por un

sismo, contribuyendo a la seguridad y estabilidad de las edificaciones (Kim y Kim, 2020).

En conclusión, la consideración cuidadosa de los distintos tipos de carga sísmica —horizontal, vertical, y las asociadas a la inercia y pseudoestáticas— se revela como un pilar fundamental en el diseño estructural para resistir los embates de un sismo. Cada tipo de carga sísmica presenta desafíos específicos, y su evaluación precisa es esencial para desarrollar estructuras que no solo puedan soportar las fuerzas laterales y verticales, sino también resistir y absorber las demandas inerciales durante un evento sísmico. La implementación de estrategias de diseño sísmico que aborden de manera integral estas cargas contribuye no solo a la resistencia estructural, sino también a la seguridad y resiliencia de las edificaciones frente a la complejidad dinámica de los sismos. Este enfoque integral asegura que las estructuras estén preparadas para enfrentar los retos sísmicos, promoviendo la seguridad pública y la sostenibilidad a largo plazo de las comunidades afectadas por estos eventos.

2.5. Efectos sísmicos en distintos tipos de estructuras

De acuerdo con Blas *et al.* (2023), los efectos sísmicos representan una consideración crítica en el diseño y la ingeniería de diversas estructuras, ya que los sismos pueden desencadenar fuerzas dinámicas significativas que afectan su comportamiento y estabilidad. Enfrentar estos efectos implica comprender cómo diferentes tipos de estructuras responden a la complejidad de las ondas sísmicas. Desde edificaciones de gran altura hasta puentes y estructuras industriales, cada tipo de construcción presenta desafíos únicos en términos de su respuesta sísmica. Este panorama diverso requiere una evaluación minuciosa de la vulnerabilidad sísmica de cada tipo de estructura, considerando factores como la rigidez, la masa y la flexibilidad para desarrollar estrategias de diseño efectivas que aseguren la resistencia y seguridad de estas construcciones frente a eventos sísmicos. En este escenario, explorar los efectos sísmicos en distin-

tos tipos de estructuras se convierte en un aspecto esencial para avanzar hacia prácticas de ingeniería más resilientes y seguras.

Las edificaciones de concreto armado experimentan una serie de efectos sísmicos que demandan una atención detallada en el diseño estructural. Durante un sismo, estas estructuras pueden verse sometidas a fuerzas horizontales que buscan desplazarlas lateralmente, así como a fuerzas verticales que pueden afectar su estabilidad global. La respuesta sísmica de edificaciones de concreto armado está intrínsecamente ligada a la flexibilidad y resistencia de los elementos estructurales, como vigas y columnas. Además, las conexiones entre estos elementos juegan un papel crucial, pues deben ser capaces de absorber y redistribuir las fuerzas sísmicas de manera eficiente (Pérez, 2020).

Según Bermudo y De la Cruz (2022), los efectos sísmicos en edificaciones de concreto armado pueden resultar en deformaciones laterales, torsiones y cambios en la geometría estructural. La capacidad de resistir y amortiguar estas deformaciones sin comprometer la integridad estructural es esencial. En este caso, las estrategias de diseño sísmico, como la implementación de muros de corte, disipadores de energía y sistemas de aislamiento sísmico, son comunes para mejorar la capacidad de respuesta y reducir los efectos adversos en estas edificaciones. A su vez, la comprensión profunda de la respuesta sísmica de las edificaciones de concreto armado permite a los ingenieros implementar medidas específicas que mejoren la seguridad y la resiliencia de estas estructuras frente a la amenaza de eventos sísmicos.

Las estructuras de acero, debido a sus propiedades mecánicas y resistencia, presentan características específicas en respuesta a los efectos sísmicos. Durante un sismo, estas estructuras pueden experimentar fuerzas horizontales que buscan desplazarse lateralmente, así como deformaciones que derivan de las cargas inerciales generadas por la aceleración sísmica. La flexibilidad inherente del acero permite que estas estructuras absorban y redistribuyan las fuerzas sísmicas, lo que a menudo se traduce en un comportamiento más elástico

y una capacidad de resistencia a deformaciones significativas (Cagua *et al.*, 2021).

No obstante, Hernández (2022) indica que los efectos sísmicos en estructuras de acero pueden desencadenar fenómenos como la flexión lateral y la torsión, que pueden comprometer la estabilidad estructural si no se abordan adecuadamente. Los ingenieros emplean diversas estrategias para mejorar la capacidad de respuesta sísmica de estas estructuras, como la implementación de sistemas de amortiguación, conexiones resistentes y refuerzos estructurales. La consideración cuidadosa de la rigidez y la masa distribuida en la estructura de acero es esencial para optimizar su comportamiento sísmico. En última instancia, la comprensión profunda de los efectos sísmicos en estructuras de acero permite un diseño estructural que no solo resiste las fuerzas sísmicas, sino que también minimiza las deformaciones y asegura la seguridad y estabilidad de estas construcciones frente a eventos sísmicos.

Por otra parte, los puentes y viaductos, al ser estructuras lineales expuestas, experimentan efectos sísmicos distintivos que requieren consideraciones específicas en su diseño y evaluación. Durante un sismo, estas estructuras están sujetas a fuerzas horizontales y verticales que buscan afectar su integridad estructural. Los efectos sísmicos en puentes pueden traducirse en movimientos laterales, flexiones, torsiones y cambios en la geometría, lo que plantea desafíos significativos para su estabilidad y seguridad (Jiménez, 2021).

Como señalan Skokandić *et al.* (2022), la respuesta sísmica de puentes se ve influenciada por factores como la longitud del vano, la rigidez y la masa de la estructura, así como las características del suelo en el que están asentados. Para mitigar los efectos adversos, los ingenieros emplean diversas estrategias de diseño sísmico, que pueden incluir la incorporación de dispositivos de amortiguación, sistemas de aislamiento sísmico y técnicas de refuerzo estructural. Además, las conexiones entre los elementos del puente son cruciales para garantizar una distribución adecuada de las cargas sísmicas y prevenir el colapso.

Asimismo, Hernández (2022) añade que el diseño sísmico cuidadoso y la implementación de medidas específicas permiten que los puentes y viaductos no solo resistan las fuerzas sísmicas, sino que también mantengan su funcionalidad esencial durante y después de un sismo. Esta consideración integral es esencial para garantizar la seguridad de la infraestructura de transporte y minimizar los riesgos asociados a eventos sísmicos en regiones propensas a esta actividad.

La evaluación sísmica de estructuras existentes es un proceso fundamental para comprender y mejorar la capacidad de resistencia sísmica de construcciones ya terminadas. Este procedimiento implica la revisión exhaustiva de la geometría, materiales, sistemas estructurales y conexiones de una edificación en particular, con el objetivo de evaluar su vulnerabilidad ante posibles eventos sísmicos. Para ello, se emplean diversas herramientas, como análisis de elementos finitos, modelado estructural y pruebas *in situ*, cuyo propósito es determinar la capacidad de la estructura para resistir fuerzas sísmicas e identificar posibles áreas de mejora. Con esta información, los ingenieros pueden recomendar estrategias de refuerzo, reparación o incluso rehabilitación estructural para aumentar la capacidad de la edificación para resistir futuros eventos sísmicos, contribuyendo así a la seguridad y resiliencia de las construcciones. Así, la evaluación sísmica de estructuras existentes desempeña un papel crucial en la mitigación de riesgos y en la preservación del patrimonio construido en regiones propensas a la actividad sísmica (Pérez, 2020).

CAPÍTULO III

CONCEPCIONES CENTRALES EN RELACIÓN CON EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL

Las concepciones centrales en relación con el comportamiento estructural abarcan un conjunto fundamental de principios que guían la comprensión y el diseño de las construcciones en la ingeniería civil. En su esencia, el comportamiento estructural se refiere a cómo las edificaciones responden a las cargas y tensiones a las que están sometidas. Este estudio integral abarca varias facetas, comenzando por la tipología de deformaciones en estructuras, que explora las variaciones temporales y permanentes en la forma de una construcción bajo cargas externas (Aguilar *et al.*, 2020).

Al respecto, Maza (2020) sostiene que el análisis de esfuerzos y deformaciones se erige como una herramienta esencial para evaluar las tensiones internas y las respuestas deformacionales de las estructuras, permitiendo a los ingenieros anticipar y abordar posibles desafíos. La interacción suelo-estructura es un aspecto crítico que se ocupa de cómo el suelo circundante afecta y es afectado por la construcción, considerando propiedades geotécnicas y condiciones del sitio.

En este contexto, las herramientas de simulación y modelado estructural, especialmente el uso de *software* de análisis estructural, han revolucionado la forma en que se enfrentan estos desafíos. Estas herramientas avanzadas permiten a los ingenieros crear modelos virtuales detallados, realizar análisis precisos y simular escenarios complejos, brindando una comprensión profunda del

comportamiento estructural. Desde el modelado en elementos finitos hasta la validación experimental, estas herramientas forman la columna vertebral de la ingeniería moderna, ofreciendo una vía para diseñar estructuras seguras y eficientes en un entorno construido cada vez más desafiante (Huerta *et al.*, 2023).

En conjunto, estas concepciones centrales proporcionan el marco conceptual necesario para abordar los aspectos más críticos del comportamiento estructural, asegurando el diseño y la construcción de edificaciones robustas y resilientes.

3.1. Descripción del comportamiento estructural

El comportamiento estructural es un componente crucial en el campo de la ingeniería civil y estructural, dado que proporciona una comprensión detallada de cómo las construcciones interactúan con las cargas y responden a las fuerzas externas. Este análisis se centra en la respuesta de una estructura ante diversas condiciones, como cargas estáticas o dinámicas, incluyendo las generadas por sismos. El comportamiento estructural se describe a través de conceptos como resistencia, rigidez, ductilidad y capacidad de absorción de energía (Maza, 2020).

Autores como Cuyán *et al.* (2021) sostienen que la resistencia estructural, como principio fundamental en ingeniería, constituye la piedra angular de la integridad y seguridad de una construcción. Se refiere a la capacidad inherente de una estructura para soportar cargas externas sin experimentar fallas catastróficas. Este atributo es esencial en la concepción de edificaciones que deben resistir diversas fuerzas, ya sean provocadas por condiciones climáticas, cargas estáticas o dinámicas, como las generadas por sismos. La resistencia estructural se evalúa a través de rigurosos análisis y pruebas que garantizan que la construcción pueda mantener su integridad y funcionalidad bajo diversas condiciones de carga, proporcionando una base sólida para la seguridad y estabilidad a largo plazo de la estructura.

En el diseño estructural, la resistencia no solo se orienta a prevenir colapsos, sino que también busca anticiparse a situaciones extremas, como sismos, donde la capacidad de resistir fuerzas sísmicas se convierte en un aspecto crítico. Las construcciones que exhiben una resistencia estructural adecuada no solo cumplen con los estándares de seguridad, sino que también aseguran la protección de vidas humanas y la preservación de la inversión en infraestructura, consolidando así la robustez y confiabilidad de la edificación frente a las diversas presiones que pueda enfrentar a lo largo de su vida útil (Alva y García, 2020).

Mientras tanto, Condezo y Rodríguez (2023) sostienen que la rigidez de una estructura representa una característica esencial en su comportamiento estructural, denotando su capacidad para mantener su forma original ante cargas aplicadas. En términos simples, la rigidez se traduce en la resistencia de la estructura a deformarse o ceder frente a fuerzas externas. Esta propiedad no solo se relaciona con la capacidad de la construcción para soportar cargas sin sufrir deformaciones excesivas, sino que también influye en la estabilidad y la respuesta dinámica de la estructura. La rigidez estructural se evalúa mediante análisis de deformaciones y estudios de carga que permiten entender cómo la estructura responde a diferentes condiciones, lo que resulta fundamental en el diseño de edificaciones que deben mantener su integridad y forma original durante su vida útil.

En la ingeniería estructural, se busca alcanzar un equilibrio adecuado entre la rigidez y la flexibilidad, dado que una estructura excesivamente rígida puede ser susceptible a tensiones concentradas, mientras que una excesivamente flexible puede experimentar deformaciones excesivas. La rigidez, por tanto, es un elemento clave para garantizar la estabilidad y la funcionalidad a largo plazo de una construcción, contribuyendo a su capacidad para resistir diferentes tipos de cargas y mantener una geometría estructural que mantenga la seguridad y eficiencia de la edificación (Aguiar y Cagua, 2021).

Por otro lado, Anco *et al.* (2021) resaltan que la ductilidad, como propiedad intrínseca de las estructuras, desempeña un papel crucial en la evaluación de su capacidad para afrontar situaciones sísmicas. Se refiere a la capacidad de una construcción para deformarse plásticamente sin comprometer su integridad estructural. Esta característica es particularmente vital durante eventos sísmicos, donde las fuerzas dinámicas pueden inducir movimientos y deformaciones significativas en las estructuras. Una estructura dúctil tiene la capacidad de absorber y redistribuir la energía generada por un sismo, permitiendo que la deformación se disipe gradualmente a lo largo de la construcción, en lugar de concentrarse en puntos específicos.

La evaluación de la ductilidad implica considerar la capacidad de la estructura para deformarse de manera controlada y predecible, evitando el colapso repentino. En el diseño sísmico se busca potenciar la ductilidad mediante el uso de materiales y técnicas que permitan una respuesta plástica, reduciendo así la vulnerabilidad de las edificaciones a eventos sísmicos. La ductilidad, por tanto, se revela como un atributo esencial para promover la seguridad y la capacidad de recuperación de las estructuras en zonas propensas a actividad sísmica, contribuyendo a la resiliencia y longevidad de la infraestructura construida (Sierra *et al.*, 2023).

En el caso de la capacidad de absorción de energía, se determina que es un aspecto crítico en el diseño estructural e influye directamente en la capacidad de una construcción para resistir y mitigar las fuerzas generadas durante eventos extremos. Esta propiedad se refiere a la habilidad de la estructura para disipar la energía cinética asociada con cargas dinámicas, como las generadas por sismos. En situaciones de carga extrema, como un terremoto, la capacidad de absorber y redistribuir eficientemente la energía se traduce en una respuesta estructural más controlada y menos propensa a daños severos (Anco *et al.*, 2021).

En el diseño estructural, se implementan estrategias específicas para mejorar la capacidad de absorción de energía, tales como la inclusión de mate-

riales y sistemas que actúan como disipadores de energía o amortiguadores. Estos componentes absorben y disipan la energía generada durante un evento sísmico, reduciendo así la carga sobre la estructura principal. La capacidad de una construcción para gestionar eficazmente la energía asociada con eventos extremos no solo contribuye a la preservación de la integridad estructural, sino que mejora la seguridad y resiliencia general de la edificación frente a condiciones adversas (Ruiz *et al.*, 2020).

En síntesis, el estudio del comportamiento estructural representa la clave maestra para la concepción de edificaciones resilientes y seguras en el ámbito de la ingeniería civil. La resistencia, rigidez, ductilidad y capacidad de absorción de energía son atributos intrínsecamente entrelazados que definen la respuesta de una estructura ante cargas y condiciones diversas. La comprensión profunda de estos principios no solo asegura la estabilidad y funcionalidad a largo plazo de las construcciones, sino que además es esencial para enfrentar desafíos específicos, como los eventos sísmicos. La búsqueda del equilibrio óptimo entre estos elementos, respaldada por avanzadas técnicas de diseño y evaluación, se erige como la senda hacia la construcción de infraestructuras que no solo perduran, sino que también ofrecen un entorno seguro y resiliente para las comunidades que las ocupan. En última instancia, el comportamiento estructural se erige como la columna vertebral que sustenta la seguridad, estabilidad y durabilidad de las edificaciones que dan forma al entorno construido.

3.2. Tipos de deformaciones en estructuras

Las deformaciones en estructuras pueden manifestarse de diversas maneras, y ofrecen una visión crucial de cómo una construcción responde a las cargas y fuerzas a las que está sometida. Estas deformaciones pueden clasificarse en varios tipos, entre los que destacan las deformaciones elásticas y plásticas (Banescu *et al.*, 2020).

En primer lugar, Garcia *et al.* (2020) indican que las deformaciones elásticas constituyen una fase transitoria en la respuesta de una estructura ante cargas externas, caracterizada por cambios temporales y reversibles en su forma. Cuando una construcción es sometida a cargas, los materiales que la componen experimentan deformaciones elásticas proporcionales a la magnitud de las fuerzas aplicadas. Este comportamiento elástico implica que, al eliminar la carga, la estructura tiene la capacidad de retornar a su forma original sin sufrir deformaciones permanentes. La relación entre el esfuerzo aplicado y la deformación resultante, conocida como módulo de elasticidad, define la elasticidad de los materiales y es crucial en la predicción y análisis de las deformaciones elásticas en una estructura.

La comprensión de las deformaciones elásticas es esencial para los ingenieros estructurales, debido a que permite anticipar y calcular cómo una construcción responderá a diferentes cargas sin experimentar daños permanentes. Este conocimiento desempeña un papel crucial en el diseño de edificaciones que deben soportar cargas variables a lo largo de su vida útil, contribuyendo a la creación de estructuras capaces de mantener su integridad y funcionalidad en condiciones dinámicas cambiantes (Mendecki *et al.*, 2021).

En contraste con las deformaciones elásticas, Maddalozzo y Fischer (2020) mencionan que las deformaciones plásticas representan cambios permanentes en la forma de una estructura, manifestándose cuando se supera el límite elástico de los materiales que la componen. Esta fase de deformación irreversible se caracteriza por una deformación sostenida incluso después de eliminar la carga aplicada, indicando una modificación permanente en la geometría original de la construcción. Las deformaciones plásticas son más propensas a ocurrir en situaciones de cargas extremas, donde las fuerzas aplicadas exceden la capacidad de respuesta elástica del material, llevándolo a su punto de cadencia, y más allá.

En eventos sísmicos, las deformaciones plásticas pueden ser especialmente significativas debido a las fuerzas dinámicas y repentinas involucradas.

Estas deformaciones pueden afectar la integridad estructural y la estabilidad a largo plazo de la construcción. Por lo tanto, los ingenieros estructurales implementan estrategias de diseño sísmico que buscan minimizar las deformaciones plásticas, como el uso de materiales dúctiles y técnicas de refuerzo estructural. La comprensión de las deformaciones plásticas es esencial para evaluar el rendimiento de una estructura bajo cargas excepcionales y para diseñar construcciones que sean capaces de absorber y gestionar eficazmente las fuerzas en situaciones críticas (Raisinghani *et al.*, 2021).

Zhu *et al.* (2023) sostuvieron que la identificación y comprensión de los tipos de deformaciones en estructuras desempeñan un papel fundamental en la evaluación de la integridad estructural y en la formulación de estrategias de diseño efectivas. Al reconocer las deformaciones elásticas y plásticas, los ingenieros pueden anticipar cómo una construcción responderá a cargas variables y extremas. Este conocimiento informa la toma de decisiones para implementar medidas de mitigación que minimicen los efectos de cargas excepcionales, contribuyendo a la seguridad y longevidad de la estructura. La implementación de técnicas de diseño que consideran las deformaciones permite la construcción de edificaciones más resistentes y capaces de adaptarse a condiciones adversas.

Además, el análisis detallado de las deformaciones es particularmente crucial en el diseño sísmico, donde las fuerzas dinámicas pueden inducir movimientos significativos en las estructuras. Comprender cómo las construcciones se deforman bajo cargas sísmicas permite a los ingenieros desarrollar estrategias específicas para mejorar la capacidad de absorción de energía, reducir las deformaciones plásticas y, en última instancia, promover la seguridad y resiliencia de las edificaciones ante eventos sísmicos. La consideración cuidadosa de las deformaciones en el proceso de diseño constituye un enfoque integral para garantizar que las construcciones cumplan con los estándares de seguridad y sean capaces de resistir y recuperarse de condiciones excepcionales (Thiers-Moggia y Málaga-Chuquitaype, 2020).

En conclusión, la comprensión detallada de los tipos de deformaciones en estructuras es esencial para evaluar la integridad y seguridad de las construcciones en diversos escenarios. La distinción entre deformaciones elásticas y plásticas proporciona un marco fundamental para anticipar y gestionar el comportamiento de las edificaciones bajo diferentes cargas. Este conocimiento no solo brinda las estrategias de mitigación para minimizar los efectos de cargas excepcionales, sino que también guía el diseño sísmico, contribuyendo a la creación de estructuras resilientes capaces de enfrentar condiciones adversas. La consideración cuidadosa de las deformaciones en el proceso de diseño estructural representa un elemento esencial para construir infraestructuras duraderas y seguras que puedan adaptarse y resistir a las complejidades dinámicas del entorno construido.

3.3. Análisis de esfuerzos y deformaciones

El análisis de esfuerzos y deformaciones se erige como una disciplina fundamental en la ingeniería estructural, desentrañando los comportamientos y respuestas de las construcciones ante cargas externas (Huo *et al.*, 2023). Este campo implica el examen minucioso de cómo las fuerzas aplicadas afectan los materiales y las estructuras, proporcionando una visión detallada de la distribución de esfuerzos y las deformaciones resultantes. A través de este análisis, los ingenieros pueden anticipar y comprender cómo se van a comportar las construcciones bajo distintas condiciones de carga, desde fuerzas estáticas hasta situaciones dinámicas como eventos sísmicos. El análisis de esfuerzos y deformaciones constituye, por ende, una herramienta esencial para el diseño y la evaluación estructural, permitiendo la toma de decisiones informadas para garantizar la seguridad, integridad y rendimiento óptimo de las infraestructuras construidas.

La división de los métodos de análisis en ingeniería estructural se realiza bajo dos enfoques fundamentales: estáticos y dinámicos, cada uno crucial para

comprender el comportamiento de las estructuras ante diversas condiciones de carga. En el análisis estático, se examinan las fuerzas que actúan sobre una estructura en equilibrio o en reposo. Este método es esencial para evaluar la distribución de esfuerzos y deformaciones bajo cargas constantes, proporcionando una visión detallada de cómo la construcción responde a situaciones estáticas como cargas permanentes o condiciones de servicio regulares. Por otro lado, el análisis dinámico se enfoca en las fuerzas y deformaciones generadas por cargas variables o eventos dinámicos, como sismos o vientos intensos. Este enfoque permite evaluar cómo una estructura se comporta ante situaciones más complejas y dinámicas, considerando la variabilidad de las fuerzas a lo largo del tiempo (Dallaire *et al.*, 2020).

De acuerdo con Saharia *et al.* (2021), ambos métodos —estático y dinámico— son complementarios y se utilizan de manera sinérgica para proporcionar una evaluación completa del rendimiento estructural. El análisis estático es esencial para comprender el comportamiento bajo cargas estables y permanentes, mientras que el análisis dinámico permite anticipar y mitigar los efectos de situaciones más variables y extremas. Esta combinación de métodos garantiza una comprensión integral de cómo las estructuras responderán a diversas condiciones, permitiendo un diseño estructural robusto y seguro.

Ahora bien, la distribución de esfuerzos en elementos estructurales es un aspecto crucial del análisis en ingeniería, pues proporciona una visión detallada de cómo las fuerzas internas se distribuyen a lo largo de una estructura. En elementos como vigas, columnas y losas, las cargas aplicadas generan esfuerzos internos que se transmiten a lo largo de la longitud y se distribuyen de manera específica. En vigas, por ejemplo, las fuerzas generan momentos flectores y fuerzas cortantes que varían a lo largo de la viga, creando una distribución única de esfuerzos en la sección transversal. En columnas, la carga axial puede resultar en esfuerzos de compresión distribuidos de manera no uniforme a lo largo de la altura (Jishnu y Ayothiraman, 2020).

Según Dallaire *et al.* (2020), la comprensión de la distribución de esfuerzos en elementos estructurales es esencial para garantizar que cada parte de la estructura resista eficientemente las cargas a las que está sometida. Esto implica evaluar cómo se redistribuyen las fuerzas a medida que atraviesan los elementos, teniendo en cuenta la geometría, los materiales y las condiciones de apoyo. Un análisis detallado de la distribución de esfuerzos es fundamental en el diseño estructural, ya que permite dimensionar adecuadamente los elementos para resistir las cargas aplicadas, garantizando la seguridad y la integridad de la estructura en su conjunto.

A su vez, la influencia de las cargas en la deformación de las estructuras es un aspecto crítico en el análisis de ingeniería, puesto que proporciona perspectivas valiosas sobre cómo las construcciones responden a fuerzas externas. Cuando se aplican cargas a una estructura, esta experimenta deformaciones que pueden manifestarse en diferentes formas, como elongación, compresión, flexión o torsión, dependiendo de la naturaleza de la carga y la geometría de los elementos. Las cargas pueden generar tensiones y deformaciones en los materiales estructurales, y entender cómo estas deformaciones se distribuyen a lo largo de la construcción es esencial para prever el rendimiento estructural (Huo *et al.*, 2023).

Para Fusco *et al.* (2022), en el análisis de la influencia de las cargas en la deformación, se examina cómo los materiales de la estructura reaccionan ante las fuerzas aplicadas. Factores como la rigidez de los materiales, la geometría de los elementos y las condiciones de apoyo influyen en la magnitud y la dirección de las deformaciones. Este conocimiento es crucial en el diseño estructural, pues permite a los ingenieros anticipar y gestionar las deformaciones para garantizar que la estructura cumpla con los requisitos de servicio, evitando deformaciones excesivas que puedan comprometer la funcionalidad o seguridad de la construcción.

En resumen, el análisis de esfuerzos y deformaciones constituye el núcleo esencial de la ingeniería estructural, permitiendo una comprensión profunda de cómo las construcciones responden a cargas y fuerzas. Ya sea a través de métodos estáticos o dinámicos, este análisis proporciona información valiosa sobre la distribución de esfuerzos y las deformaciones resultantes, permitiendo a los ingenieros tomar decisiones informadas en el diseño y evaluación estructural. La consideración meticulosa de la influencia de las cargas en la deformación es crucial para garantizar la seguridad, eficiencia y durabilidad de las estructuras en diversas condiciones de carga. En última instancia, el análisis de esfuerzos y deformaciones no solo fundamenta la ingeniería estructural, sino que también allana el camino para construcciones más resistentes, capaces de resistir desafíos y adaptarse a las complejidades cambiantes del entorno construido.

3.4. Interacción suelo-estructura

La interacción suelo-estructura es una rama perteneciente a la ingeniería geotécnica sísmica, que es una subespecialidad de la ingeniería geotécnica, cuyo objetivo es diseñar y construir estructuras que tengan la capacidad de resistir a terremotos o acciones sísmicas, considerando las características dinámicas del suelo donde la estructura fue establecida. Para comprender la interacción suelo-estructura, es necesario entender cómo interactúa la edificación con el terreno, y viceversa, además de analizar las condiciones de movimientos, el tipo de suelo y la posibilidad de desplazamientos (Villarreal y Aguila, 2021).

La interacción suelo-estructura constituye un elemento esencial en la ingeniería geotécnica y estructural, ya que delinea la compleja relación entre el suelo sobre el cual se erige una construcción y la estructura misma. Este fenómeno implica un entendimiento detallado de cómo las propiedades geotécnicas del suelo afectan el comportamiento de la estructura y, a su vez, cómo las cargas y deformaciones inducidas por la construcción influyen en el suelo circundante. La interacción suelo-estructura es de suma importancia para garantizar

un diseño robusto y seguro, al considerar factores como la capacidad portante del suelo, la estabilidad de cimentaciones y las posibles deformaciones que puedan surgir. Este concepto sienta las bases para abordar desafíos geotécnicos y estructurales, asegurando una integración armoniosa entre la construcción y su entorno geológico (Van Nguyen *et al.*, 2020).

Por otra parte, Miao *et al.* (2020) sostienen que los fundamentos de la mecánica de suelos representan la base esencial para comprender el comportamiento geotécnico de los suelos bajo las fuerzas aplicadas. La mecánica de suelos se sumerge en el estudio de las propiedades físicas y mecánicas de estos materiales terrosos, evaluando cómo responden a las cargas y tensiones. Uno de los aspectos fundamentales es la clasificación de suelos, que categoriza los diferentes tipos según su granulometría y características geotécnicas. Además, la mecánica de suelos analiza fenómenos como la compactación, consolidación y resistencia al corte, arrojando luz sobre la capacidad portante del suelo y su comportamiento frente a cargas externas.

Para Van Nguyen *et al.* (2020), los ingenieros geotécnicos utilizan los principios de la mecánica de suelos para diseñar cimentaciones adecuadas, evaluar la estabilidad de taludes y abordar problemas relacionados con asentamientos. La comprensión de la distribución de presiones en el suelo, la capacidad de carga admisible y la permeabilidad son elementos clave en la toma de decisiones para asegurar estructuras sólidas y estables. En última instancia, los fundamentos de la mecánica de suelos son esenciales para el diseño seguro y eficiente de proyectos de ingeniería civil, lo que garantiza que las interacciones suelo-estructura se gestionen de manera óptima.

Asimismo, la interacción suelo-estructura genera una serie de efectos cruciales que influyen en el comportamiento y la estabilidad de una construcción. Uno de los aspectos fundamentales es la transferencia de cargas entre la estructura y el suelo circundante. Las cargas aplicadas a una construcción se transmiten al suelo a través de las cimentaciones, y la respuesta del suelo a

estas cargas afecta directamente la deformación y estabilidad de la estructura. Además, la interacción suelo-estructura puede provocar asentamientos diferenciales, donde distintas partes de la construcción experimentan deformaciones desiguales debido a variaciones en las características geotécnicas del suelo. Este fenómeno puede afectar la integridad estructural y la funcionalidad de la construcción, destacando la importancia de comprender y mitigar los efectos de la interacción suelo-estructura (Miao *et al.*, 2020).

Para considerar la interacción suelo-estructura en el diseño de cimentaciones, se han desarrollado diversos enfoques, entre los que destacan los siguientes (Guanchez, 2022):

- Modelos simplificados (Vlasov de 2 parámetros, Kerr de 3 parámetros, Winkler de un parámetro): Se plantea por medio de ecuaciones diferenciales, las cuales vinculan momentos o deflexiones con parámetros del suelo.
- Modelos del semiespacio elástico (iterativos, solución directa al vincular las ecuaciones matriciales en una sola): La superficie de contacto cimentación-suelo es discretizada y se procede con el establecimiento de ecuaciones con el fin de asentarla bajo cualquier área. Se emplean métodos matriciales.
- Modelos con base en elementos finitos: Se emplean computadores con amplia capacidad numérica y memoria para solucionar un problema. Se siguen los siguientes pasos:
 - Discretización geométrica de la estructura y el suelo de soporte en puntos nodales de conexión y elementos finitos.
 - Formación de la matriz global de rigidez.
 - Solución del sistema de ecuaciones para la obtención de desplazamientos nodales.
 - Cálculo de deformaciones y esfuerzos necesarios para análisis y diseño.

En conclusión, la interacción suelo-estructura representa un aspecto fundamental en el diseño y la construcción de edificaciones, donde la comprensión detallada de cómo el suelo responde a las cargas de la estructura, y viceversa, es esencial. Este fenómeno complejo influye en la estabilidad, deformación y capacidad de carga de la construcción, lo que a su vez afecta la seguridad y durabilidad a lo largo del tiempo. Un enfoque integral que aborde las propiedades geotécnicas del suelo, las condiciones del sitio y los fenómenos sísmicos garantiza un diseño de cimentación preciso y medidas de mitigación adecuadas. La gestión cuidadosa de la interacción suelo-estructura no solo es esencial para la integridad de la construcción, sino que también contribuye a la creación de edificaciones resistentes y sostenibles que puedan adaptarse a las complejidades del entorno geotécnico.

3.5. Herramientas de simulación y modelado estructural: uso de software de análisis estructural

Las herramientas de simulación y modelado estructural representan pilares fundamentales en la ingeniería moderna, ya que ofrecen un enfoque innovador y preciso para entender el comportamiento de las estructuras bajo diversas condiciones. Estas herramientas, respaldadas por avances tecnológicos, permiten a los ingenieros crear representaciones virtuales detalladas de construcciones, analizar sus respuestas a cargas y tensiones, y simular escenarios complejos en entornos controlados. Este enfoque avanzado no solo agiliza el proceso de diseño, sino que también proporciona *insights* valiosos para optimizar la eficiencia, seguridad y rendimiento de las estructuras. La capacidad de simular y modelar estructuras en entornos virtuales ha transformado la manera en que se abordan los desafíos de la ingeniería civil, permitiendo un diseño más preciso y adaptativo en un mundo en constante evolución (Weli y Vigh, 2023).

En este contexto, Hughes *et al.* (2022) afirman que el uso de *software* de análisis estructural ha revolucionado la forma en que los ingenieros abordan el diseño y la evaluación de construcciones. Estas herramientas proporcionan

capacidades avanzadas para modelar virtualmente estructuras complejas, permitiendo a los profesionales explorar y entender su comportamiento ante diversas cargas y condiciones. Los ingenieros pueden realizar análisis detallados de tensiones, deformaciones y factores de seguridad, identificando posibles puntos críticos y optimizando el diseño para garantizar la seguridad y eficiencia estructural.

Weli y Vigh (2023) puntualizan que el *software* de análisis estructural facilita la realización de simulaciones dinámicas, incluyendo la respuesta sísmica, lo cual permite a los ingenieros evaluar el rendimiento de las estructuras en situaciones extremas. La capacidad de realizar iteraciones rápidas y ajustes precisos en el modelo virtual contribuye significativamente al proceso de diseño, permitiendo una toma de decisiones informada y eficiente. En última instancia, el uso de estas herramientas tecnológicas potentes impulsa la ingeniería estructural hacia nuevas fronteras, mejorando la precisión y la eficacia en la creación de estructuras seguras y resilientes.

A su vez, el modelado avanzado en elementos finitos se ha convertido en una herramienta indispensable en la ingeniería estructural moderna, pues permite una representación detallada y precisa del comportamiento de las estructuras. Esta técnica utiliza una discretización del objeto en pequeños elementos geométricos, lo cual permite la simulación de fenómenos complejos mediante ecuaciones matemáticas. Los ingenieros pueden emplear esta metodología para analizar con gran detalle las tensiones, deformaciones y comportamientos no lineales de materiales y estructuras bajo diversas condiciones de carga. Además, el modelado en elementos finitos es esencial para abordar problemas estructurales avanzados, como la interacción suelo-estructura, la simulación de eventos sísmicos y el análisis de vibraciones, brindando una visión profunda que facilita la toma de decisiones informada en el diseño y la optimización de estructuras. La aplicación de esta técnica representa un salto significativo en la capacidad de comprender y mejorar el rendimiento de las construcciones en un entorno cada vez más complejo y exigente (Hughes *et al.*, 2022).

Por consiguiente, la importancia de la validación experimental en el campo de la ingeniería estructural radica en su capacidad para confirmar y mejorar la precisión de los modelos teóricos y numéricos. Aunque el modelado por elementos finitos y las herramientas de simulación ofrecen valiosas predicciones, la validación experimental proporciona una oportunidad crucial para comparar estas predicciones con datos del mundo real. A su vez, los ensayos experimentales, mediante pruebas de carga, vibraciones u otros métodos, permiten verificar la respuesta estructural ante condiciones específicas y validar la exactitud de los modelos. Este proceso de validación no solo aumenta la confianza en los resultados analíticos, sino que identifica posibles desviaciones y ajustes necesarios en los modelos, mejorando así la fiabilidad y aplicabilidad de las predicciones teóricas. En última instancia, la validación experimental juega un papel esencial para garantizar que los modelos y simulaciones reflejen de manera precisa el comportamiento estructural, contribuyendo a la toma de decisiones informada en el diseño y la evaluación de construcciones.

CAPÍTULO IV

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MURO DE SUELO REFORZADO EN INFLUENCIA DE LA CARGA SÍSMICA

Con el transcurso del tiempo, han ido surgiendo nuevas formas de mejorar las construcciones para garantizar su duración y resistencia ante eventos antropogénicos o naturales. Una de estas mejoras es la creación de los muros de suelo reforzado, los cuales son una alternativa de construcción implementada para hacer obtener más beneficios durante la construcción (Geomatrix, 2022).

En un sentido estricto, un muro de suelo reforzado es una estructura de suelo compactado, que está constituida por elementos de refuerzo que se colocan según las necesidades y trabajan a tensión para disminuir las deformaciones del muro e incrementar la resistencia del suelo. A este método también se le conoce como refuerzo de suelo, y tiene una gran importancia en el sector de construcción porque mejora la transferencia de cargas de los refuerzos en todo el suelo compactado. El muro de suelo reforzado está constituido por dos componentes principales: los refuerzos y el suelo compactado, los cuales son inextensible o extensible, y cada uno de estos tiene una misión determinante en la estructura (Mendoza e Yncio, 2018).

El muro de suelo reforzado ha ganado importancia en condiciones sísmicas, principalmente en aquellos lugares donde los sismos suelen ser frecuentes. Para esto, antes de la instalación del muro de suelo reforzado, se considera el efecto que puedan tener los sismos en la estructura y los daños que puedan ocasionar, a fin de añadir los materiales necesarios que refuercen la estructura y

garanticen la estabilidad sísmica (Gupta *et al.*, 2021). Además de la resistencia que proporciona ante eventos sísmicos, también es utilizado por su bajo costo, apariencia estética, mayor ductilidad y flexibilidad, y por su construcción fácil y rápida, lo que ayuda a que los proyectos de construcción civil del sector público y privado sean más eficaces, y tengan un mayor rendimiento y estabilidad ante cargas sísmicas (Xu *et al.*, 2020).

En este aspecto, los muros de suelo reforzado tienen una gran importancia al resistir o reducir las cargas sísmicas y, por tanto, las consecuencias que estas puedan ocasionar, por ejemplo, los derrumbes parciales o totales de las construcciones, la aparición de grietas, la modificación de la forma y las dimensiones de la edificación, entre otros.

Las construcciones se encuentran expuestas a diversos riesgos de carácter sísmico que las hacen vulnerables ante estos eventos. Algunas de las causas que ocasionan que la estructura se vea afectada son su rigidez y estructura, las cuales no son adecuadas debido a la falta de conocimiento de los índices de vulnerabilidad y la definición de planes de contingencia que garanticen la seguridad de la construcción y sus habitantes.

Así también, dado que cada estructura tiene un periodo natural de vida, es necesario reforzarla y realizar el mantenimiento respectivo a fin de que los movimientos sísmicos no repercutan significativamente en la edificación y se garantice una aceleración variable de las ondas, es decir, que estas sean transmitidas a toda la cimentación de la estructura para evitar daños. El diseño de una buena estructura, el uso de materiales adecuados y la implementación del muro de suelo reforzado dan como resultado que la construcción se adopte a la frecuencia de vibración, es decir, que el fenómeno de resonancia de la carga sísmica no genere un desplazamiento exagerado de la edificación, sino que ayude a liberar de mejor forma la energía para evitar un evento destructivo (Ruiz-Jiménez *et al.*, 2020).

Metodología

En la presente investigación se aplica una metodología cualitativa y se realiza una revisión sistemática de la literatura; es decir, se hace una recopilación de la evidencia, la cual se organiza, evalúa y analiza de manera crítica en torno a un determinado tema de estudio (Torres-Rosas, 2022). Dicha revisión sistemática se efectúa tomando en cuenta los principios metodológicos y considerando el tema base.

La revisión sistemática inicia con la formulación del problema de investigación, seguido de la investigación e identificación de las fuentes a las cuales se le aplica una serie de criterios para obtener resultados y conclusiones (Jihuallanca *et al.*, 2023). En este aspecto, se procede con la pregunta de investigación, la cual es realizada basándose en el objetivo del estudio, que es determinar la incidencia de las cargas sísmicas en el muro de suelo reforzado. Para esto, se realiza una revisión sistemática de investigación cuyo periodo fluctúa entre el 2019 y el 2023. Considerando lo expuesto, la pregunta de investigación propuesta es la siguiente: ¿cuál es la incidencia de las cargas sísmicas en el muro de suelo reforzado?

Respecto a la revisión sistemática, debe indicarse que este es un paso fundamental porque permite obtener información confiable sobre el tema que se está abordando (Sailema *et al.*, 2022), para responder la pregunta de investigación planteada. Cabe precisar que la búsqueda de las investigaciones fue realizada utilizando palabras clave (carga sísmica y muro de suelo reforzado) y operadores booleanos (AND, OR) en las bases de datos académicas y científicas Google Académico, SciELO y Dialnet.

Para cumplir el objetivo propuesto, la revisión de los artículos fue realizada considerando los criterios establecidos en la Tabla 1.

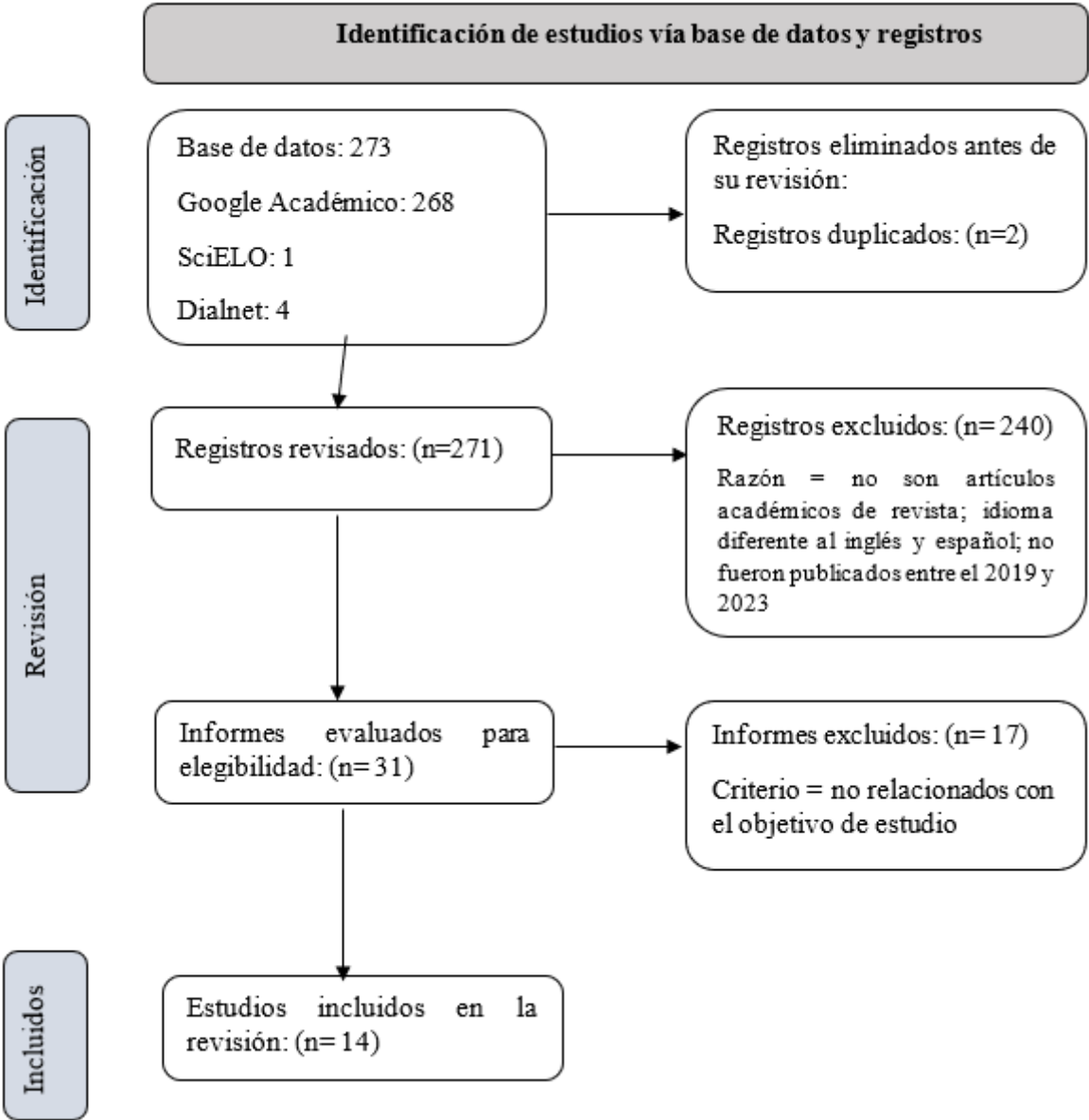
Tabla 1: *Criterios de búsqueda*

Criterios de inclusión	• Artículos publicados desde el año 2019 hasta el 2023 • Documentos que estén en idioma inglés o español • Artículos académicos de revista
Criterios de exclusión	• Artículos no publicados desde el año 2019 hasta el 2023 • Documentos que no estén en idioma inglés o español • Documentos como tesis de titulación o posgrado, monografías y libros

Nota. Elaboración propia

La aplicación de los criterios detallados en la tabla anterior y la exploración de las investigaciones en las bases de datos respectivas se presenta en el método PRISMA, el cual se observa en la Figura 3. Posteriormente, considerando los criterios, se exploraron los estudios en las respectivas bases de datos, lo cual se presenta en el método PRISMA, el cual es aplicado para llevar a cabo revisiones sistemáticas de disciplinas diferentes de manera estructurada y responder con facilidad a las preguntas de investigación formuladas (Nuñez *et al.*, 2024). El método PRISMA del presente estudio se observa en la Figura 3.

Figura 3: Diagrama PRISMA



Nota. Elaboración propia

En la primera fase se revisaron los títulos de las investigaciones —utilizando las palabras clave— y se compararon para identificar si algunos de estos se repetían en los tres buscadores académicos usados. En la segunda etapa, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión a los estudios restantes detallados en la Tabla 1. En la tercera y última fase, se descartaron los artículos de revistas que no responden al objetivo de la investigación, a fin de realizar un análisis de calidad y obtener resultados sólidos y fundamentados que respondan a la interrogante de la presente investigación.

Resultados

Después de haber revisado investigaciones en las bases de datos utilizadas (Google Académico, SciELO y Dialnet), se obtuvieron un total de 14 artículos que cumplen con los criterios de inclusión y responden a la pregunta y objetivo de investigación. Dichos artículos se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: *Resultados cualitativos*

Autor(es)	Año	Título	Metodología	Hallazgos
Fang <i>et al.</i>	2023	Centrifuge modeling of landslides and landslide hazard mitigation: A review.	Cualitativa	Las cargas sísmicas pueden ocasionar deslizamientos, deformaciones, fallas, destrucción de edificios y viviendas, interrupción en el transporte y servicios públicos, y reducir la seguridad del área. Para evitarlo, se deben aumentar las fuerzas de resistencia y la estabilidad de la pendiente, además de probar diferentes métodos que permitan que la construcción resista el movimiento telúrico.
Acuña <i>et al.</i>	2023	Interacción suelo estructura: una revisión del estado del arte	Cualitativa	La incidencia de las cargas sísmicas en los muros de suelo reforzado depende de la estructura, las propiedades del suelo y el comportamiento dinámico. Dependiendo de la escala del movimiento, puede ocasionar el desprendimiento de la estructura.
Agbo <i>et al.</i>	2023	A Systematic Literature Review on Permanent Ground Deformation Patterns Imposed on Buried Steel Pipelines	Experimental, numérica, analítica y probabilística	La deformación transitoria de los suelos es la consecuencia principal de las ondas ocasionadas por las cargas sísmicas y representan una amenaza no solo a la estructura, sino también a las tuberías que puedan haber colocado debajo. Así también, las cargas sísmicas ocasionan fallas superficiales, hundimientos, deslizamientos de tierra y licuefacción del suelo.

Comportamiento Estructural del Muro de Suelo Reforzado en Influencia de La Carga Sísmica

Castellano y Rodríguez	2022	Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento	Cualitativa	Las cargas sísmicas generan pocas consecuencias en los muros de suelo reforzado, dado que estos reducen la intensidad y distribuyen uniformemente las ondas del sismo. Cabe precisar que para garantizar un menor efecto de las cargas sísmicas, se requiere usar técnicas y materiales que incrementen la resistencia de la estructura.
Martínez-Martínez <i>et al.</i>	2022	Amortiguadores de masa sintonizada: una revisión general	Cuantitativo	Las cargas generadas por los eventos sísmicos pueden ocasionar fallas en las estructuras y su posterior derrumbe, lo que conlleva a pérdidas económicas y humanas. Para evitar este tipo de situaciones, se han establecido nuevas metodologías y técnicas, como la implementación de muros de suelo reforzado, con el fin de afrontar las cargas sísmicas, y brindar mayor seguridad y confianza en las obras civiles.
Briceño <i>et al.</i>	2022	Evaluación de la estabilidad en muros utilizando modelos numéricos	Experimental	Los muros tienen como finalidad resistir las presiones ocasionadas por el material retenido detrás de ellos. Las cargas sísmicas no inciden significativamente si se consideran las condiciones de contorno, la disipación o el amortiguamiento de la energía sísmica en la construcción. Es decir, la presencia del sismo disminuye con un análisis correcto de los casos de sismo en el área.
Braña <i>et al.</i>	2022	Influencia de la altura en la consideración de la interacción dinámica suelo-estructura en edificaciones con tipología mixta ubicadas en zonas de alto peligro sísmico	Cuantitativo	La incidencia de las cargas sísmicas en las estructuras puede variar dependiendo de la interacción dinámica suelo-estructura, dado que puede aumentar el periodo de vibración de las ondas sísmicas, reducir o incrementar el amortiguamiento, y modificar la ductilidad de la estructura.

Comportamiento Estructural del Muro de Suelo Reforzado en Influencia de La Carga Sísmica

Donini y Orler	2021	Una revisión sobre las juntas de dilatación en edificios de hormigón armado	Comparativo	Las cargas sísmicas deforman la estructura, favorecen la aparición de fisuras y fallas, además de generar problemas estéticos y filtraciones. Para evitar estos inconvenientes, se desarrollan metodologías de modelación diferentes a las tradicionales, con el fin de obtener una estructura que soporte grandes cargas y se distribuyan las cargas de eventos sísmicos correctamente.
Cai <i>et al.</i>	2021	A Review of the Methods Calculating the Horizontal Displacement for Modular Reinforced Soil Retaining Walls	Cuantitativo	Las cargas sísmicas deforman y alteran la función estructural, ocasionando que los muros de suelo reforzado se hundan gravemente y se derrumben. La razón principal de estas consecuencias se debe, en muchas ocasiones, a la intensidad de la carga sísmica y a un inadecuado proceso de diseño.
Arqueviña y Romero	2021	Estudio y evaluación comparativa entre suelos reforzados con geomalla y muros de concreto armado para la estabilización de taludes de carreteras	Comparativo	Las cargas sísmicas no tienen una fuerte incidencia en los suelos reforzados si las estructuras son construidas equilibrando las fuerzas y considerando la aceleración que puedan originarse por sismos en el área. Sin embargo, cuando los muros de suelo reforzado son construidos con geomallas, puede reducirse sustancialmente su resistencia a la tensión, y disminuir el tiempo de vida y seguridad de la obra.
Benjumea <i>et al.</i>	2021	Desempeño sísmico y cantidades de obra de edificaciones aporricadas de concreto reforzado diseñadas para diferentes capacidades de disipación de energía	Experimental	Las cargas sísmicas pueden suponer una amenaza a la construcción si la estructura no tiene la cantidad correcta de ductilidad que le permita responder adecuadamente a las ondas sísmicas. En caso de tener un diseño realizado considerando los sismos y materiales adecuados, las variaciones por sismos pueden ser nulas o despreciables.

Comportamiento Estructural del Muro de Suelo Reforzado en Influencia de La Carga Sísmica

Xu <i>et al.</i>	2020	Study on seismic stability and performance of reinforced soil walls using shaking table tests	Cualitativa	Las cargas sísmicas no tienen una gran incidencia sobre los muros de suelo reforzado debido a su estabilidad, aunque también depende del nivel de carga sísmica. En caso de que la carga sísmica tenga una gran aceleración e intensidad en el muro de suelo reforzado, puede ocasionar un deslizamiento de la base, abombamiento del revestimiento y deformaciones en la estructura.
Medina y Galarza	2020	Análisis sísmico comparativo de una estructura asimétrica torsionalmente flexible aplicando NSP, MPA, NLRHA	Experimental	Las cargas sísmicas causan desplazamientos, los cuales dependen de la vibración de las ondas sísmicas. Es preciso destacar que el desplazamiento depende de la cantidad y calidad de recursos usados y el procedimiento utilizado para la construcción.
Sánchez <i>et al.</i>	2019	Characterization of pathologies in housing structures. A case study in the city of Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico	Cuantitativo	Las cargas sísmicas inciden significativamente en las estructuras cuando estas se encuentran en zonas de alta sismicidad, cuando el proceso constructivo no ha sido el correcto y la calidad de los materiales usados es bajo. Esto ocasiona que las ondas sísmicas se intensifiquen y generen mayores daños, principalmente si la construcción se encuentra en zonas con alto nivel de humedad.

Nota. Elaboración propia

La tabla anterior permite conocer los resultados relacionados con las incidencias de las cargas sísmicas en los muros de suelo reforzado. A partir de estos estudios, se podrá realizar la discusión y examinar el problema con base científica.

Discusión

De acuerdo con Fang *et al.* (2023), las cargas sísmicas tienen una gran incidencia en los muros de suelo reforzado porque pueden destruir los edificios, causar deformaciones, fallas, deslizamientos, reducir la seguridad del área e interrumpir el servicio de transporte. Martinez-Martinez *et al.* (2022) indican que las cargas sísmicas ocasionan fallas en las estructuras y derrumbes, además de generar pérdidas humanas y económicas. Asimismo, Acuña *et al.* (2023) y Agbo *et al.* (2023) señalan que las cargas sísmicas inciden en los muros de suelo reforzado al ocasionar su desprendimiento y deformación transitoria del suelo, lo cual representa una amenaza a todos aquellos elementos que lo rodean, como las tuberías.

Adicionalmente, Agbo *et al.* (2023) manifiesta que las cargas sísmicas generan hundimientos, licuefacción del suelo y deslizamientos de tierra. Medina y Galarza (2020), por otro lado, sostienen que la principal incidencia de las cargas sísmicas es el desplazamiento, lo que depende de los materiales usados en la construcción y de la intensidad del sismo.

Donini y Orler (2021) indican que las cargas sísmicas inciden principalmente en la estructura de los muros de suelo reforzado, además de causar filtraciones y problemas estéticos. Para esto sugieren desarrollar metodologías que permitan construir estructuras capaces de soportar grandes cargas y movimientos de eventos sísmicos. A su vez, Cai *et al.* (2021) señalan que las cargas sísmicas inciden en la estructura de los muros de suelo reforzado al deformarla y ocasionar su hundimiento y derrumbamiento, lo cual suele ser producto de un proceso de diseño no apto para resistir la intensidad de la carga sísmica.

Benjumea *et al.* (2021) sostienen que la incidencia de las cargas sísmicas en los suelos reforzados depende de si estos poseen la cantidad correcta de ductilidad, ya que si esta no es adecuada, las ondas pueden ser nulas, o viceversa.

Sánchez *et al.* (2019) afirman que las cargas sísmicas tienen una incidencia significativa en la estructura de los suelos reforzados, sobre todo si se encuentran en zonas de alta sismicidad. Braña *et al.* (2022), por su parte, indican que la incidencia de las cargas sísmicas en los suelos reforzados depende de la interacción dinámica suelo-estructura; la cual puede incrementar o reducir el amortiguamiento y la vibración de las ondas sísmicas.

Para Castellano y Rodríguez (2022), la incidencia de las cargas sísmicas no es significativa en los muros de suelos reforzados porque estos disminuyen la intensidad del sismo y distribuyen de manera uniforme las ondas, aunque para esto se requiere haber aplicado técnicas correctas y materiales de calidad. Briceño *et al.* (2022) también señalan que dichas cargas no tienen una fuerte incidencia en las estructuras si la construcción fue realizada considerando la energía sísmica del lugar.

Arqueviña y Romero (2021) y Xu *et al.* (2020) sostienen la misma idea al indicar que las cargas sísmicas no inciden significativamente en los muros de suelo reforzado, puesto que estos han sido elaborados considerando los niveles de carga sísmica que pueden ocurrir en el área y equilibrando las fuerzas. No obstante, también afirman que, si no se consideran estos aspectos, se puede producir el deslizamiento de la base, reducir la resistencia de la estructura y disminuir el tiempo de vida del suelo reforzado.

Conclusiones

Las cargas sísmicas en los muros de suelo reforzados tienen una incidencia significativa al causar daños en la estructura, como su deslizamiento, derrumbamiento, fisuras, generación de filtraciones y problemas estéticos; así también, afectan en los costos al conllevar a pérdidas económicas y, en ciertas

ocasiones, a pérdidas humanas. Al respecto, debe indicarse que la incidencia de las cargas sísmicas depende en gran medida de cómo ha sido construido el suelo reforzado; es decir, si se han utilizado materiales de buena calidad, si se ha hecho un diseño apto para distribuir uniformemente las ondas del sismo y si se han considerado las medidas de seguridad necesarias para colocar otras estructuras alrededor. En este aspecto, las cargas sísmicas podrán ser amortiguadas, reducidas y disipadas para que la incidencia no sea significativa y no haya daños mayores en la estructura.

CAPÍTULO V

RELEVANCIA DEL REFORZAMIENTO DEL MURO DE SUELO EN CENTROS COMERCIALES ANTE UNA CARGA SÍSMICA

La relevancia del reforzamiento del muro de suelo en centros comerciales ante una carga sísmica se erige como un aspecto esencial en la ingeniería estructural y geotécnica, especialmente cuando se pondera la importancia de la seguridad sísmica en estructuras comerciales. Los centros comerciales, al ser puntos neurálgicos de actividad económica y social, deben abordar de manera prioritaria la resistencia y estabilidad ante eventos sísmicos para salvaguardar la seguridad de los ocupantes y proteger la inversión arquitectónica y comercial (Trushko *et al.*, 2024).

La identificación de vulnerabilidades estructurales en centros de comercio agrega una capa de urgencia a esta consideración. La presencia de sistemas estructurales inadecuados, la falta de elementos de refuerzo esenciales y la ausencia de técnicas de aislamiento sísmico pueden exponer estos espacios a riesgos significativos durante un sismo (Xu *et al.*, 2020).

En conclusión, la implementación de estrategias de reforzamiento del muro de suelo en centros comerciales representa un compromiso fundamental con la seguridad sísmica, la resiliencia estructural y la protección de las vidas y propiedades en estos espacios comerciales vitales. Al abordar las vulnerabilidades estructurales específicas y considerar las complejidades propias de los centros comerciales, se establece un estándar elevado para la ingeniería geotécnica y la planificación estructural. Este enfoque proactivo responde a las demandas presentes de seguridad, al tiempo que sienta las bases para un entor-

no construido más resistente y sostenible frente a futuros eventos sísmicos. En última instancia, el reforzamiento del muro de suelo en centros comerciales no solo fortalece estructuras físicas, sino que construye la confianza y la seguridad en la comunidad, demostrando el compromiso continuo con la seguridad y el bienestar en el tejido urbano y comercial.

5.1. Importancia de la seguridad sísmica en estructuras comerciales

Según Ge *et al.* (2022), la importancia de la seguridad sísmica en la ingeniería civil resalta la necesidad crítica de diseñar estructuras capaces de resistir y mitigar los efectos devastadores de los terremotos. Los eventos sísmicos representan una amenaza significativa para comunidades en todo el mundo, con el potencial de causar daños estructurales, pérdidas humanas y desplazamientos masivos. En este contexto, la seguridad sísmica no solo se traduce en la capacidad de las edificaciones para mantener su integridad estructural durante un terremoto, sino también en la protección de vidas humanas y la preservación de la infraestructura esencial.

El diseño sísmico considera factores geotécnicos, geológicos y estructurales para anticipar y gestionar las fuerzas dinámicas generadas por un sismo. Además, la implementación de códigos y normativas específicas busca garantizar que las construcciones se edifiquen con estándares que minimicen el riesgo sísmico. Así, la seguridad sísmica no solo se centra en la resistencia estructural, sino también en la capacidad de recuperación de las comunidades después de un terremoto, promoviendo la resiliencia y la sostenibilidad a largo plazo. En última instancia, la atención dedicada a la seguridad sísmica es esencial para salvaguardar la vida humana y preservar el tejido urbano en regiones propensas a la actividad sísmica (Trushko *et al.*, 2024).

En el contexto de los centros comerciales, Altindal *et al.* (2021) resaltan la necesidad de garantizar la protección tanto de los ocupantes como de la infraestructura en caso de un terremoto. Los centros comerciales, al ser lugares

de gran afluencia y concentración de personas, deben ser diseñados y construidos con criterios sísmicos rigurosos para minimizar el riesgo de lesiones y daños materiales durante un evento sísmico.

La seguridad sísmica en centros comerciales requiere una evaluación detallada de diversos factores para garantizar una respuesta efectiva ante posibles eventos sísmicos. La consideración de la ubicación geográfica es esencial, ya que las regiones sísmicamente activas presentan desafíos únicos que deben abordarse en el diseño estructural. La intensidad sísmica esperada se evalúa mediante estudios sísmicos y modelado geotécnico, permitiendo la implementación de medidas proporcionadas a la amenaza potencial. Además, las características geotécnicas del suelo desempeñan un papel crucial, pues la respuesta sísmica puede variar significativamente según la composición y la densidad del suelo (Zhang *et al.*, 2022).

La implementación de medidas sísmicas efectivas implica la selección cuidadosa de sistemas estructurales que puedan resistir las fuerzas generadas por un terremoto. La adopción de técnicas de aislamiento sísmico, como aisladores de base o dispositivos de disipación de energía, se considera una estrategia avanzada para reducir las fuerzas transmitidas a la estructura durante un sismo, minimizando así el riesgo de daño. Además, la incorporación de elementos de refuerzo, como vigas y columnas adicionales, así como muros de cortante, fortalece la estructura global, proporcionando una resistencia adicional contra las fuerzas sísmicas (Moustafa *et al.*, 2022).

Por otro lado, Altindal *et al.* (2021) sostienen que estas avanzadas prácticas de diseño en seguridad sísmica buscan no solo cumplir con los estándares y normativas, sino también superarlos para crear centros comerciales que no solo sean seguros durante un terremoto, sino que además sean capaces de recuperarse rápidamente, contribuyendo a la resiliencia y continuidad de estas importantes instalaciones en nuestras comunidades.

Además de la resistencia estructural, Zhang *et al.* (2022) puntualizan que la seguridad sísmica en centros comerciales aborda la planificación de evacuación, la disponibilidad de refugios seguros y la capacidad de respuesta ante emergencias. En un entorno comercial, donde la seguridad de los clientes y el personal es primordial, el cumplimiento de normativas sísmicas y la adopción de tecnologías y prácticas avanzadas aseguran que estos espacios sean lo más seguros posible durante y después de un terremoto. La atención cuidadosa a la seguridad sísmica no solo protege vidas y propiedades, sino que también contribuye a la resiliencia a largo plazo de los centros comerciales y sus comunidades circundantes.

En resumen, la importancia de la seguridad sísmica en centros comerciales va más allá de la protección de estructuras físicas, ya que se extiende a la salvaguarda de vidas y la continuidad de actividades comerciales esenciales. La aplicación de rigurosas normativas sísmicas, junto con tecnologías innovadoras y prácticas de diseño avanzadas, asegura que estos espacios cruciales estén preparados para resistir y recuperarse de los desafíos que presenta la actividad sísmica. Asimismo, la inversión en seguridad sísmica no solo brinda tranquilidad a los ocupantes y dueños de negocios, sino que contribuye a la construcción de comunidades más seguras y resilientes en el entorno construido. La atención dedicada a estos aspectos refuerza la idea de que la seguridad sísmica no es solo una necesidad estructural, sino un imperativo moral y social para garantizar la protección y bienestar de quienes interactúan con estos importantes centros comerciales.

5.2. Vulnerabilidades estructurales en centros de comercio

Las vulnerabilidades estructurales en centros comerciales son aspectos críticos que requieren atención especial en la ingeniería estructural y el diseño arquitectónico. Estas vulnerabilidades pueden surgir de diversas fuentes y, en particular, deben abordarse en el contexto de la seguridad sísmica. La falta de

consideración adecuada de la ubicación geográfica, la calidad del suelo y la resistencia estructural pueden dejar a los centros comerciales expuestos a riesgos significativos durante eventos sísmicos (Ergün y Tayfur, 2024).

La presencia de sistemas estructurales inadecuados o la ausencia de elementos de refuerzo esenciales constituyen una vulnerabilidad significativa en centros comerciales. En particular, las construcciones más antiguas pueden representar un riesgo mayor debido a que su diseño original puede no haber considerado los estándares sísmicos actuales. Estas edificaciones, construidas en una época en la que los códigos de construcción no enfatizaban la resistencia sísmica de manera integral, carecen de las características necesarias para afrontar las fuerzas dinámicas generadas por un terremoto (Liu, 2023).

Para Moustafa *et al.* (2022), la falta de elementos de refuerzo esenciales, como vigas y columnas adicionales o sistemas de disipación de energía, aumenta la vulnerabilidad de estas estructuras ante los eventos sísmicos. Entonces, la adecuación de estas construcciones más antiguas a los estándares contemporáneos se convierte en una prioridad para reducir el riesgo de daños catastróficos. En este sentido, la identificación y corrección de estas deficiencias estructurales son pasos cruciales para fortalecer la resiliencia de los centros comerciales y garantizar la seguridad de quienes los visitan durante eventos sísmicos.

Asimismo, la ausencia de técnicas de aislamiento sísmico y dispositivos de disipación de energía representa una vulnerabilidad adicional en los centros comerciales, dado que puede contribuir significativamente a la transmisión de fuerzas sísmicas a la estructura. El aislamiento sísmico implica la implementación de sistemas que reducen la transferencia directa de vibraciones y energía sísmica desde el suelo hasta la edificación, minimizando así la carga sísmica que la estructura debe soportar. La falta de estas tecnologías avanzadas expone a los centros comerciales a mayores niveles de tensión durante un terremoto, lo que puede resultar en daños estructurales y comprometer la seguridad de los ocupantes. Así, la incorporación estratégica de técnicas de aislamiento sísmico

y dispositivos de disipación de energía se presenta como una solución efectiva para mitigar los efectos perjudiciales de las fuerzas sísmicas y mejorar la resistencia de los centros comerciales frente a eventos sísmicos (Zhang *et al.*, 2022).

Altindal *et al.* (2021) sostienen que la disposición inadecuada de elementos no estructurales en centros comerciales, como estanterías, vitrinas y otros elementos de mobiliario, emerge como una fuente potencial de vulnerabilidad sísmica. Durante un terremoto, estos elementos pueden convertirse en proyectiles internos o contribuir al colapso de estructuras cercanas si no están asegurados adecuadamente. Por lo tanto, la falta de consideración en la planificación de la disposición y sujeción de estos elementos no estructurales aumenta el riesgo de daños internos, lo que no solo compromete la seguridad de los ocupantes, sino también la integridad de los productos y la infraestructura del centro comercial. En este contexto, la adopción de medidas específicas, como el anclaje seguro de estanterías y vitrinas, se vuelve esencial para reducir la vulnerabilidad sísmica, garantizando así un entorno más seguro y resistente ante los desafíos de eventos sísmicos.

A su vez, Ergün y Tayfur (2024) puntualizan que la interacción suelo-estructura desempeña un papel crucial en la seguridad sísmica de los centros comerciales, y las prácticas de diseño que no abordan adecuadamente esta dinámica pueden agravar las vulnerabilidades. La variabilidad en las características geotécnicas del suelo, como su tipo, densidad y comportamiento bajo cargas sísmicas, influye directamente en la respuesta estructural durante un terremoto. Diseñar sin considerar estas variables puede resultar en estructuras que no se adaptan eficientemente a las condiciones del suelo, aumentando así la vulnerabilidad sísmica.

La falta de análisis detallados de la interacción suelo-estructura puede llevar a decisiones de diseño erróneas, debilitando la capacidad de resistencia y absorción de energía de la edificación frente a fuerzas sísmicas. La implementación de prácticas de diseño sísmico que consideren cuidadosamente la

respuesta del suelo y adapten la estructura en consecuencia se vuelve esencial. Además, abordar la interacción suelo-estructura no solo fortalece la resistencia sísmica, sino que contribuye a la sostenibilidad y seguridad a largo plazo de los centros comerciales en entornos propensos a la actividad sísmica (Liu, 2023).

Para abordar estas vulnerabilidades de manera efectiva, es esencial llevar a cabo evaluaciones de riesgos detalladas en centros comerciales, especialmente aquellos ubicados en regiones sísmicamente activas. La implementación de técnicas de modelado avanzadas se convierte en una herramienta clave para comprender y prever cómo las fuerzas sísmicas pueden interactuar con la estructura y su entorno. Estos modelos permiten identificar puntos críticos de vulnerabilidad y evaluar el rendimiento estructural bajo diferentes escenarios sísmicos (Ge *et al.*, 2022).

Según Xu *et al.* (2020), la aplicación de estrategias de diseño sísmico innovadoras, como la incorporación de sistemas de aislamiento sísmico, refuerzos estructurales y dispositivos de disipación de energía, se presenta como una medida esencial para fortalecer la resistencia estructural y mitigar los riesgos inherentes a eventos sísmicos. La conciencia proactiva en relación con las vulnerabilidades estructurales impulsa a los ingenieros y diseñadores a adoptar un enfoque preventivo, garantizando que las edificaciones comerciales estén preparadas para resistir y recuperarse eficientemente de situaciones adversas.

Esta acción proactiva no solo salvaguarda la seguridad de los ocupantes y la integridad de la infraestructura, sino que también contribuye a la resiliencia a largo plazo de los centros comerciales frente a desafíos estructurales. La combinación de evaluaciones rigurosas, modelado avanzado y estrategias de diseño sísmico innovadoras establece un estándar elevado para la construcción segura y sostenible de centros comerciales en áreas propensas a actividad sísmica.

5.3. Estrategias de reforzamiento del muro de suelo en centros comerciales

Para Venkatasubbaiah y Reddy (2023), las estrategias de reforzamiento del muro de suelo en centros comerciales representan un pilar fundamental en la ingeniería geotécnica y la planificación estructural para garantizar la estabilidad y seguridad de estas edificaciones ante desafíos sísmicos y geotécnicos. Frente a la creciente conciencia de la necesidad de fortalecer las estructuras existentes y nuevas, se han desarrollado diversas técnicas de reforzamiento del muro de suelo. Estas estrategias buscan no solo optimizar la interacción entre el suelo y los elementos de refuerzo, sino también abordar específicamente las condiciones geotécnicas del terreno y las cargas sísmicas. En este contexto, se exploran las estrategias innovadoras y efectivas que los ingenieros geotécnicos emplean para reforzar los muros de suelo en centros comerciales, destacando la importancia de estas prácticas en la creación de estructuras resilientes y seguras.

En este escenario, la evaluación de la condición actual de los muros de suelo en centros comerciales es un proceso crítico para comprender la integridad estructural y geotécnica de estas edificaciones. Inicialmente, se lleva a cabo una inspección detallada que incluye análisis visual, muestreo de suelo y pruebas geotécnicas para determinar la calidad del terreno de fundación y la posible presencia de patologías en los muros. Además, se evalúa la geometría y alineación del muro, así como la presencia de grietas, deformaciones o signos de deterioro que podrían indicar debilidades estructurales. A su vez, se emplean tecnologías avanzadas como pruebas de ultrasonido y radar para obtener información más detallada sobre la resistencia y consistencia del suelo (Kuribayashi *et al.*, 2020).

Una vez recopilada esta información, los ingenieros geotécnicos pueden realizar análisis de estabilidad para evaluar la capacidad del muro de suelo para

resistir cargas sísmicas y de otro tipo. Esta fase de evaluación es esencial para diseñar estrategias de reforzamiento adecuadas, debido a que proporciona una comprensión precisa de la condición actual y los desafíos específicos que deben abordarse para fortalecer la estructura de manera efectiva (Venkatasubbaiah y Reddy, 2023).

A su vez, la selección de técnicas de reforzamiento para los muros de suelo en centros comerciales implica una cuidadosa evaluación de las condiciones geotécnicas y estructurales específicas de cada sitio. Diferentes situaciones requieren enfoques variados, y los ingenieros geotécnicos deben considerar factores como la naturaleza del suelo, la geometría del muro, las cargas aplicadas y la necesidad de resistencia sísmica. Entre las técnicas comunes se encuentran el uso de geotextiles y georedes para mejorar la estabilidad del suelo, así como la instalación de anclajes y refuerzos de concreto para fortalecer la estructura del muro (Zhang *et al.*, 2022).

De acuerdo con Kuribayashi *et al.* (2020), la decisión sobre la técnica de reforzamiento más apropiada también puede involucrar el uso de mallas metálicas, pilotes o incluso la aplicación de inyecciones de material estabilizador en el suelo. Cada método se elige cuidadosamente según las características específicas del sitio y los objetivos de fortalecimiento deseados. La selección de estas técnicas debe basarse en un análisis exhaustivo de las condiciones del terreno, asegurando así una mejora efectiva de la capacidad de carga y la estabilidad del muro de suelo en entornos comerciales.

Por otro lado, las consideraciones específicas para reforzar los muros de suelo en centros comerciales van más allá de las condiciones geotécnicas y estructurales estándar. Dada la complejidad y diversidad de estos espacios, los ingenieros geotécnicos deben tener en cuenta factores adicionales para garantizar un reforzamiento efectivo. La carga dinámica asociada a la circulación de personas y mercancías en un entorno comercial exige un análisis detallado de

las cargas adicionales que puedan afectar a los muros de suelo. Además, la presencia de sistemas de cimentación, como pilares y vigas, requiere estrategias de reforzamiento que no interfieran con la operación normal del centro comercial (Chehade *et al.*, 2022).

Finalmente, cabe resaltar que la integración de medidas de mitigación durante el proceso de reforzamiento también es crucial. Esto podría incluir la implementación de dispositivos de aislamiento sísmico para minimizar la transmisión de vibraciones a las estructuras circundantes y garantizar la seguridad de los ocupantes. La selección de materiales de reforzamiento debe tener en cuenta no solo la eficacia técnica, sino también la estética, ya que los centros comerciales son espacios de alto tráfico que buscan mantener una apariencia atractiva para sus clientes. Estas consideraciones específicas aseguran que las estrategias de reforzamiento no solo sean técnicamente sólidas, sino también prácticas y adaptables a las necesidades particulares de los centros comerciales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acuña, F., Smith, J., Luna, M., y Barrios, J. (2023). Interacción Suelo Estructura: una Revisión del Estado del Arte. *Ciencia Latina: Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 6564-6577. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.7427

Agbo, S., Roy, K., Adeeb, S., y Li, Y. (2023). A Systematic Literature Review on Permanent Ground Deformation Patterns Imposed on Buried Steel Pipelines. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 100151. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2667143323000434?via%3Dihub>

Aguiar, R., y Cagua, B. (2021). Conferencias dictadas en el programa: “El conocimiento no se detiene Dr. Roberto Aguiar”. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26(4), 586-666. <https://doi.org/10.24133/riie.v26i4.2633>

Aguilar, J., González, R., Guerrero, V., y Jara, M. (2020). Comportamiento de templos coloniales en el sismo del 7 de septiembre de 2017 en Chiapas. *Ingeniería Sísmica*, (102), 26-41. <https://doi.org/10.18867/ris.102.502>

Altindal, A., Karimzadeh, S., Erberik, M. A., Askan, A., Anil, O., Kockar, M. K., y Sahmaran, M. (2021). A case study for probabilistic seismic risk assessment of earthquake-prone old urban centers. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 61, 102376. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102376>

Alva, C. A., y Aguilar, G. C. (2021). Interacción entre la presa de relaves y el acuífero de la microcuenca del río Yuracyacu en la Región La Libertad del Perú. *Ciencia Latina: Revista Científica Multidisciplinar*, 5(1), 706-733. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i1.272

Alva, R., y García, J. (2020). *Evaluación de vulnerabilidad estructural y propuesta de diseño sismorresistente de viviendas de albañilería confinada en el sector central del distrito de El Porvenir-Trujillo* [tesis de titulación, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/50857>

Álvarez, E. R., Lora, F., y López, S. (2022). Proceso de diseño sismorresistente de edificios de viviendas de mampostería reforzada para zonas de alta peligrosidad sísmica. *Informes de la Construcción*, 74(566), e445. <https://doi.org/10.3989/ic.85554>

Álvarez-Deulofeu, E., Beira-Fontaine, E., Cabrera-Castro, P., y Daoud-Mohamed, M. (2021). Estimación de costos adicionales por seguridad sísmica en proyectos de cimentaciones superficiales. *Minería y Geología*, 37(3), 287-302. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1993-80122021000300287&lng=es&tlng=es.

Anco, R. T., Mamani, A. R., y Cotrado, D. (2021). Análisis y diseño estructural de un edificio de vivienda multifamiliar con muros de ductilidad limitada. *Ingeniería Investiga*, 3(1), 560-577. <https://doi.org/10.47796/ing.v3i1.481>

Arqueñiva, H., y Romero, R. (2021). Estudio y evaluación comparativa entre suelos reforzados con geomalla y muros de concreto armado para la estabilización de taludes de carreteras. *Revista Científica Ciencias Ingenieriles*, 1(1), 20-32. <https://revistas.unh.edu.pe/index.php/ricci/article/view/202>

Arqueñiva, H., y Romero, R. (2021). Estudio y evaluación comparativa entre suelos reforzados con geomalla y muros de concreto armado para la estabilización de taludes de carreteras. *Revista Científica Ciencias Ingenieriles*, 1(1), 20-32. <https://doi.org/10.54943/ricci.v1i1.202>

Avendaño, G., Bueno, J., Reyna, E., y Salinas, M. (2023). *Proyecto de cierre de 10 plataformas de exploración realizadas por Minera AA en el proyecto Michiquitay* [trabajo de investigación de maestría, Universidad ESAN]. Repositorio Institucional ESAN. <https://hdl.handle.net/20.500.12640/3573>

Banescu, A., Sbarcea, M., Georgescu, L. P., y Rusu, E. (2020). Earthquake response analysis of buildings located in seismic areas. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 20(1.1), 489-497. <https://www.proquest.com/openview/c6988f2bc9e52d3612bfbaf4f4c103ac/1?pq=-origsite-gscholar&cbl=1536338>

Beigt, D., Villarosa, G., De Luca, L., Barbosa, A., Gómez, E. A., y Raniolo, L. A. (2023). Coastal instability associated to gravitational processes in the large patagonian lakes: a study of recent events. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 80(2), 280-299. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1649>

Benjumea, J., Chaparro, A., Suarez, A., y Villalba-Morales, J. (2021). Desempeño Sísmico y Cantidades de Obra de Edificaciones Aporticadas de Concreto Reforzado Diseñadas para Diferentes Capacidades de Disipación de Energía. *Revista EIA*, 18(35), 1-16. <https://doi.org/10.24050/reia.v18i35.1454>

Bermudo, H., y De la Cruz, R. (2022). *Efectos de la bidireccionalidad sísmica en la respuesta de edificaciones escalonadas de concreto armado, mediante el Análisis Dinámico Modal Espectral (ADM) y el Análisis Tiempo Historia Lineal (ATHL), en la ciudad de Lima* [tesis de titulación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional UPC. <http://hdl.handle.net/10757/661473>

Blas, J. W., Salazar, R. A., Vega, F. E., y Velásquez, A. E. (2023). Compendio de metodologías sobre efectos sísmicos para diseño de puentes atirantados, colgantes y en arco. *Aporte Santiaguino*, 16(2), 193-211. <https://doi.org/10.32911/as.2023.v16.n2.1076>

Braña, P., Gamón, R., Fundora, N., y Martínez, J. (2022). Influencia de la altura en la consideración de la interacción dinámica suelo-estructura en edificaciones con tipología mixta ubicadas en zonas de alto peligro sísmico. *Ingeniería y Desarrollo*, 40(1), 6-27. 10.14482/inde.40.01.621.852

Bravo, Y. E., Narváez, E. R., Cabrera, P. C., Bonilla, J. L., y Ordoñez, D. P. (2020). Evaluación de Técnicas de Extracción de Características Orientado a la Clasificación de Señales Sísmico-volcánicas del Volcán Nevado del Ruiz. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E25), 147-158. <https://www.proquest.com/openview/89389c5e0d0fd26011712fb07d7dda20/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393>

Briceño, J. E., Matos, Y., Belandria-Rodríguez, N., y León Oviedo, F. (2022). Evaluación de la estabilidad en muros utilizando modelos numéricos. *Revista Ingeniería UC*, 29(1), 96-103. <https://doi.org/10.54139/revinguc.v29i1.53>

Cagua, B., Aguiar, R., y Pilatasig, J. (2021). Nuevas funciones de CEINCI-LAB para el análisis y diseño de pórticos de acero acorde a la NEC-15. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26(1), 1-60. <https://doi.org/10.24133/riie.v26i1.1958>

Cagua-Gómez, B., Tola-Tola, A., Pilatasig-Caizaguano, J., y Aguilar-Rosero, P. (2022). Influencia sobre el cortante basal y derivas de edificaciones al incluir una fracción de la carga viva en la carga sísmica reactiva. *Investigación y Desarrollo*, 16(1). <https://doi.org/10.31243/id.v16.2022.1667>

Cai, X., Zhang, S., Li, S., Xu, H., Huang, X., y Zhu, C. (2021). A Review of the Methods Calculating the Horizontal Displacement for Modular Reinforced Soil Retaining Walls. *Applied Sciences*, 11(18), 8681. <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/18/8681>

Campos, L. (2020). *Análisis comparativo del comportamiento sísmico del muro de contención de concreto armado frente al suelo reforzado, Punta Hermosa, 2020* [tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/66397>

Castellanos, W., y Rodríguez, E. (2022). Inclusión de micropilotes como elementos recuperadores de carga en cimentaciones: revisión del estado del conocimiento. *Ingeniería*, 27(2), e16984. <https://doi.org/10.14483/23448393.16984>

Cerón, J., Pérez, E., Navarro, H., Rodríguez, C., y Ramos, G. (2022). Análisis de riesgo en puente peatonal tipo armadura utilizando sensores. *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, 9(18). <http://portal.america.org/ameli/journal/595/5953117005/>

Chehade, H., Guo, X., Dias, D., Sadek, M., Jenck, O., y Hage, F. (2022). Reliability analysis for internal seismic stability of geosynthetic-reinforced soil walls. *Geosynthetics International*, 30(3), 296-314. <https://doi.org/10.1680/jgein.22.00250>

Chou, N., Yang, K. H., Barrett, B., Wu, H. M., y Liu, T. Y. (2020). Sustainable Characteristics of Reinforced Soil Structures - from Ancient Great Walls to Modern GRS Walls. *Transportation Infrastructure Geotechnology*, 7, 445-460. <https://doi.org/10.1007/s40515-020-00121-y>

Condezo, Y., y Rodríguez, M. (2023). *Análisis y diseño de una edificación de albañilería de 5 pisos ubicado en el distrito de Magdalena* [tesis de titulación, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional UPC. <http://hdl.handle.net/10757/671123>

Cuyán, A. E., Mio, J. L., y Muñoz, S. P. (2021). Comportamiento térmico y estructural del concreto expuesto a altas temperaturas: una revisión de la literatura. *Investigatio*, (16), 78-93. <https://doi.org/10.31095/investigatio.2021.16.7>

Ćwirko M, y Jastrzębska M. (2021). Behaviour of the Steel Welded Grid during a Simplified Pullout Test in Fine Sand. *Applied Sciences*, 11(19), 9147. <https://doi.org/10.3390/app11199147>

Dallaire, F., Robert-Veillette, X., Barriere, M., Roy, N., y Proulx, J. (2020, 13-18 de setiembre). *Comparison of damping modification factor and methods of analysis for highway bridges earthquake response*. 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan. <https://wcee.nicee.org/wcee/article/17WCEE/2d-0064.pdf>

Donini, H., y Orler, R. (2021). Una revisión sobre las juntas de dilatación en edificios de hormigón armado. *Jornadas Argentinas de Ingeniería Estructural*, 26, 1-20. https://jornadasaie.org.ar/jornadas-aie-antiores/2021/26jaie-trabajos/002_TRABAJO.pdf

Doulala-Rigby, C., y Pérez, A. (2021). 40 años de estructuras de suelo reforzadas con geomalla de polietileno de alta densidad (HDPE): Los muros más altos de Latinoamérica a los Emiratos Árabes Unidos. *South Florida Journal of Development*, 2(2), 2729-2739. <https://doi.org/10.46932/sfjdv2n2-126>

Ergün, M., y Tayfur, B. (2024). Evaluation of the seismic performance pre-and post-restoration of a masonry clock tower's FE model updated via experimental and optimization methods. *Engineering Failure Analysis*, 158, 107986. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.107986>

Erol, A., Kaya, Z., Uncuoğlu, E., y Kara, H. (2019). A case study of a gravity wall located in the fishing port area. *The Online Journal of Science and Technology-January*, 9(1), 7-11. <https://tojsat.net/journals/tojsat/articles/v09i01/v09i01-02.pdf>

Fang, K., Tang, H., Li, C., Su, X., An, P., y Sun, S. (2023). Centrifuge modelling of landslides and landslide hazard mitigation: A review. *Geoscience Frontiers*, 14(1), 101493. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1674987122001463?via%3Dihub>

Fianchini, M., Berlucchi, N., Zuccoli, F., y Mainardi, F. (2024). Preservation and Innovation of the Rinnovata Pizzigoni School, a Symbolic Place of the Early 20apex Century Experimental Pedagogy in Milan. En Germanà, M.L., Akagawa, N., Versaci, A., Cavalagli, N. (eds), *Conservation of Architectural Heritage (CAH). CAH 2022. Advances in Science, Technology & Innovation* (pp. 87-106). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33222-7_9

Flores, I., García, J., y González, Y. (2020). Relationship between compaction and suction in earth dams with CH type soils. *Obras y Proyectos*, (27), 15-25. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132020000100015>

Fusco, A., Viggiani, G.M.B., Madabhushi, G.S.P., Conti, R., y Prüm, C. (2022). Seismic Response of Anchored Steel Sheet Pile Walls in Dry and Saturated Sand. En Wang, L., Zhang, JM., Wang, R. (eds), *Proceedings of the 4th International Conference on Performance Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering (Beijing 2022). PBD-IV 2022. Geotechnical, Geological and Earthquake Engineering* (pp. 1075-1083). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-11898-2_85

Gamero, J. (2023). *Diseño de un muro de suelo reforzado con geomallas en la Vía de Evitamiento de la ciudad de Abancay* [tesis de titulación, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/25989>

Garcia, R. F., Kenda, B., Kawamura, T., Spiga, A., Murdoch, N., Lognonné, P. H., Widmer-Schmidrig, R., Compaire, N., Orhand-Mainsant, G., Banfield, D., y Banerdt, W. B. (2020). Pressure effects on the SEIS-InSight instrument, improvement of seismic records, and characterization of long period atmospheric waves from ground displacements. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 125(7), e2019JE006278. <https://doi.org/10.1029/2019JE006278>

Ge, B., Ruan, H., Shu, S., Zhang, F., y Gao, Y. (2022). Effects of seismic amplification on the stability design of geosynthetic-reinforced soil walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 50(5), 881-895. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.05.003>

Geomatrix. (2022, 31 de octubre). *Consideraciones para el diseño de muros de contención en suelo reforzado*. <https://geomatrix.co/consideraciones-para-el-diseno-de-muros-de-contencion-en-suelo-reforzado/>

González, L., Pierozan, R., Silva, G., y Marques, E. (2023). Evaluation of Construction and Demolition Waste and Other Alternative Fills for Strip-Reinforced Soil Walls. *Sustainability*, 15(12), 9705. <https://doi.org/10.3390/su15129705>

Govender, V., & Schulz-Poblete, M. (2023). The design challenges of mechanically stabilized earth wall structures in extreme rainfall conditions for commercial operating owners. *E3S Web of Conferences*, 368, 02019. EDP Sciences. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202336802019>

Guanchez, E. (2022, 18 de diciembre). *Interacción Suelo-Estructura aplicada al diseño de Cimentaciones*. Sísmica Institute. <https://sismica-institute.com/interaccion-suelo-estructura-aplicada-al-diseno-de-cimentaciones/>

Gupta, A., Sawant, V., y Khati, B., (2021). Effect of Soil Amplification on the Seismic Stability of Reinforced-Soil Wall for Cohesive Backfill with Uniform Surcharge. En S. Patel, C. Solanki, K. Reddy y S. Kumar (Eds.), *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2019* (pp. 255-263). Indian Geotechnical Conference. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-33-6564-3_23

Hernández, F., (2022). Desafíos para la reconstrucción del Santuario de Nuestra Señora de los Angeles, Ciudad de México. *Arquitectura y Urbanismo*, 43(2), 7-23. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376873533002>

Huerta, N., Mayhuire, E., y Vargas, E. (2023). Comportamiento sismorresistente en edificaciones con la implementación del sistema estructural metálico de rejilla rígida perimetral. *Perfiles de Ingeniería*, 19(19), 55-66. <https://doi.org/10.31381/perfilesingenieria.v19i19.5790>

Hughes, W., Zhang, W., Ding, Z., y Li, X. (2022). Integrated Structural and Socioeconomic Hurricane Resilience Assessment of Residential Buildings in Coastal Communities. *Natural Hazards Review*, 23(3), 04022017. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000564](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000564)

Huo, Y. X., Gomaa, S. M., Zayed, T., y Meguid, M. (2023). Review of analytical methods for stress and deformation analysis of buried water pipes considering pipe-soil interaction. *Underground Space*, 13, 205-227. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2023.02.017>

Hurtado-López, G., y Mayoral-Villa, J. (2020). Fragility curves for hardfill dams under seismic loading Curvas de fragilidad para presas de hardfill bajo carga sísmica. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11(1), 132-168. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-01-04>

Instituto Geofísico del Perú [IGP]. (s.f.). *Mapas sísmicos*. Instituto Geofísico del Perú [IGP]. <https://ultimosismo.igp.gob.pe/mapas-sismicos>

Jihuallanca, I., Arenas, M., y Jihuallanca, J. (2023). La evaluación formativa en estudiantes de educación primaria: una revisión sistemática. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 752-770. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.4428

Jimenez, J. (2021). *Análisis estructural de un puente con aisladores elastoméricos con núcleo de plomo (LRB) en el Intercambio Vial Salcedo-Puno* [tesis de titulación, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/125533>

Jishnu, R. B., y Ayothiraman, R. (2020). Interaction of urban underground twin metro tunnels under static and earthquake loading. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 14(4), 2050019. <https://doi.org/10.1142/S1793431120500190>

Kim, J. S., y Kim, J. Y. (2020). Simplified elastic-plastic analysis procedure for strain-based fatigue assessment of nuclear safety class 1 components under severe seismic loads. *Nuclear Engineering and Technology*, 52(12), 2918-2927. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.05.008>

Konai, S., Sengupta, A. y Deb, K. (2020). Seismic behavior of cantilever wall embedded in dry and saturated sand. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14, 690-705. <https://doi.org/10.1007/s11709-020-0615-6>

Kuribayashi, K., Hara, T., Hazarika, H., Tsuji, S., y Kuroda, S. (2020). Study on tsunami-resistance of a reinforced soil wall based on water tank experiment. *Research Square*, 1. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-22102/v1>

Liu, X. (2023). Sources of Urban Public Safety Risks. En *Risk Prevention and Control System of Urban Public Security. Public Economy and Urban Governance in China* (pp. 31-56). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3928-2_2

Lu, L., Lin, H., Wang, Z., Xiao, L., Ma, S., y Arai, K. (2021) Experimental and Numerical Investigations of Reinforced Soil Wall Subjected to Impact Loading. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 54, 5651-5666. <https://doi.org/10.1007/s00603-021-02579-9>

Maddalozzo, W., y Fischer, E. (2020, 13-18 de septiembre). *Post-earthquake fire performance of steel buildings*. 17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE, Sendai, Japan. <https://wcee.nicee.org/wcee/article/17WCEE/2d-0110.pdf>

Martinez-Martinez, G., Blandón-Valencia, J., y Lara-Valencia, L. (2022). Amortiguadores de masa sintonizada: una revisión general. *Revista Politécnica*, 18(35), 140-168. <https://doi.org/10.33571/rpolitec.v18n35a10>

Maza, A. E. (2020). Efectos del disipador sísmico telescópico frente al comportamiento estructural de edificaciones sociales en el distrito de Independencia Huaraz. *Aporte Santiaguino*, 13(2), 147-159. <https://doi.org/10.32911/as.2020.v13.n2.686>

Medina, C., y Galarza, D. (2020). Análisis sísmico comparativo de una estructura asimétrica torsionalmente flexible aplicando NSP, MPA, NLRHA. *Revista de Ingeniería de Construcción*, 35(3), 257-274. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732020000300257>

Meireles, I., Martín-Gamboa, M., Sousa, V., Kalthoum, A., y Dufour, J. (2024). Comparative environmental life cycle assessment of partition walls: Innovative prefabricated systems vs conventional construction. *Cleaner Environmental Systems*, 12, 100179. <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100179>

Mendecki, M. J., Pakosz, R., Wojtecki, Ł., y Zuberek, W. M. (2021). Spatio-temporal analysis of elastic and inelastic deformations in roof-rocks from seismological observations. *International Journal of Mining Science and Technology*, 31(2), 241-251. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.12.001>

Mendoza, C. & Yncio, J. (2018). *Análisis Numérico Estático de Muros de Suelo Reforzado para Plataformas de Almacenamiento de Concentrados Mineros-Almacén Logisminsa, Ventanilla, Callao* [tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/648849>

Mesa, M., Álvarez, J., y Chávez, J. (2020). Evaluación del factor de seguridad en taludes de terraplenes carreteros altos ante carga sísmica. *Ingeniería Sísmica*, (103), 1-17. <https://doi.org/10.18867/ris.103.489>

Miao, Y., Zhong, Y., Ruan, B., Cheng, K., y Wang, G. (2020). Seismic response of a subway station in soft soil considering the structure-soil-structure interaction. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 106, 103629. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2020.103629>

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma Técnica de Diseño Sismorresistente*. Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (Sencico).

Mitac, D. J., Gonzales, J. T., y Pérez, C. J. (2021). Comparación de las características de respuesta ante un sismo entre un sistema de concreto armado y uno de estructuras metálicas. En E. Serna (ed.), *Desarrollo e Innovación en Ingeniería* (pp. 584-589). Instituto Antioqueño de Investigación (IAI). <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8742746>

Moustafa, S. S., Abdalzaher, M. S., Naeem, M., y Fouda, M. M. (2022). Seismic hazard and site suitability evaluation based on multicriteria decision analysis. *IEEE Access*, 10, 69511-69530. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3186937>

Moya, A. (2018). Sistema de monitoreo acelerográfico del Laboratorio de Ingeniería Sísmica Ingeniería. *Revista de la Universidad de Costa Rica*, 28(1), 96-114. <https://www.redalyc.org/pdf/441/44170540007.pdf>

Núñez, C., Robalino, L., Toledo, D., y Saltos, K. (2024). Integración de estrategias sobre la sostenibilidad en la Educación Superior. *Revista Ciencia e Investigación*, 9(1), 163-182. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9296201>

Ozturk, K., Cakir, T., y Araz, O. (2023). Influences of wall configurations on earthquake behavior of cantilever retaining walls considering soil-structure interaction effects. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 17(01), 2250021. <https://www.worldscientific.com/doi/full/10.1142/S179343112250021X>

Pérez, E. (2020). *Análisis y diseño estructural de un edificio en concreto armado de cinco pisos y un sótano* [tesis de titulación, Pontificia Universidad Católica del Perú]. Repositorio Institucional PUCP. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/16765>

Pérez-Gavilán, J., Aguirre, J., y Ramírez, L. (2018). Sismicidad y seguridad estructural en las construcciones: lecciones aprendidas en México. *Salud Pública de México*, 60, 41-51. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0036-36342018000700041&script=sci_arttext

Raisinghani, B. M., Bhoraniya, T. H., y Farsangi, E. N. (2022). Scientific Perspectives to Earthquake Resistant Design of RC Buildings —A Global Approach. En Kolathayar, S., Chian, S.C. (eds.), *Recent Advances in Earthquake Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, (pp. 399-413). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4617-1_32

Revelo, P., y Huertas, J. (2022). Soluciones para la estabilización de taludes mediante tecnologías o procesos basados en la conservación del medio ambiente. Una revisión del estado del arte. En J. Huertas, L. Torres, L. Lafaurie, e Insuasty, J., *Las ciencias ambientales y su avance sin fronteras durante la pandemia* (pp. 406-428). Editorial Unimar.

Ruiz, S., Jiménez, R., Santos, M., y Orellana, M. (2020). Evaluación de la fragilidad de dos soluciones de rehabilitación para un edificio con planta baja débil dañado durante el sismo 19/s17. *Ingeniería Sísmica*, (102), 1-25. <https://doi.org/10.18867/ris.102.513>

Ruiz-Jiménez, A. Pérez-Márquez, E., y Barrientos-Monsalve, E. (2020). Prototipo a escala de un modelo de resonancia en edificaciones diseñadas con figuras geométricas. *Sostenibilidad, Tecnología y Humanismo*, 11(2), 107-114. <https://pdfs.semanticscholar.org/09bd/fec13ad9bc16c61a7c24f10397e74d81e118.pdf>

Saharia, R., Bhuyan, D., Chowdhury, S., y Bharadwaj, K. (2022). Comparative Study on Static and Dynamic Analysis of RC Buildings of Different Heights in Different Seismic Zones. En Kolathayar, S., Chian, S.C. (eds.), *Recent Advances in Earthquake Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering* (pp. 161-174). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4617-1_13

Sailema, W., Olivares, T., y Delicado, F. (2022). Topologías en el Internet de las Cosas Médicas (IoMT), revisión bibliográfica. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 34(4), 120-136. <https://doi.org/10.37815/rte.v34n4.960>

Salcedo, J. C. (2022). Cambios en la tipología de las pequeñas iglesias españolas en América por motivos estructurales: cómo se redujo la vulnerabilidad sísmica en el Chile actual. *Ge-conservacion*, (21), 190-204. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8867277>

Sampaio, M., Andrioli, L., Neto, A., Glyniadakis, S., y Medeiros, E. C. (2021). Análise de estruturas sujeitas a ações sísmicas utilizando o método dos elementos finitos. *Conjecturas*, 21(3), 836-842. <https://doi.org/10.53660/CONJ-249-102>

Sánchez, V., González, R., Castañeda, G., García, C., y Aguilar, J. (2019). Characterization of pathologies in housing structures. A case study in the city of Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico. *Journal of Building Engineering*, 22, 539-548. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S235271021830528X>

Sariol, J. A., Fundora, N., y Martínez, J. O. (2022). Influencia de la interacción dinámica suelo estructura en el desempeño y el mecanismo de colapso de una edificación de tipología mixta bajo carga sísmica. *Revista Ciencia y Construcción*, 3(1), 35-49. <https://rcc.cujae.edu.cu/index.php/rcc/article/view/102>

Sierra, L., Rojas, J., Peña, A., y Takeuchi, C. (2023). Incidencia estructural de la esterilla de bambú guadua ante eventos sísmicos en muretes de mampostería republicana. *Arquitectura y Urbanismo*, 44(1), 33-40. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376875562004>

Skokandić, D., Vlašić, A., Kušter, M., Srbić, M., y Mandić, A. (2022). Seismic Assessment and Retrofitting of Existing Road Bridges: State of the Art Review. *Materials*, 15(7), 2523. <https://doi.org/10.3390/ma15072523>

Tenorio, M., y Santa Cruz, J. (2022). *Evaluación del costo y tiempo de ejecución de las estructuras de contención tipo gaviones, cantiléver y de gravedad, en la carretera Yurimaguas-Munichis, provincia de Alto Amazonas, departamento de Loreto* [tesis de titulación, Universidad Científica del Perú]. Repositorio Institucional UCP. <http://repositorio.ucp.edu.pe/handle/UCP/1734>

Thiers-Moggia, R., y Málaga-Chuquitaype, C. (2020). Seismic control of flexible rocking structures using inerters. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 49(14), 1519-1538. <https://doi.org/10.1002/eqe.3315>

Torres, C. (2020). Evaluación de riesgo de deslizamientos y propuesta geotécnica de la trocha Ayash-Huaripampa tramo km 3+260 al km 3+300. *Perfiles de Ingeniería*, 16(16), 13-22. https://doi.org/10.31381/perfiles_ingenieria.v20i15.3542

Torres-Rosas, R. (2022). Generalidades de la elaboración de la revisión sistemática en acupuntura. *Revista Internacional de Acupuntura*, 16(3), 100192. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1887836922000138>

Trushko, O. V., Trushko, V. L., y Demenkov, P. A. (2024). Construction of Underground and Multi-story Car Parks in High-density Urban Areas. *International Journal of Engineering*, 37(2), 224-236. <https://doi.org/10.5829/ije.2024.37.02b.02>

Van Nguyen, D., Kim, D., y Nguyen, D. D. (2020). Nonlinear seismic soil-structure interaction analysis of nuclear reactor building considering the effect of earthquake frequency content. *Structures*, 26, 901-914. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.05.013>

Velásquez, E. J., y Guadalupe, E. (2023). Impacto de la implementación del protocolo de administración de relaves en la gestión de riesgos de relavera en mina Huaron. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas*, 26(52), e25998. <https://doi.org/10.15381/iigeo.v26i52.25998>

Venkatasubbaiah, M., y Reddy, G. (2023). Analysis of Reinforced Soil Wall Based on Failure Kinematics Against Transverse Pullout. *Transportation Infrastructure Geotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s40515-023-00316-z>

Viera, L., Quizanga, D., y Andino, J. (2020). Análisis estático no lineal de edificios aporricados de hormigón armado aplicando normativa ecuatoriana, colombiana y peruana. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 9(1), 72-78. <https://doi.org/10.29166/revfig.v1i1.2186>

Vilchez, J., y Toledo, W. (2018). *Alternativas de solución para prevenir la socavación en el río Rímac, entre los puentes Libertadores y Talavera, distrito de El Agustino* [tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional UPC. <https://repositorioacademico.upc.edu.pe/handle/10757/624786>

Villarreal, G., y Aguila, C. (2021). Interacción suelo-estructura y su influencia en la respuesta sísmica de edificios de concreto armado. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26(3), 426-471. <https://doi.org/10.24133/riie.v26i3.2336>

Weli, S. S., y Vigh, L. G. (2023). Reliability Assessment Methodology of Blast Protective Steel Moment Resisting Frame Using NiTi SMA-based Connection. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 67(3), 671-682. <https://doi.org/10.3311/PPci.20493>

Xu, H., Cai, X., Wang, H., Li, S., Huang, X., y Zhang, S. (2022). Analysis of the Working Response Mechanism of Wrapped Face Reinforced Soil Retaining Wall under Strong Vibration. *Sustainability*, 14(15), 9741. <https://doi.org/10.3390/su14159741>

Xu, P., Hatami, K., y Jiang, G. (2020). Study on seismic stability and performance of reinforced soil walls using shaking table tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(1), 82-97. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0266114419300986>

Xu, P., Hatami, K., y Jiang, G. (2020). Study on seismic stability and performance of reinforced soil walls using shaking table tests. *Geotextiles and Geomembranes*, 48(1), 82-97. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2019.103507>

Zhang, Y., Fung, J. F., Johnson, K. J., y Sattar, S. (2022). Review of seismic risk mitigation policies in earthquake-prone countries: lessons for earthquake resilience in the United States. *Journal of Earthquake Engineering*, 26(12), 6208-6235. <https://doi.org/10.1080/13632469.2021.1911889>

Zhu, Y., Wang, W., Shi, Y., Li, M., Wang, S., Bao, L., y Tian, Y. (2023). Experimental and numerical study on seismic behavior of partially steel-reinforced concrete beam-to-steel tube column joint. *Journal of Building Engineering*, 76, 107210. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.107210>

SOBRE LOS AUTORES

Alberto Cristobal Flores Quispe

Universidad Nacional de Moquegua

<https://orcid.org/0000-0003-3859-5233>

Mario Pedro Rodríguez Vásquez

Universidad Nacional de Moquegua

<https://orcid.org/0009-0001-5190-6721>

Fabrizio del Carpio Delgado

Universidad Nacional de Moquegua

<https://orcid.org/0000-0002-6334-7867>

Delmer Huayra Romani

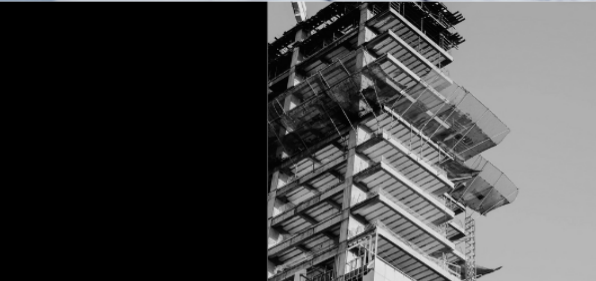
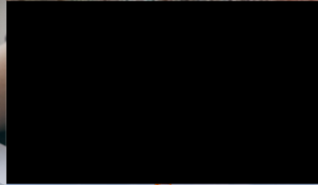
Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo

<https://orcid.org/0000-0003-0763-9985>

Hirbin Félix Céspedes Reynaga

Universidad Tecnológica de Los Andes

<https://orcid.org/0000-0001-6895-7608>



COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL MURO DE SUELO REFORZADO EN INFLUENCIA DE LA CARGA SISMICA

www.arcoeditores.com
contato@arcoeditores.com
(55)99723-4952