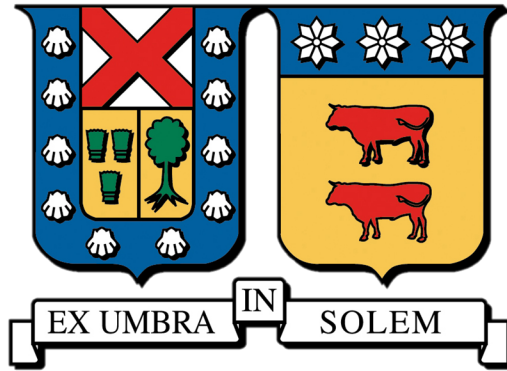




Departamento de Obras Civiles
Universidad Técnica Federico Santa María

Estudio de la propagación de incertidumbre de un galpón industrial de hormigón prefabricado considerando interacción suelo - estructura

Memoria de Título presentada por

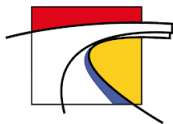
Ignacio Jeria Marras

como requisito para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Danilo Kusanovic

Abril, 2023



TÍTULO DE LA TESIS:

**ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE UN GALPÓN
INDUSTRIAL DE HORMIGÓN PREFABRICADO CONSIDERANDO
INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA**

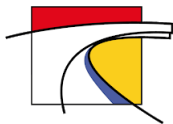
AUTOR:

IGNACIO JERIA MARRAS

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de
INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Profesor Guía: Danilo Kusanovic

Miembro Comisión: Ramiro Bazaez



ESTUDIO DE PROPAGACIÓN DE INCERTIDUMBRE DE UN GALPÓN INDUSTRIAL DE HORMIGÓN PREFABRICADO CONSIDERANDO INTERACCIÓN SUELO - ESTRUCTURA

Resumen

El siguiente documento presenta un estudio de propagación de incertidumbre de un galpón industrial de hormigón prefabricado considerando la interacción suelo-estructura. Esta estructura se sitúa en una zona con suelos de alta variabilidad en sus propiedades, por lo tanto, la respuesta sísmica presenta una variabilidad frente a un evento sísmico.

Para poder entender el comportamiento de esta estructura frente a un evento sísmico, se realizaron 80 simulaciones considerando las propiedades del suelo variable con una distribución normal de las velocidades de propagación de onda, esto permitió entender el comportamiento de esta estructura frente a distintos escenarios posibles. Estos modelos calculados en Opensees entregaron información tales como fuerzas de corte, desplazamientos y drift de la estructura para todos los escenarios. Los resultados de estas simulaciones permiten entender como la incertidumbre del suelo afecta a la respuesta de la estructura. Finalmente, este estudio indica que la estructura resiste sin problemas un evento sísmico de magnitud considerable.

Palabras claves: Interacción suelo - estructura, Opensees, galpón industrial, hormigón armado, elementos finitos

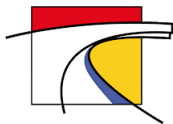
1. Introducción y contextualización

En la historia, muchas estructuras han sufrido daños críticos durante sismos severos. El daño causado sugiere que el comportamiento sísmico de las estructuras depende no solo de la respuesta de la superestructura, sino también de la fundación y el tipo de suelo. La interacción suelo-estructura (SSI) y las características del terremoto, sus trayectorias y la respuesta ante parámetros inciertos del suelo son factores importantes que pueden modificar la respuesta de la estructura. Sin embargo, la falta de consideración de estas influencias a menudo conduce a resultados de diseño conservadores en la práctica del diseño estructural. (Jiménez y Dias, 2022)(Kusanovic *et al.*, 2021).

En este estudio se analiza el comportamiento estructural de un galpón industrial de hormigón prefabricado llamado “Nave de Lavados” en la plataforma 3700 de la minera Andina en los Andes. Para el análisis vamos a utilizar un modelo simplificado en dos dimensiones y se estudia uno de sus ejes con el método directo. Para analizar la respuesta dinámica del modelo se realiza un análisis dinámico, lo que permite determinar la respuesta sísmica de la estructura ante cargas dinámicas de un sismo representativo (Wilkinson y Hiley, 2006).

En este estudio se utiliza el software OpenSees¹ para realizar un modelo de elementos finitos basado en los planos y especificaciones técnicas proporcionados por la empresa ejecutora SalfaMontajes. La estructura a estudiar, llamada “Nave de Lavados”, se proyecta construir en un suelo de tipo Lastre categorizado como tipo III según los estudios de mecánica de suelos (IDIEM, 2019). La topografía del lugar muestra que la roca aflora en el sector norte de la plataforma 3700, donde se ubica el taller de camiones, mientras que en dirección este, donde se encuentra el galpón industrial a estudiar, la roca se profundiza.

¹OpenSees es un software para desarrollar aplicaciones para simular el desempeño de sistemas estructurales y geotécnicos sujetos a terremotos.



En este contexto, los modelos elaborados en OpenSees permiten el estudio conjunto del suelo y la estructura, lo que resulta crucial para comprender su comportamiento y la interacción entre ambos. Dada la complejidad constructiva y la calidad del suelo en el área donde se emplazará la estructura, se ha realizado un análisis detallado para evaluar su capacidad de respuesta en situaciones de eventos sísmicos de gran magnitud, a fin de garantizar su adecuado desempeño operacional.

Este estudio busca modelar comportamiento del suelo junto con la estructura variando la velocidad de propagación de onda del suelo teniendo en cuenta la variabilidad en la estratigrafía del suelo e identificar la incertidumbre que genera la variabilidad del suelo en la respuesta de la estructura ante eventos sísmicos.

A pesar de los múltiples estudios geotécnicos realizados en el suelo de la zona de estudio, la alta variabilidad del terreno hace que modelar su comportamiento con parámetros inciertos sea esencial para comprender cómo interactuará con la estructura. Identificar las zonas de falla potenciales y compararlas con eventos similares permitirá comprender mejor el impacto de la variabilidad del suelo y el conocimiento limitado en la respuesta sísmica de la estructura.

Para realizar este estudio se recopila información del suelo a través de sondajes geotécnicos, perfiles geofísicos, ensayos de densidad in situ y ensayos de laboratorio. La variabilidad del suelo es alta, por lo que modelar su comportamiento con parámetros inciertos es fundamental para entender cómo se comportará la estructura. Se utilizan las memorias de cálculo, especificaciones técnicas y planos para definir la estructura y se calculan los parámetros necesarios en MatLab para luego modelar la estructura junto con el suelo en el software OpenSees. Se crean 80 modelos con velocidades de onda de suelo variables, con un promedio de 350 m/s y una desviación estándar del 40 %, según el estudio de mecánica de suelos. Se analizan los datos obtenidos del software, como desplazamientos en el suelo y la estructura, aceleraciones, velocidades, drift, fuerzas de corte, entre otros.

Este estudio se enfoca en el análisis del comportamiento de un galpón industrial de hormigón prefabricado ubicada en un suelo con características variables durante un evento sísmico. Para lograr este objetivo, se ha utilizado un modelo de elementos finitos (FEM) que ha sido desarrollado en varios escenarios, variando la velocidad de onda del suelo (V_s) en cada uno de ellos. Los resultados obtenidos a partir de este análisis son útiles para la toma de decisiones de diseño, ya que permiten mejorar la precisión y fiabilidad de las predicciones del modelo, proporcionando una visión más detallada sobre el comportamiento del sistema ante un evento sísmico.

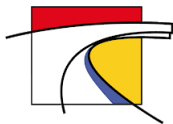
2. Antecedentes

2.1. Caracterización Geológica - Geotécnica

El área de emplazamiento de la estructura se ubica sobre un suelo correspondiente a un depósito de lastre, este se encuentra constituido por material de relleno no controlado, con intercalaciones de gravas, arenas y material fino limo-arcilloso de plasticidad media y compacidad media a baja. Las partículas que predominan son angulares y subangulares generadas por el proceso de arrancamiento y fracturación de la roca. Los espesores de Lastre varían entre 12 y 46 metros de profundidad, en la zona de construcción de la Nave de Lavados, la profundidad del Lastre se considera en 30 metros.

La NCh 2369 Of.2003 entrega un valor de aceleración efectiva máxima del suelo según la zona en donde se encuentre ubicado el sitio de estudio. De acuerdo a esta zonificación se establece un coeficiente de aceleración A_0 .

En este caso, la plataforma de la Nave de Lavados se ubica en la zona sísmica 2, por lo que el valor de A_0 recomendado es de 0.30 g (INN, 2003).



Basado en la exploración geotécnica (IDIEM, 2019) y con la información de los materiales circundantes con similares características, es que se pueden establecer los parámetros como propiedades de diseño presentados en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros geotécnicos de Lastre
Fuente: Estudio Mecánica de Suelos

Parámetro	Unidad	Valor
Densidad Seca	t/m ³	2.1
Cohesión	t/m ²	0
Ángulo de fricción interna	°	46
Modulo de deformación	kg/cm ²	$155\sigma_3^{0,56}$
Velocidad de ondas de corte promedio ($0 < z < 10$ m)	m/s	300
Velocidad de ondas compresionales promedio ($0 < z < 10$ m)	m/s	600
Módulo de Poisson		0.33
Permeabilidad	cm/s	10^{-1}

Los valores obtenidos en la tabla 1 se obtienen con el método MASW. En este ensayo, se realiza un arreglo lineal de geófonos con distancia entre ellos constante. Luego se genera una perturbación en el suelo mediante un golpe de alta energía con un sistema de masa con poleas. Estos golpes se realizan a una cierta distancia del primer y último geófono. El primer paso es el registro de la onda producida en el suelo y luego el procesamiento mediante el software MASWaves². A través de este ensayo es posible definir el perfil de velocidad de ondas de corte hasta la profundidad de exploración definida. A continuación, se presenta el resultado de un análisis de velocidad de ondas de corte. Se presentan los datos las velocidades de corte en la zona de estudio en la figura 1.

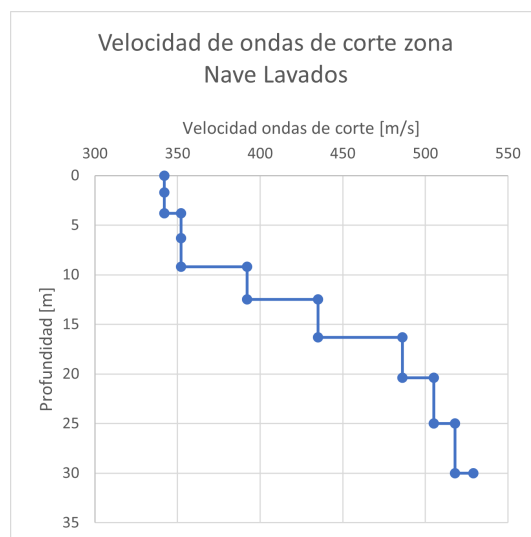
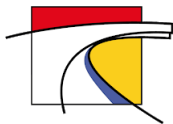


Figura 1: Detalle de datos de velocidades de corte del suelo analizado.
Fuente: Estudio Mecánica de Suelos

En el perfil de velocidad de ondas de corte presentado en la figura 1, se logró estimar que, hasta los 10 metros de profundidad, el suelo presenta una velocidad de onda de corte comprendido entre los 300 y 400 m/s. Por debajo de esta zona y hasta los 15 metros, el perfil presenta un comportamiento creciente, alcanzando un Vs de 500 m/s. Este suelo presenta una distribución normal de sus velocidades

²MASWaves (Multichannel Analysis of Surface Waves for assessing shear wave velocity profiles of soils) es un software de código abierto, desarrollado en la Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Islandia, para procesar y analizar registros de ondas superficiales multicanal utilizando MASW.



de propagación de onda en el suelo según el informe de mecánica de suelos para el rango de profundidad de estudio. Finalmente, y hasta los 30 metros de exploración alcanzados, la velocidad de propagación de ondas de corte se manifiesta estable entorno a los 700 m/s. Considerando estas velocidades de onda de corte medidas en la zona, el suelo se clasifica como suelo Tipo III de acuerdo a la Nch 2369 Of.2003.

Con los datos de la figura 1 es posible estimar el módulo de corte del suelo para establecer la rigidez (Das *et al.*, 2015) de este con la ecuación 1.

$$G_s = \frac{v_s^2 \gamma}{g} \quad (1)$$

donde: G_s :Módulo de corte, v_s : Velocidad de onda de corte, γ : Peso específico del suelo y g : aceleración de gravedad.

Para obtener el periodo del suelo, se utiliza la técnica HVSR (horizontal-to-vertical spectral ratio), esta técnica estudia las propiedades mecánicas del suelo analizando la forma en que vibra dada una estimulación externa. Este método implica medir el movimiento del suelo o roca en dos direcciones perpendiculares (horizontal y vertical) y comparar las amplitudes de las vibraciones en estas dos direcciones. El espectro HVSR resultante puede proporcionar información sobre la rigidez y la resistencia al corte del suelo o la roca, así como su frecuencia natural de vibración. En este caso, se obtiene que para el suelo estudiado se tiene una frecuencia de 9.53 [Hz] y un periodo de 0.104 [s]. En la figura 2 se puede observar los resultados de la medición HVSR.

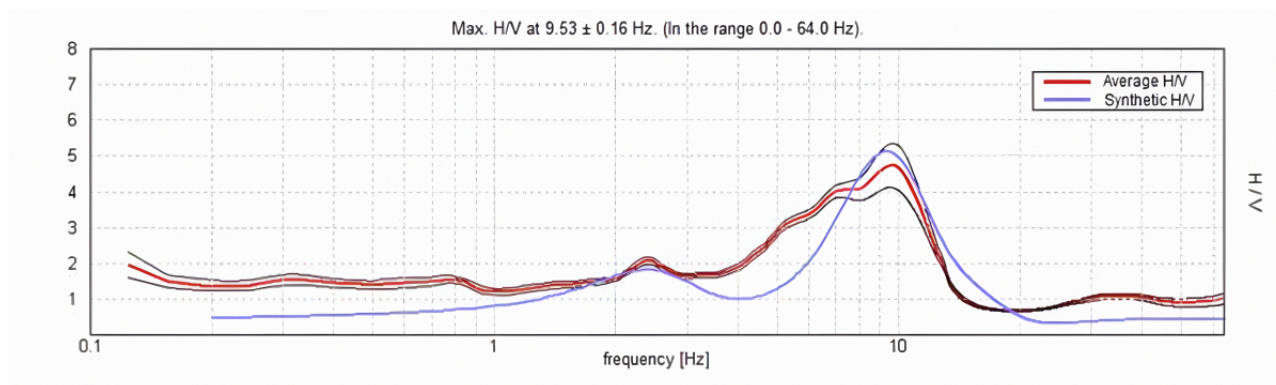


Figura 2: Medición HVSR para la zona cercana a Nave Lavados
Fuente: Estudio de mecánica de suelos

2.2. Estructura Principal

El galpón está estructurado en base a marcos rígidos (conexiones húmedas) de hormigón prefabricado en ambas direcciones principales, que son los encargados de transmitir las fuerzas horizontales (sísmicas) y gravitacionales a las fundaciones.

La estructura principal a analizar consta de 3 ejes longitudinales y 5 transversales. De estos ejes se analizará el eje A de la estructura. La estructura principal se presenta en la figura 3, mientras que el eje a analizar se presenta en la figura 25, el resto de los ejes se presenta en el anexo 8.1

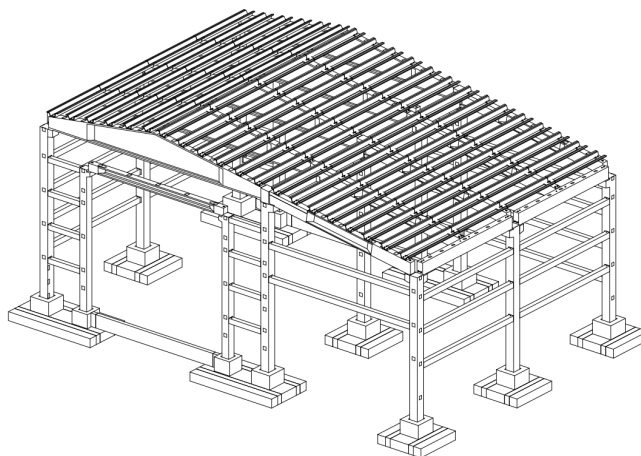


Figura 3: Isométrico Nave de Lavados CAEX
Fuente: SalfaMontajes

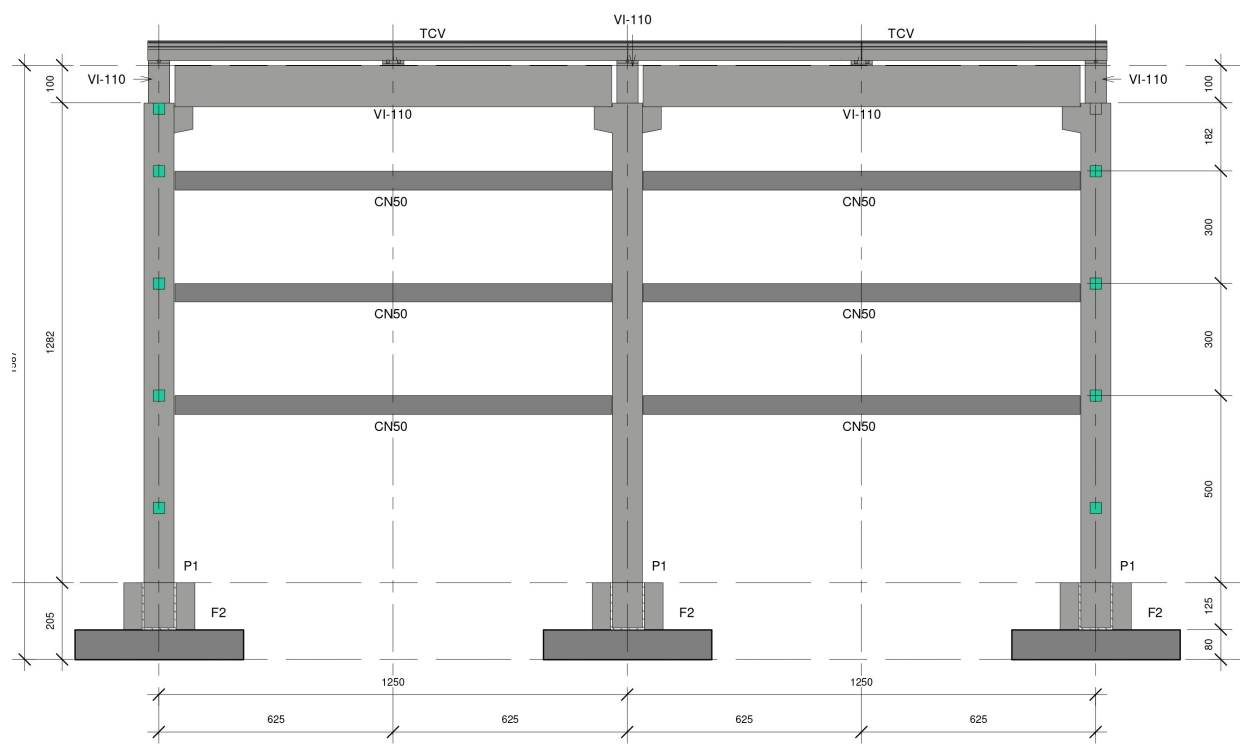


Figura 4: Detalle Eje A
Fuente: SalfaMontajes

2.2.1. Fundaciones, columnas y vigas

El sistema de fundaciones consiste en zapatas aisladas apoyadas sobre un medio elástico, unidas por vigas de fundación. La fundación del eje A es la fundación 02 presentada en la figura 29, para simplificar el modelo se consideran dimensiones que se ajusten al modelo del suelo. En el anexo 8.2 se presentan las fundaciones de la estructura completa.

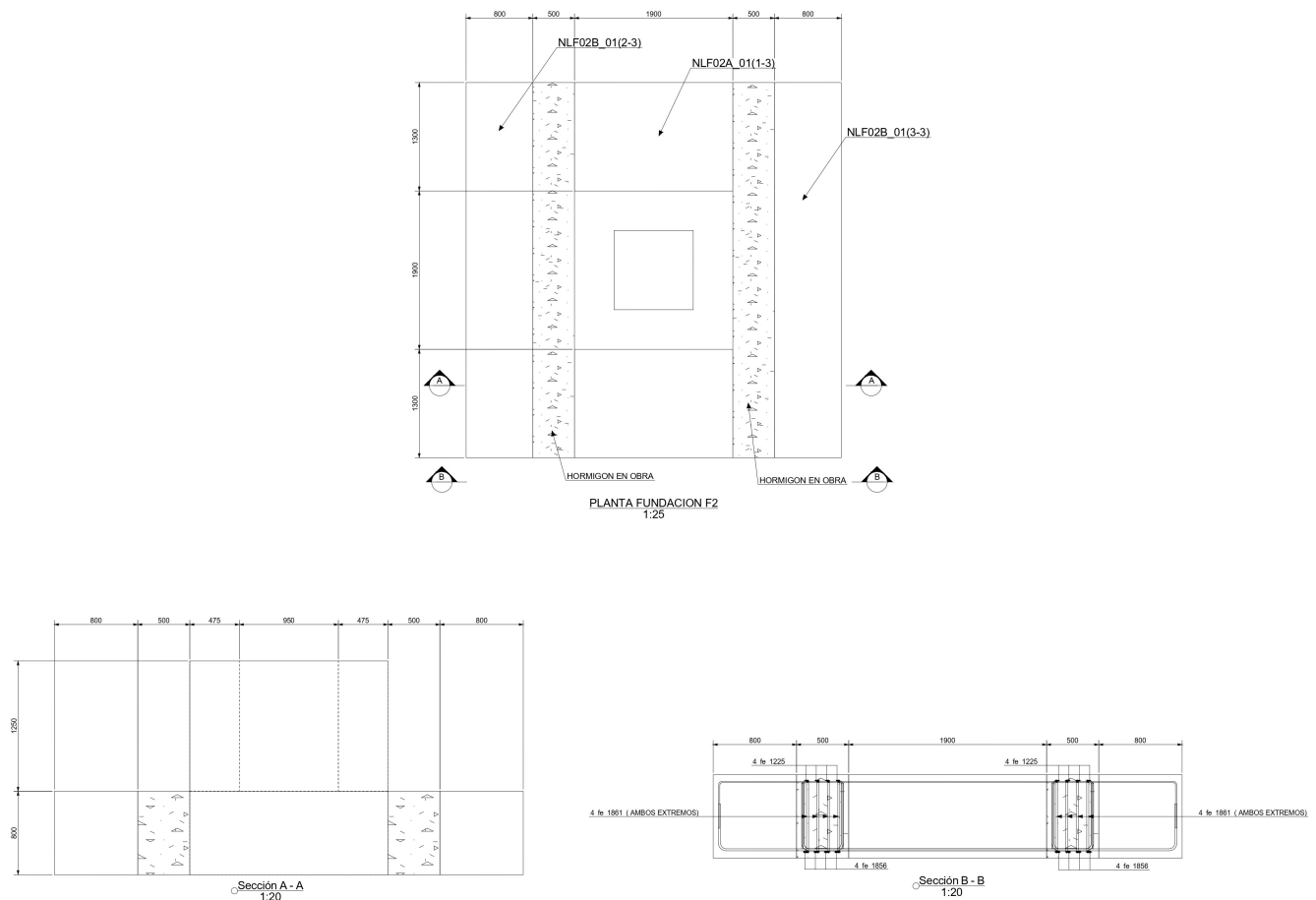


Figura 5: Detalle Fundación 02

Fuente: SalfaMontajes

La columna del eje A se presenta en la figura 6. Las columnas de los ejes restantes se presentan en la sección 8.3. Estos se considerarán como un solo elemento entre la unión columna - fundación asumiendo que trabajan monolíticamente y tendrán una densidad de 2400 kg/m³ (válido para toda la estructura prefabricada).

Respecto a las vigas y costaneras, se realizará una simplificación de estas y se considerarán vigas rectangulares con áreas iguales a las especificadas en los planos, esta simplificación se realiza para facilitar el desarrollo en el software. Esto reducirá los requerimientos computacionales del estudio y el modelo será menos complejo en su resolución. Finalmente, se presenta en la tabla 2 las áreas, inercia, resistencias y módulos de elasticidad del hormigón usado en este proyecto.

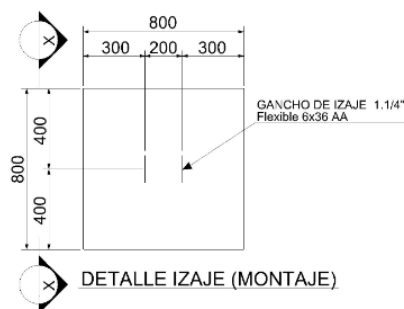


Figura 6: Detalle Columna 06 Altura 16.31 m
Fuente: SalfaMontajes

Tabla 2: Detalle de propiedades estructurales y geométricas de hormigones usados en la estructura
Fuente: SalfaMontajes

Elemento	Área [m^2]	I_z m^4	Resistencia f'_c Hormigón [MPa]	Modulo de Elasticidad [kg/m^2]
Fundación Parte Inferior	3.60	0.192	30	2972540000
Fundación Parte Superior	2.43	0.158	30	2972540000
Columnas	0.640	0.034	40	3323400000
Vigas	0.425	0.030	55	3485610000
Costaneras	0.0564	0.003	55	3485610000

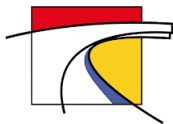
3. Marco Teórico

3.1. Estado del arte

Las estructuras requieren generalmente algún elemento estructural que tenga contacto directo con el suelo. Para poder estimar correctamente la respuesta de la superestructura es necesario considerar la respuesta del suelo soportando a la estructura, y esto está muy bien descrito por el análisis de la interacción suelo - estructura (SSI). Varios intentos se han hecho por varios investigadores (Anand y Satish Kumar, 2018) para modelar los problemas de SSI analíticamente, sin embargo, la no linealidad, las interfases de la fundación y las condiciones de borde han hecho el problema más complicado y más costoso computacionalmente.

La respuesta de la estructura a los movimientos producidos por los terremotos se ve influenciada por el trabajo de tres sistemas conectados: la estructura, la fundación y el suelo que rodea a esta estructura. El análisis de la interacción suelo - estructura evalúa la respuesta colectiva de estos sistemas para un evento específico. Este concepto es usado para describir estos efectos en la literatura (Building Seismic Safety Council, 2009).

Uno de los desafíos clave del estudio de la interacción suelo - estructura es dado por la complejidad y variabilidad de las propiedades de los suelos. El suelo es un material heterogéneo, con propiedades que pueden variar en gran medida dependiendo de factores tales como composición, estructura y el grado de humedad que pueda existir en el suelo. Esto hace compleja la predicción del comportamiento del suelo bajo distintas condiciones de carga, y con esto, desarrollar modelos de interacción suelo estructura.



Respecto al uso en la práctica de la ingeniería de los estudios de interacción suelo - estructura, esta se ve obstaculizada por una bibliografía difícil de entender y códigos y normas que tienen orientaciones limitadas sobre estos temas. Es por esto que el National Institute of Standards and Technology (NIST) crea una guía para el cálculo para la implementación de la interacción suelo - estructura en análisis (Stewart *et al.*, 2012).

Los métodos disponibles para analizar problemas de SSI se dividen en dos grupos: el método directo y el método de subestructuración. En el método directo (Turner, 1959) de análisis SSI, el sistema completo de suelo - estructura es resuelto con un movimiento de campo libre como información del sistema (Anand y Satish Kumar, 2018). La respuesta de este sistema acoplado es usada en una segunda etapa de análisis obteniendo la respuesta estructural del sistema. Esto da como resultado un aumento de grados de libertad (DOF) y el esfuerzo computacional, aunque el método directo en si es más eficiente computacionalmente (Ray *et al.*, 2022).

En el método de subestructuración, se divide el sistema en varias subestructuras que se resuelven de forma independiente. Al final, se combinan las soluciones para obtener la respuesta de la estructura completa. Debido a que el medio del suelo semi-infinito no se necesita discretizar en este método, resulta más eficiente y menos demandante computacionalmente que el método directo. Además, al subdividir el problema complejo en múltiples problemas más simples, se puede elegir una estrategia de modelado más eficiente para cada uno, lo que es especialmente útil para realizar estudios paramétricos. A diferencia del método directo, en el método de subestructuración, los componentes cinemáticos e inerciales se consideran por separado mediante el uso de funciones de transferencia e impedancia respectivamente (Anand y Satish Kumar, 2018).

3.2. Descripción del problema

Las estructuras en Chile se ven sometidas a variados eventos sísmicos a lo largo de su vida útil, es por esto que toda estructura debe estar preparada para evitar el colapso ante eventos sísmicos más severos que el sismo de diseño (INN, 2003).

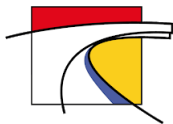
Los daños a las estructuras y el equipamiento en galpones industriales depende de las características del movimiento producido por el terremoto en el suelo, las características de la estructura o el equipamiento y las condiciones locales del suelo. Generalmente el término más usado en la práctica para estudiar como el sismo afecta a la estructura es el peak ground acceleration, más conocido como PGA.

Zonas de falla observadas en un estudio a un galpón industrial de hormigón armado en Chile (Sotillo, 2020) sometida al terremoto del 27/02/2010 indican que estas fallas se producen en zonas críticas de trabajo, estas son:

- Desplazamiento y asentamiento de fundaciones
- Fallas en las conexiones viga - columna
- Fallas en vigas y columnas
- Fallas de concreto por rótulas plásticas en la base de las columnas.
- Fallas en revestimientos exteriores de hormigón

Es por esto entonces que es imperativo poder hacer un análisis más profundo sobre lo que ocurre en el galpón industrial en estudio.

La estructura “Nave de Lavados” es una de las 11 estructuras principales a construir en el proyecto EPC Plataforma Cota 3.700 de CODELCO Andina. La “Nave de Lavados” mostrada en la figura 3 tiene 38.5 metros de largo, 25 metros de ancho y 19.9 metros de alto desde la base de la fundación.



Esta presenta elementos de hormigón prefabricado y juntas húmedas para su estructura principal. La estructura en su conjunto trabajará como una estructura monolítica para efectos prácticos.

Las excavaciones para las fundaciones de esta estructura son consideradas localmente y estas dado a su tamaño serán seccionadas para la movilización. La fundación tendrá un emplantillado de 5 centímetros y se colocarán laminas de acero con espesor de 10 milímetros que ayudarán a corregir niveles y ajustarán tolerancias de montaje.

Las propiedades del suelo donde será construido el galpón tienen un grado de variabilidad alto, estas, resistencia al corte y rigidez, pueden variar significativamente debido a factores como el contenido de humedad, la densidad y la composición del suelo. Estas variaciones afectan al comportamiento del suelo y la forma en que soporta la estructura. Esta variabilidad en el comportamiento del suelo genera problemas a la hora de estudiar este galpón y es por esto que se realiza un análisis de interacción suelo - estructura para uno de sus ejes.

El suelo en el que será fundada esta estructura es un suelo de tipo Lastre, un remanente de residuos mineros compactado clasificado como suelo tipo III. Este suelo tiene una estratigrafía irregular y es por esto entonces que se busca analizar la “Nave de Lavados” y su interacción con el suelo y como afecta la respuesta del sistema suelo estructura ante un evento sísmico. ¿Resistirán las zonas críticas de la estructura? ¿Cómo se comporta la estructura lineal con un modelo lineal de suelo?. ¿Cuáles son las respuestas máximas que experimentará la estructura con 80 simulaciones sometidas a un evento sísmico? ¿Cómo afecta al modelo en estudio la incertidumbre existente en el tipo de suelo Lastre? ¿Las bases de la estructura resistirán los eventos sísmicos modelados?. Estas preguntas se pretenden resolver con este estudio.

3.3. Calibración del modelo

Para poder realizar la modelación de la estructura interactuando con el suelo se realizan ciertas calibraciones para lograr una buena aproximación al comportamiento de este sistema.

Un modelo semi-infinito de suelo se refiere a la representación matemática del comportamiento del suelo que asume que el suelo se extiende indefinidamente en una dirección y tiene una profundidad finita en la otra dirección. Este tipo de modelo se usa para modelar el suelo bajo ciertas condiciones de carga, ya sea con estructuras y/o con efectos de terremotos.

Para poder calibrar este modelo semi-infinito de suelo se consideran las propiedades de suelo y también las condiciones de borde que condicionarán el comportamiento de este en el mundo real.

Para la calibración del suelo, usando OpenSees, se especifican las propiedades del tipo de suelo tales como su densidad, resistencia al corte y módulo de elasticidad. También se definen las condiciones de carga del modelo y las condiciones de borde.

La calibración del modelo se realiza modelando una columna de suelo unitaria, esto para poder asignar las condiciones de borde del sistema y poder general el modelo semi - infinito de suelo.

Los coeficientes de amortiguación de Lysmer se calculan según:

$$c_s = \rho V_s t_h \Delta l_i \quad (2)$$

$$c_p = \rho V_p t_h \Delta l_i \quad (3)$$



Las fuerzas nodales se usan para modelar la traslación de las ondas de corte entrantes verticales dentro del dominio de interés, estas fuerzas que se ubican en los bordes del modelo y se calculan con las ecuaciones mostradas a continuación:

$$F_i^b = 2c_s \dot{u}_g(t), \quad (4)$$

$$F_i^s = c_p \dot{u}_i^s(t), \quad (5)$$

$$F_i^r = \pm c_s \dot{u}_i^r(t). \quad (6)$$

Sobre las condiciones de borde comentadas en este documento hay que señalar que, al ser impuestas de esta manera, pueden absorber casi a la perfección las ondas de cuerpo con ángulos de incidencia superiores a 30° con respecto a la vertical, mientras que para ángulos menores esta imposición pierde su eficacia, incluidas las ondas superficiales (Kusanovic *et al.*, 2021).

Las ecuaciones 4, 5 y 6, las señales $\dot{u}_g(t)$ y $\dot{u}_i^s(t)$ representan la incidencia y el movimiento libre total del campo de suelo según la señal sísmica indicada en la figura 7. Se puede observar en el registro de aceleraciones que el máximo valor de aceleración es de $0,44g$. En la figura 8 se observa el modelo en Matlab de la columna unitaria de suelo.

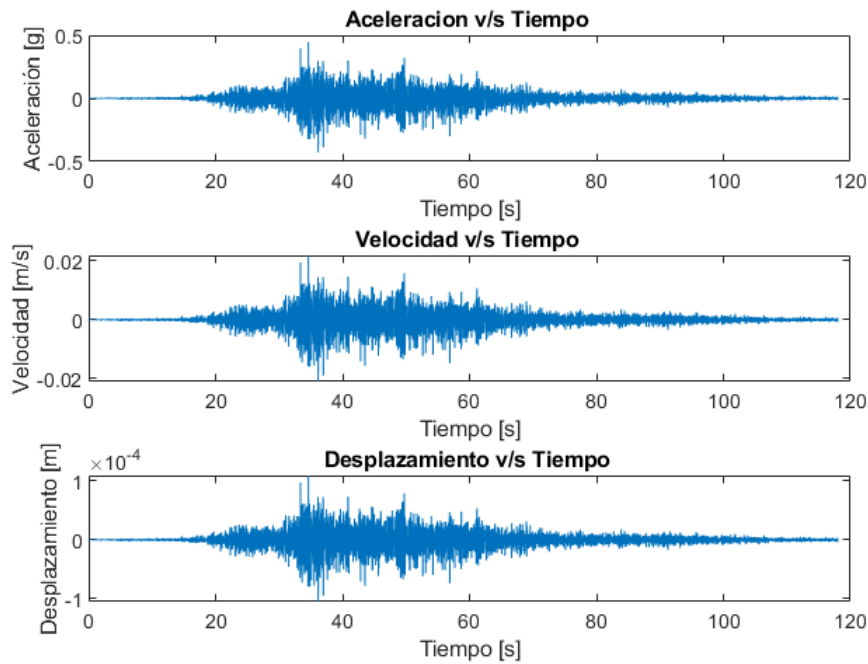


Figura 7: Detalle de aceleraciones, velocidades y desplazamientos del registro sísmico de Coquimbo en el año 2015
Fuente: CSN

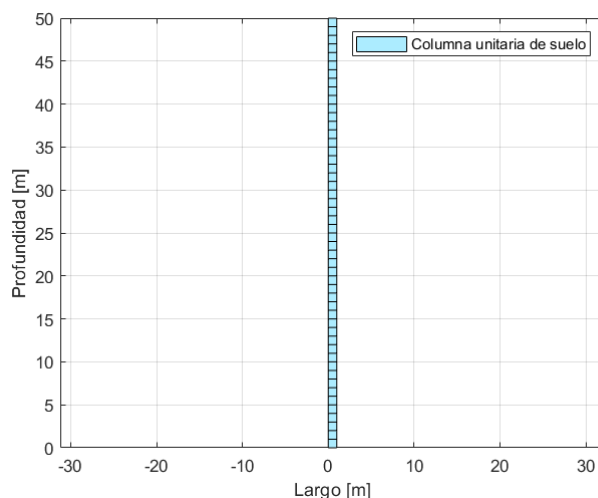
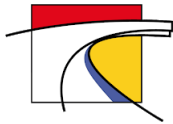


Figura 8: Detalle columna de suelo unitaria para obtener las fuerzas nodales del modelo general

Finalmente, utilizando una Ricker-wavelet se puede comprobar que el sistema cumple con las condiciones de borde de desplazamiento y de reflexión de onda. En la figura 9 se puede observar que el nodo superior izquierdo y el nodo superior derecho tienen el mismo desplazamiento para una señal cualquiera. En la figura 10 se puede observar que la velocidad de la onda en los nodos superiores es dos veces mayor que la velocidad en los nodos inferiores, indicando que existe una reflexión de la onda en estos puntos. En la figura 11 se puede observar que la velocidad en el eje y es despreciable al eje x, por lo que el modelo está bien calibrado respecto a los desplazamientos en dirección vertical.

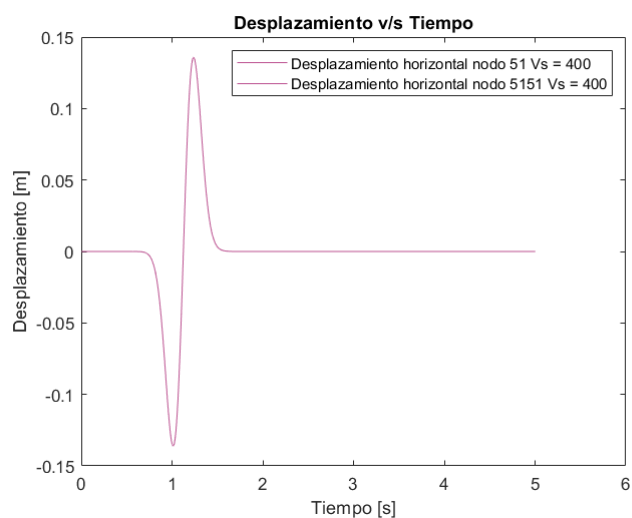


Figura 9: Detalle desplazamientos nodales modelo

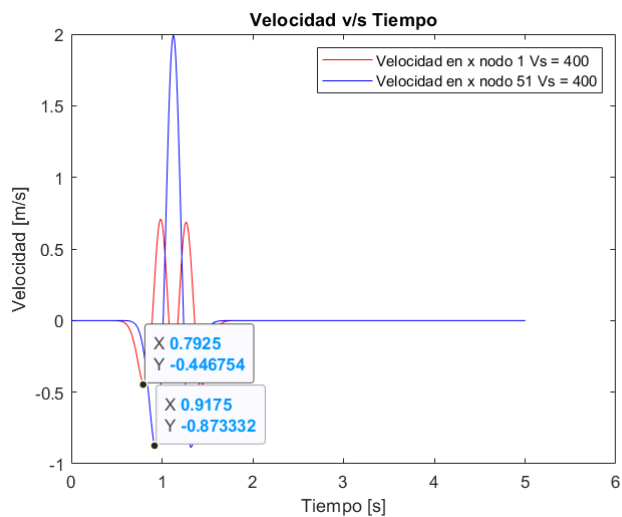
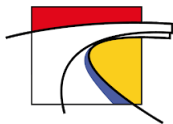


Figura 10: Detalle velocidades nodales modelo

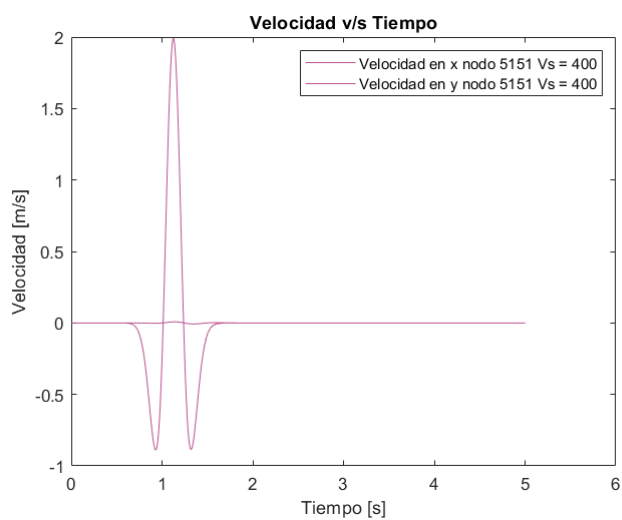
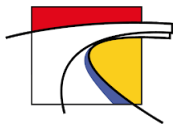


Figura 11: Detalle velocidades nodales en eje x-y modelo



4. Objetivos

4.1. Objetivos generales

El objetivo general de esta memoria es realizar un análisis de interacción suelo - estructura a un galpón industrial de hormigón armado prefabricado. Estos resultados buscan entregar información sobre el comportamiento del suelo y la estructura provocado por sismos cuando parámetros inciertos son considerados.

4.2. Objetivos específicos

Los objetivos específicos se presentan en los siguientes puntos:

- Determinar cambios en la respuesta a nivel operacional que pueda presentar la nave dado un sismo.
- Analizar la respuesta de la estructura con distintos escenarios a estudiar. La estructura y suelo lineales con parámetros incierto en una muestra de 80 modelos con parámetros variables.

5. Metodología

En este proyecto buscamos modelar tanto el galpón industrial como el suelo en donde se encuentra ubicado, todo esto en 2D. Las variables que observamos en este trabajo es principalmente la estructura del suelo, en donde el comportamiento de este será variable. La incertidumbre que existe en cuanto a la estratigrafía lleva a analizar distintos casos y poder compararlo a la situación actual del suelo según los estudios de mecánica de suelos. Los valores a observar se asocian a las aceleraciones y desplazamientos que sufre la estructura dado un evento sísmico aplicado en el espacio de suelo modelado.

El espacio a utilizar de suelo es un rectángulo de dimensiones $L_x = 100 \text{ m}$ y $L_y = 50 \text{ m}$ con estratos separados de forma proporcional a la velocidad de corte que se les asigna según el estudio de mecánica de suelos (IDIEM, 2019). El suelo consta de 101 nodos en el eje x y 51 nodos en el eje y, con un total de 5151 nodos en el suelo, estos nodos tienen una distancia de separación de 1 metro tanto vertical como horizontalmente. La estructura consta de 27 nodos donde se generan las fundaciones, vigas y columnas. Además se generan elementos adicionales en Matlab para representar las fundaciones. Este esquema se presenta en la figura 12

Las pruebas que se realizan en el proyecto consiste en, una vez modelado el suelo junto con la estructura, aplicar distintos casos con velocidades de corte para el suelo distintos, simulando distintos casos para analizar el comportamiento de la estructura. Una vez realizados estos casos y la data es colectada, se procede a analizar la respuesta y comentar los resultados obtenidos tratando de responder las preguntas presentadas en 3.2.

El modelo a realizar trabaja con las condiciones absorbentes de Lysmer (Kusanovic *et al.*, 2021)(Assimakis, 2004) que previenen el reflejo de las ondas de corte y dilatación que se propagan hacia el exterior de la estructura en el modelo, esto se hace mediante amortiguadores de Lysmer que son adaptados en los grados de libertad de los nodos en los límites del suelo y fijándolos en el otro extremo con un coeficiente de amortiguación de Lysmer C_s y C_p . También se incorporan fuerzas nodales $F_i^b - F_i^s - F_i^r$ en función de la velocidad de un evento sísmico y los coeficientes de amortiguación de Lysmer, estas fuerzas se aplican en los bordes del suelo para aproximar artificialmente una interfaz transparente para las ondas entrantes y salientes. Cabe destacar que se podrá observar como el suelo generará amortiguamiento por radiación.

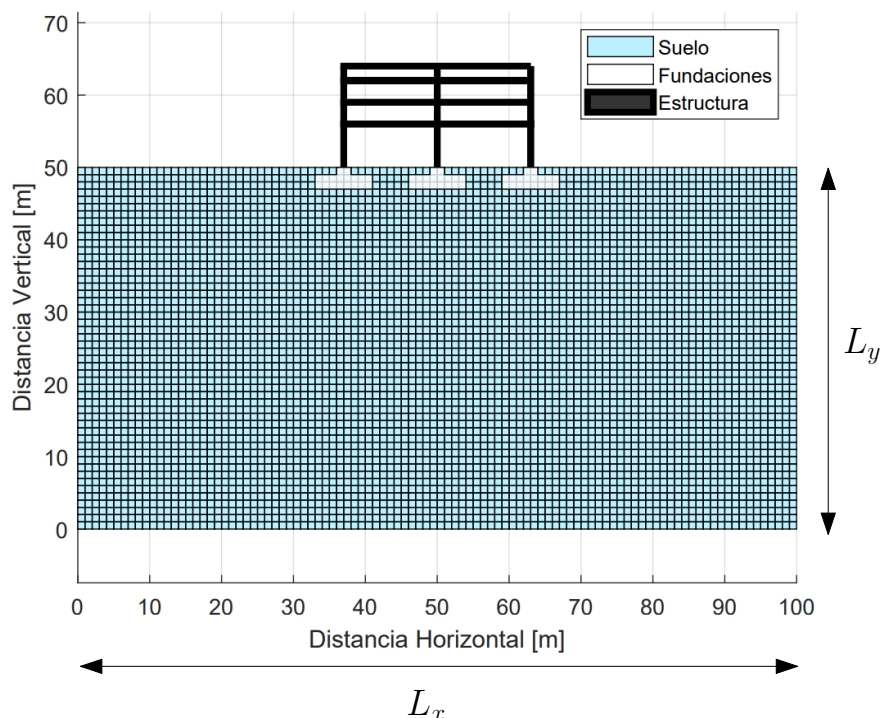


Figura 12: Detalle de mallado en Matlab

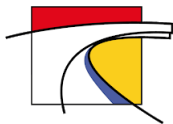
El amortiguamiento por radiación es un tipo de amortiguamiento que ocurre en las estructuras cuando los componentes estructurales vibran u oscilan. En el contexto de la interacción suelo - estructura, esto se refiere al efecto de amortiguación que se produce cuando el suelo alrededor de la estructura absorbe y disipa energía de las vibraciones de la estructura. El amortiguamiento del suelo se calcula realizando un modelo en Opensees del suelo junto con una columna de hormigón, a este modelo se le aplica una fuerza lateral y mediante la ecuación de decaimiento exponencial se calcula el porcentaje de amortiguamiento que brinda el suelo a la estructura, en este caso se obtiene un amortiguamiento de un 7%. Los cálculos se presentan en el anexo 8.4

Para modelar esta estructura se utiliza el software OpenSees mediante la generación del código con Matlab, el suelo se modela con el comando *Quad Element* que se usa para construir un elemento cuadrilátero de 4 nodos que utiliza una formulación isoparamétrica bilineal³

Para separar los estratos de suelo y asignar las propiedades que entrega el informe de mecánica de suelos se utiliza el comando *nDMaterial*, este comando se utiliza para construir un objeto NDMaterial que representa la relación tensión-deformación en el punto de Gauss de un elemento continuo. Para modelar las fundaciones se asignan a los *quads* que están en la zona de las fundaciones los valores correspondientes al hormigón de estas, permitiendo modelar de mejor forma la interacción del suelo con las fundaciones y para lograr una unión correcta entre las fundaciones y las columnas, se utiliza el comando *equal DOF*. Este comando permite que ciertos DOF's de dos o más nodos en un FEM sean forzados a tener el mismo desplazamiento.

El comando *unialMaterial* se utiliza para modelar el comportamiento de los elementos estructurales, este comando construye un objeto UniaxialMaterial que representa relaciones uniaxiales de tensión-deformación (o fuerza-deformación). Este comando permite especificar las propiedades del material del elemento estructural, como el módulo de Young y el límite elástico, y también, definir la respuesta

³Se refiere a la forma específica en que se define y modela el elemento. Los elementos isoparamétricos son un tipo de elemento finito que utiliza un conjunto coherente de sistemas de coordenadas (o "parametrizaciones") para definir la geometría del elemento y la ubicación de los puntos nodales.



de tensión - deformación del elemento bajo diferentes condiciones de carga.

Para modelar las condiciones de borde, en específico las condiciones absorbentes de Lysmer, se utiliza el comando *element zeroLength*, este comando se usa para construir un objeto de *zeroLength element* que está definido por dos nodos en la misma ubicación. Los nodos están conectados por varios objetos *UniaxialMaterial* para representar la relación fuerza-deformación del elemento.

Los elementos de hormigón se modelan con el comando *elasticBeamColumn*, este comando se utiliza para construir un objeto de elemento *elasticBeamColumn*. Los argumentos para la construcción de un elemento viga-columna elástico dependen de la dimensión del problema, en este caso se utiliza un modelo 2D.

El algoritmo utilizado para calcular el modelo es para un modelo lineal con el comando *Linear*, este comando se usa para construir un objeto de algoritmo lineal que toma una iteración para resolver el sistema de ecuaciones. La ecuación 7 presenta la forma de iterar de este algoritmo.

$$\Delta U = -K^{-1}R(U) \quad (7)$$

donde U: Desplazamiento, K: Matriz de rigidez efectiva y R: Cargas aplicadas.

El comando para el análisis del modelo es el *analysis Transient*, este especifica que el análisis posterior realizado por el programa será un análisis transitorio. El análisis transitorio es un tipo de análisis estructural que se utiliza para determinar la respuesta de una estructura a cargas variables en el tiempo o con condiciones de contorno. Este tipo de análisis se puede utilizar para simular la respuesta de una estructura a eventos dinámicos como terremotos o explosiones, o para evaluar el desempeño de una estructura a lo largo del tiempo.

Finalmente, con el comando *recorder* se registra la respuesta del modelo suelo-estructura en estudio. Este comando permite especificar que tipo de resultado registrar en un archivo de salida tales como desplazamientos, velocidades, aceleraciones, fuerzas, esfuerzos, reacciones, derivas de piso, entre otros.

En el anexo 8.5 se presenta la tabla de velocidades de onda de suelo que se consideraron en este análisis. Se realizó un código en Matlab que entregara 80 muestras con un promedio de 350 m/s y una desviación estándar de un 40 %. Destacar que al ser valores aleatorios que elige Matlab, en varios casos se repite el valor de V_s y se considera como uno solo en las mediciones.

Con los resultados obtenidos por OpenSees para el total de casos analizados, se realizan gráficos tipo Boxplot con Matlab en los que podemos observar, por ejemplo, en la figura 13 que las fuerzas en la columna 1 de la estructura son máximas para los modelos 45 al 69, donde el V_s se presenta de menor a mayor en el eje x. Las V_s asociadas al eje x se detallan en el anexo 8.5. La estructura presenta un máximo de fuerza de corte en la columna C1 de 20766 [N] para el modelo 59. Estos valores máximos representan el comportamiento que tiene la estructura para los valores de V_s en los rangos 360 a 480 m/s.

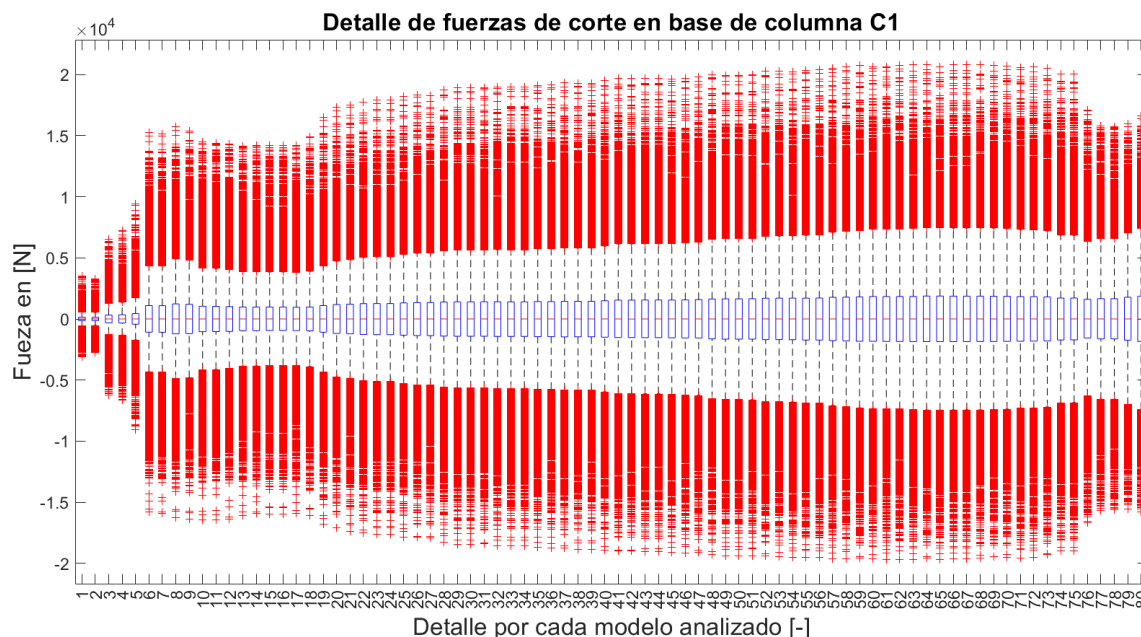


Figura 13: Boxplot de las fuerzas de corte obtenidas en la base de la columna 1 de la estructura con el modelo lineal de estructura en Opensees

En la figura 14 se observa los resultados para las fuerzas para un punto de control de 4 velocidades de onda. Estos son para 200, 300, 400 y 500 m/s. En concordancia con los valores obtenidos en la muestra de 80 modelos, los valores extremos por debajo de 250 y sobre 500 m/s se descartan dada la información obtenida por el estudio de mecánica de suelos dado que los primeros 15 metros de profundidad tienen velocidades máximas de hasta 425 m/s aproximadamente, estos metros iniciales de suelo son los más importantes para el análisis (Kramer, 1996) incluso cuando las velocidades de propagación a mayores profundidades son mayores. Considerar que entre los 15 y 30 metros de profundidad existe una velocidad de propagación medida máxima de hasta 525 m/s, por lo que se considera razonable el criterio nombrado anteriormente.

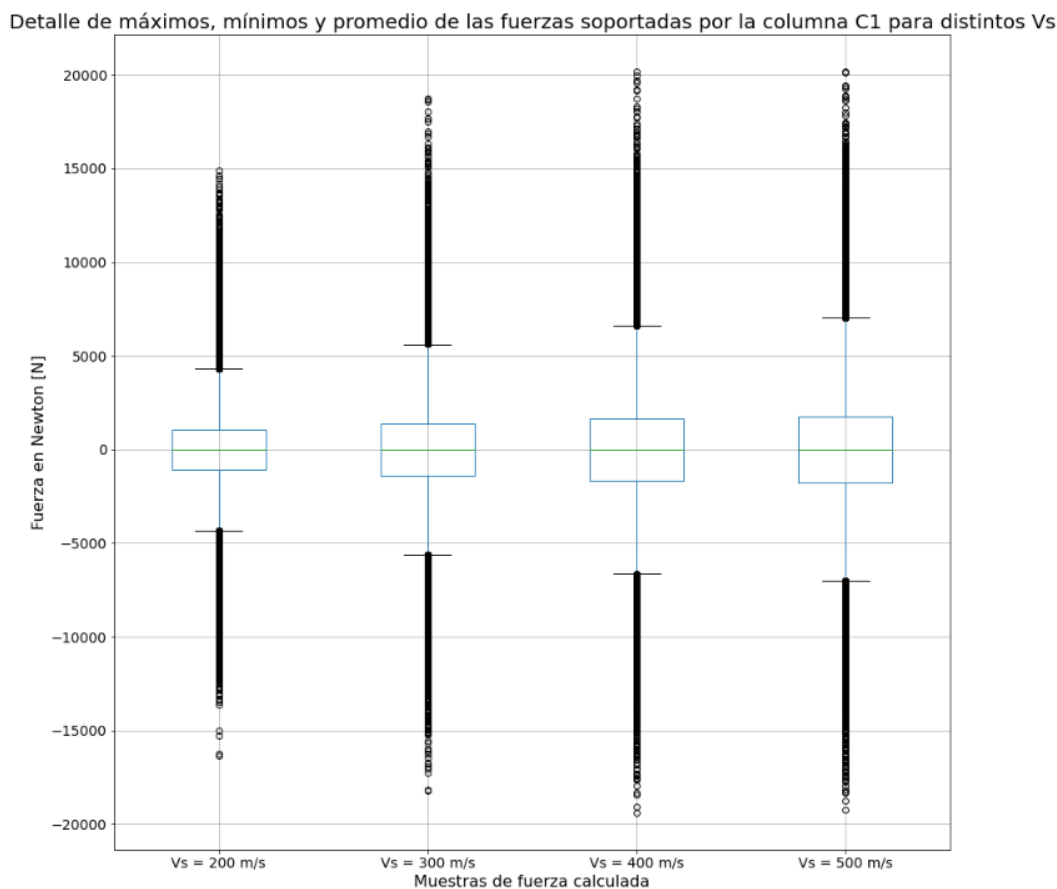


Figura 14: Boxplot de las fuerzas de corte obtenidas en la base de la columna 1 de la estructura con el modelo lineal de estructura en Opensees

Según la Memoria de Cálculo de la Nave de Lavados, las fuerzas de corte que soporta la estructura son valores del orden de los 60.000 kgf por columna, por lo que los valores obtenidos entran en un rango favorable para la estructura.

En las figuras 13 y 14 se presentan valores extremos en los boxplots. Estos valores son esperados dada la cantidad de datos evaluados en estas simulaciones, 24.000 datos por cada V_s evaluada. Se observa que, los valores que se encuentran en los cuartiles 1, 2, 3 (línea superior, línea media y línea superior respectivamente de la “caja” del gráfico) y los valores máximos y mínimos no atípicos del total de datos, son crecientes pero no sufren variaciones entre las distintas muestras, sin embargo, los valores extremos presentados fuera de los rangos máximos son los que aumentan en mayor proporción a medida que los valores de V_s son cercanos al rango 360-480 m/s.

A continuación se presenta una tabla con la probabilidad de que, para todos los eventos calculados, los valores de fuerza de corte en la columna C1 sobrepasen los 5.000, 8.000, 10.000 y 12.000 Newton.

Tabla 3: Detalle de porcentajes de probabilidad que la fuerza que recibe la columna C1 ante el evento sísmico modelado supere valores de fuerza de corte referenciales

Valor de Fuerza de Corte [N]	Probabilidad [%]
5.000	3.15
8.000	0.7270
10.000	0.2519
12.000	0.0747

Respecto a los desplazamientos de la estructura, el drift calculado para cada una de los V_s se presenta en la figura 15 para las velocidades de onda de 200, 300, 400 y 500 m/s, mientras que en la figura 16 se presenta el conjunto de modelos con el drift calculado.

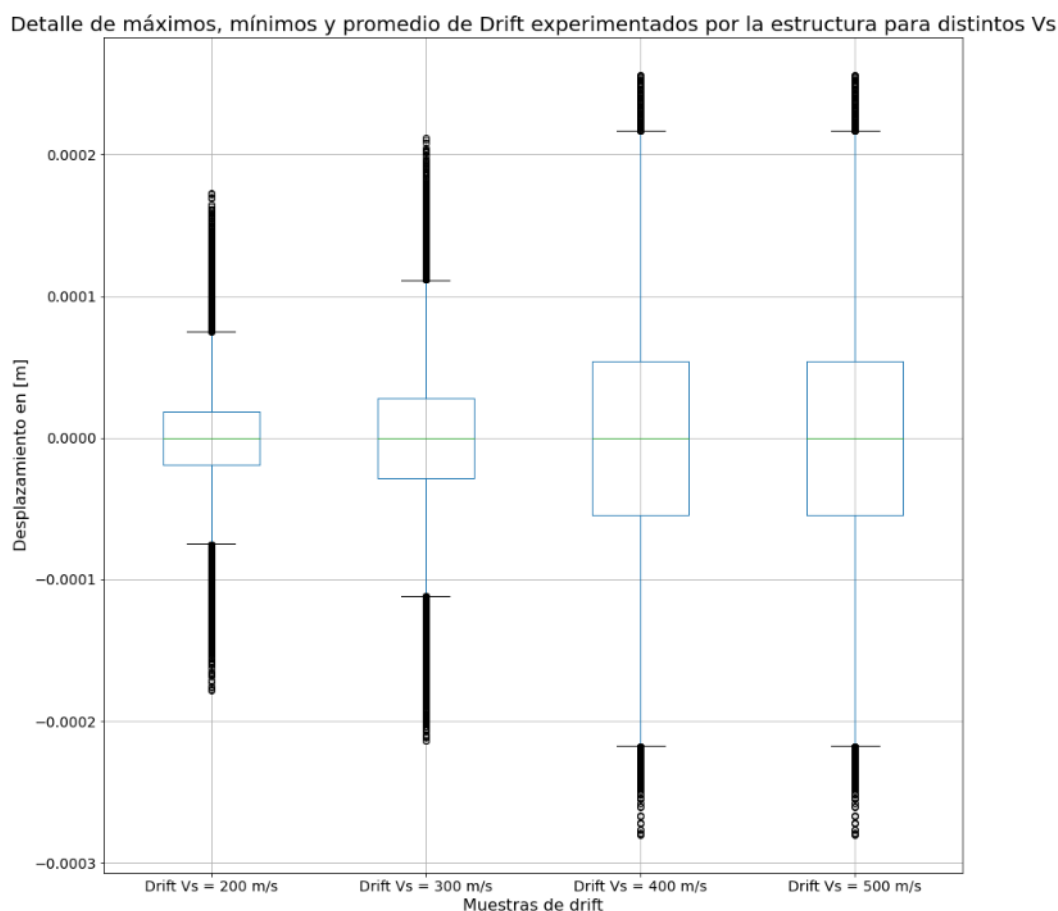


Figura 15: Boxplot de los drift obtenidos con el modelo lineal de estructura en Opensees

Los drift experimentados en la estructura se pueden explicar dado que la distribución de fuerzas cortantes en una estructura depende no solo de la forma y la rigidez de la estructura, sino también de la resistencia del suelo y la intensidad del movimiento sísmico. Hay casos en donde la estructura puede experimentar grandes drift y bajas fuerzas de corte debido a una respuesta suave del suelo, como también puede experimentar grandes fuerzas cortantes y menores drift debido a una respuesta rígida del suelo (Vamvatsikos y Cornell, 2002) (FEMA, 2009). Es por esto que la relación entre el drift obtenido y la fuerza cortante puede no ser vinculante, sin embargo podemos observar que la mediana de los datos y los cuartiles 1 y 3 se mantienen parejos para los drift más altos y que a medida que los valores de V_s aumentan, existen menos outliers en los modelos, lo que puede indicar una menor variabilidad en los drift de la estructura y por ende podría explicar una respuesta sísmica más uniforme y con un comportamiento sísmico más predecible, lo que sería positivo respecto a la seguridad y durabilidad de los elementos estructurales.

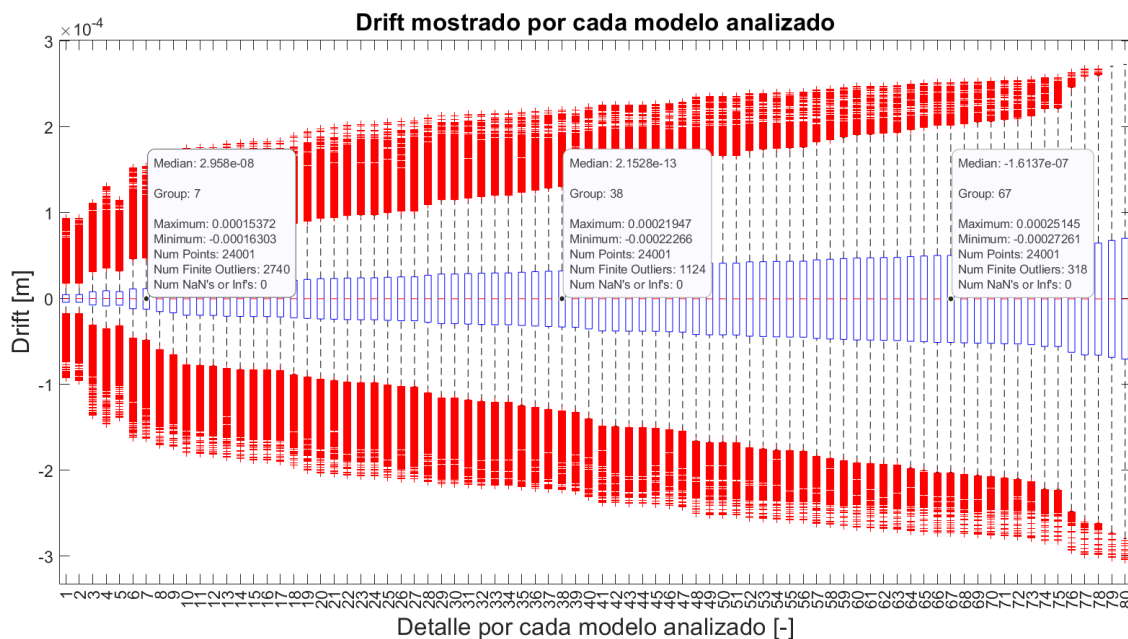


Figura 16: Boxplot de los drift obtenidos con el modelo lineal de estructura en Opensees

Los desplazamientos en el eje x experimentados por la estructura presentan medianas variables, no así como en los drift. En este caso la mediana tiene una variación significativa a medida que se aumenta el valor de V_s , tendiendo a cero como se puede observar en el gráfico 17. La mayor cantidad de outliers se presentan en la zona intermedia de la medición, esto puede expresar que la estructura presenta desplazamientos no uniformes para las velocidades de onda de suelo entre los modelos 30 y 60 (ver anexo 8.5).

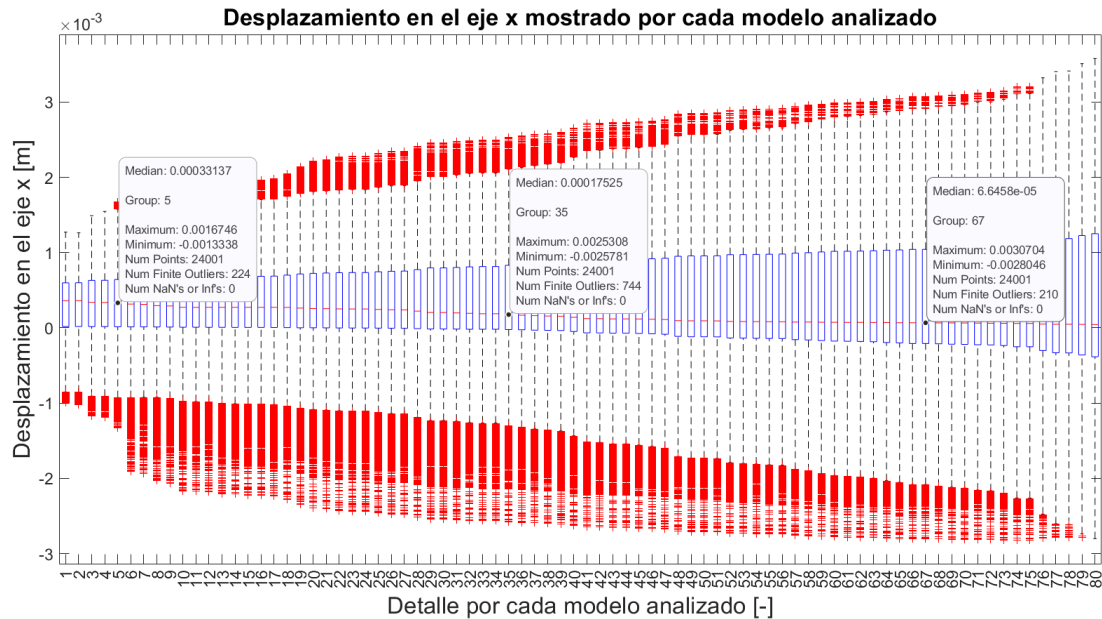


Figura 17: Boxplot de los desplazamientos en el eje x obtenidos con el modelo lineal de estructura en Opensees

Respecto al giro de las fundaciones, cuando una estructura está sujeta a cargas, se producen deformaciones en la base de la estructura y en el suelo sobre el que está apoyada. Si el suelo es blando, como en el caso de un suelo con un bajo V_s , las deformaciones en el suelo pueden ser significativas y pueden causar un mayor giro de la fundación de la estructura. Por otro lado, si el suelo es rígido, como en el caso de un suelo con un alto V_s , las deformaciones en el suelo son menores y la fundación de la estructura gira menos. En el caso de la figura 18 podemos observar que a medida que aumenta el V_s los giros disminuyen, el máximo valor de giro tiene un valor de giro es de 0.003° .

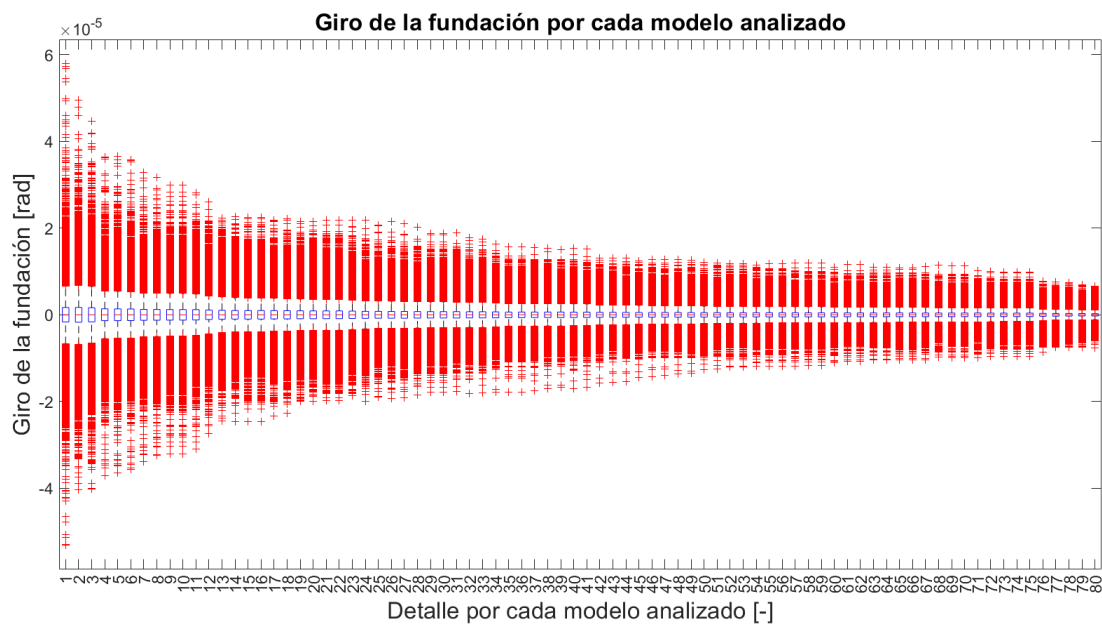
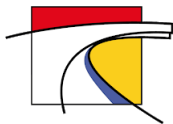


Figura 18: Boxplot de los giros experimentados por la fundación 1 (base columna 1) con el modelo lineal de estructura en Opensees



Finalmente, obtenemos los histogramas de la distribución de velocidades de propagación de onda de corte del suelo y la distribución de las fuerzas medidas en la estructura en las figuras 19 y 20 respectivamente.

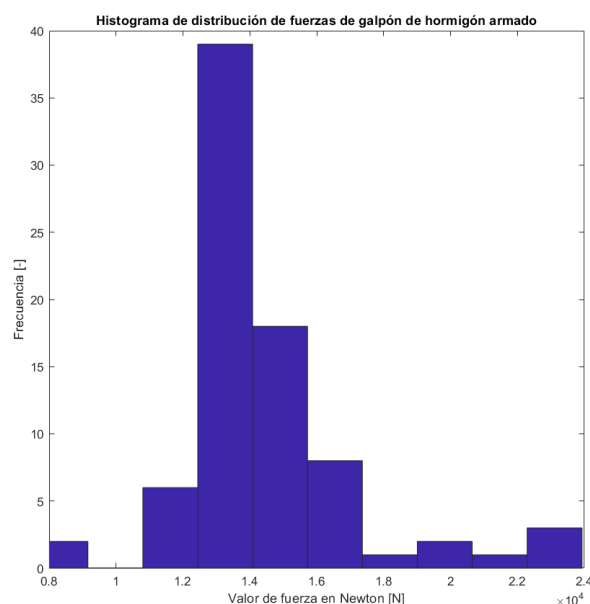
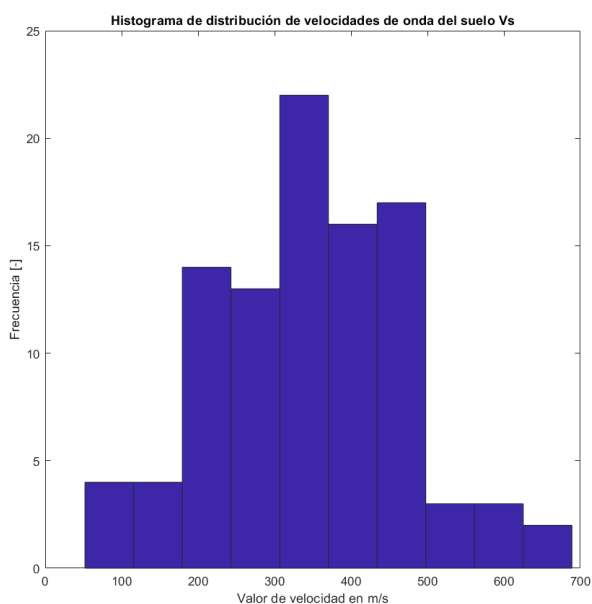


Figura 19: Detalle de distribución de velocidades de propagación de onda de corte en el suelo Figura 20: Detalle de distribución de fuerzas en la estructura según la variación de velocidades de propagación de onda de corte del suelo

Se sabe según el estudio de mecánica de suelos que la distribución de velocidades de propagación de onda de corte del suelo es una distribución Normal, mientras que la distribución de las fuerzas que soporta la estructura tienen una distribución Weibull según se presenta en la figura 21.

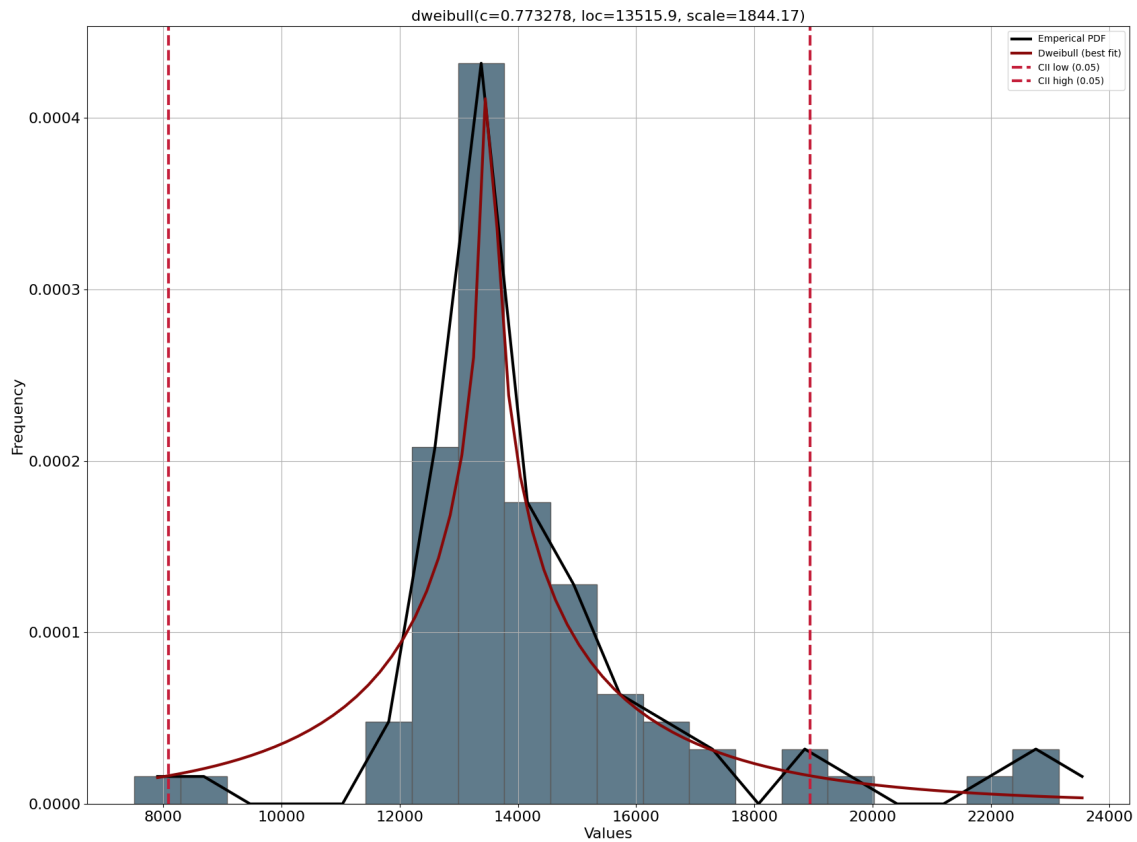
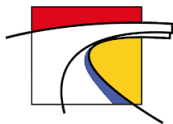


Figura 21: Distribución de probabilidad ajustada utilizando el método de máxima verosimilitud con el paquete *distfit*. La distribución Weibull se ajusta mejor a los datos.

Para obtener la distribución asociada a la respuesta de la estructura, se puede utilizar el paquete de Python llamado *distfit*. Este paquete utiliza el método de máxima verosimilitud para ajustar diferentes distribuciones de probabilidad a los datos proporcionados, y así determinar cuál de ellas ofrece el mejor ajuste. Para evaluar el ajuste, se utilizan varios criterios, incluyendo el estadístico de Kolmogorov-Smirnov, la distancia de Kullback-Leibler y la entropía cruzada. Estos criterios permiten comparar la calidad de ajuste de diferentes distribuciones y seleccionar la que mejor se adapta a los datos. En este caso, el análisis muestra que la distribución Weibull se ajusta mejor a los datos.



6. Conclusiones

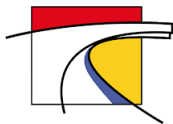
En base a los resultados del análisis de interacción suelo - estructura realizado a la estructura en estudio, se puede realizar las siguientes conclusiones:

La velocidad de propagación de onda del suelo es una medida de la velocidad a la que las ondas sísmicas se propagan a través del suelo. Esta es un factor importante en la respuesta sísmica de la estructura por que estas afectan en cómo las ondas sísmicas se propagan a través del suelo y cómo interactúan con la estructura, lo que a su vez puede influir en la respuesta y el comportamiento de la estructura durante un terremoto. En este estudio, se encontró que la estructura experimentó fuerzas y desplazamientos mayores cuando la velocidad de propagación de onda del suelo fue cercana a los 400 m/s como se puede observar en la figura 13 y 14 en comparación con otras velocidades de propagación de onda del suelo consideradas en los rangos de estudio. En este estudio se sacaron de la medición valores bajo 250 m/s y sobre 500 m/s dado que los valores medidos de velocidades de propagación de onda del suelo en los estudios de terreno estaban entre estos valores y no fuera para los primeros metros de suelo, sin embargo se tomaron en cuenta en los modelos para efectos de análisis. Las fuerzas y el drift de la estructura son influenciados por la velocidad de propagación de onda del suelo. En general, una mayor velocidad de propagación de onda del suelo puede resultar en una respuesta similar a una estructura de base rígida, lo que puede llevar a mayores fuerzas y drift de entrepisos, sin embargo hay casos a considerar dependiendo de las propiedades de la estructura y del suelo.

Los resultados del análisis indican que las fuerzas y el drift fueron mayores cuando la velocidad de propagación de onda del suelo fueron aumentando respecto a velocidades más bajas (200 y 300 m/s) y velocidades más altas (500 m/s) para los modelos estudiados con esos valores exactos, sin embargo con la muestra superior se pudo observar que estos valores crecían a medida que el V_s aumentaba, sin embargo esto se puede deber a las consideraciones comentadas en la sección 5. Esto puede deberse a que la velocidad de propagación de onda del suelo cercana a los 400 m/s se encuentra en una “zona crítica”, donde la respuesta sísmica de la estructura es particularmente sensible a tal velocidad de propagación de onda. En otras palabras, la velocidad de propagación de onda del suelo que se encuentra entre los 400 y 500 m/s se podría considerar como velocidad crítica para la estructura, dado que según la información entregada en los gráficos de la sección 5 las mayores fuerzas y drift encontrados en el análisis se encuentran entre estas dos velocidades, pudiendo tener un gran impacto en la respuesta sísmica de la estructura si es sometida a mayores cargas dinámicas. Los valores superiores de V_s en este caso saldrían de las consideraciones de zona crítica dado que esos valores no se encuentran en el rango de mediciones de los estudios de suelo.

Según las memorias de cálculo presentadas, la estructura al ser sometida al sismo de análisis no presentaría fallas en las bases de las columnas, esto se puede observar según las fuerzas obtenidas en la figura 13 donde para cada una de las velocidades de propagación de ondas de corte, la fuerza registrada en el software es menor a las fuerzas admisibles que tiene la estructura según se indica en la sección 5. La variabilidad del suelo puede afectar la precisión de los resultados del análisis de interacción suelo-estructura. Sin embargo, este estudio proporciona una aproximación de cómo se comportará la estructura en respuesta a las cargas sísmicas. Los periodos del suelo y de la estructura son factores importantes a considerar en el análisis de interacción suelo-estructura. Estos periodos pueden afectar significativamente la respuesta sísmica de la estructura y, por lo tanto, deben ser cuidadosamente evaluados en el diseño sísmico.

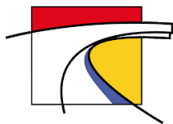
Al analizar el giro de la estructura en la fundación 1, que es la base de la columna 1 evaluada, se puede concluir que los valores obtenidos no presentan una amenaza significativa para el correcto funcionamiento de la estructura. Aunque los giros máximos calculados son bajos, es importante destacar que estos resultados muestran una tendencia clara: a medida que aumenta el valor de V_s , los giros disminuyen. Esto se puede explicar debido a que la rigidez del suelo influye directamente en la magni-



tud de los giros que la estructura puede experimentar alrededor de su base. No obstante, es necesario considerar que existen otros factores que pueden influir en estos giros, como por ejemplo condiciones de carga externas no consideradas en este estudio.

Finalmente, tras analizar los resultados de las distribuciones de probabilidad presentados en la sección 5, se puede concluir que la variabilidad en las propiedades del suelo puede provocar incertidumbre en la interacción entre el suelo y la estructura. Esta incertidumbre, que surge debido a la heterogeneidad del suelo, puede dar lugar a una falta de precisión en la respuesta sísmica de la estructura. En consecuencia, es importante tener en cuenta la variabilidad del suelo al evaluar la capacidad de una estructura para resistir los efectos de un terremoto y adoptar medidas de seguridad adecuadas.

Se considera que este estudio trata un modelo simplificado en 2D de una estructura de hormigón armado prefabricado sometido a un evento sísmico, los resultados de este estudio no consideran la complejidad de la geometría 3D del subsuelo y las heterogeneidades del mismo. En este estudio, las capas de suelo se consideran homogéneas en la sección horizontal y no consideraron variabilidad en este eje, solo en el vertical. También este modelo 2D simplificado no considera características geotécnicas importantes como presencia de fallas activas, estratos de suelo con variabilidad de rigidez en el eje horizontal, falla en la compactación del suelo dado su condición especial de tipo Lastre, entre otros.



7. Bibliografía

Referencias

- Anand, V. y Satish Kumar, S. R. (2018). Seismic soil-structure interaction: A state-of-the-art review. *Structures*, 16.
- Assimaki, D. (2004). *Topography Effects in the 199 Athens Earthquake: Engineering Issues in Seismology*. Tesis doctoral, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Civil and Environmental Engineering.
- Building Seismic Safety Council (2009). *NEHRP Recommended Seismic Provisions for New Buildings and Other Structures*. Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C., 2009 edición.
- Das, B. M., García, M. L., y Leon, C. J. (2015). *Fundamentos de Ingeniería Geotécnica*. Cengage Learning.
- FEMA (2009). Quantification of building seismic performance factors, fema p-695. Technical Report P-695, Department of Homeland Security, Washington, DC.
- IDIEM (2019). Informe mecánica de suelos 4501797129-00000-infms-00021. Technical report, Universidad De Chile.
- INN (2003). Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales (nch2369:2003). <https://www.inn.cl/>.
- Jiménez, G. A. y Dias, D. (2022). Dynamic soil-structure interaction effects in buildings founded on vertical reinforcement elements. *CivilEng*, 3(3).
- Kusanovic, D. S., Seylabi, E., y Assimaki, D. (2021). Optimization of frequency domain impedances for time-domain response analyses of building structures with rigid shallow foundations. *Earthquake Spectra*, 37(3):1955–1979.
- Ray, T., Baishya, S., y Devi, D. (2022). A state-of-the-art review on soil-structure interaction. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, 9(2):145–151.
- Sotillo, R. (2020). Structural assessment of an industrial rc structure damaged during 2010 chile earthquake. School Of Civil, Environmental And Urban Engineering, Politecnico Di Milano.
- Stewart, J., Crouse, C., Hutchinson, T., Lizundia, B., Naeim, F., y Ostadan, F. (2012). Soil-structure interaction for building structures (grant/contract reports nistgcr) - 12-917-21. Technical report, National Institute of Standards and Technology, U.S. Department of Commerce.
- Turner, M. J. (1959). The direct stiffness method of structural analysis.
- Vamvatsikos, D. y Cornell, C. (2002). Incremental dynamic analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31.
- Wilkinson, S. y Hiley, R. (2006). A non-linear response history model for the seismic analysis of high-rise framed buildings. *Computers & Structures*, 84.

8. Anexos

8.1. Ejes Nave Lavados

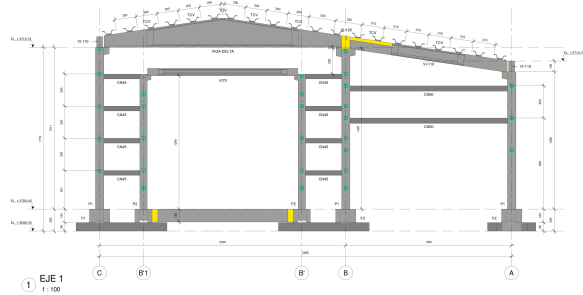


Figura 22: Detalle Eje 1 Nave de Lavados
Fuente: SalfaMontajes

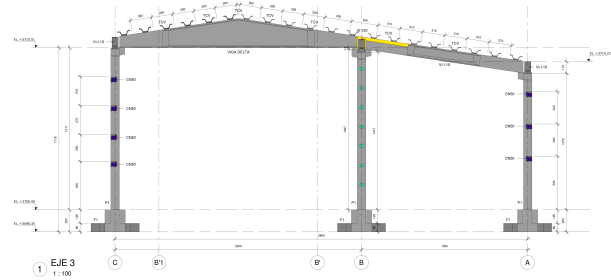


Figura 23: Detalle Eje 3 Nave de Lavados
Fuente: SalfaMontajes

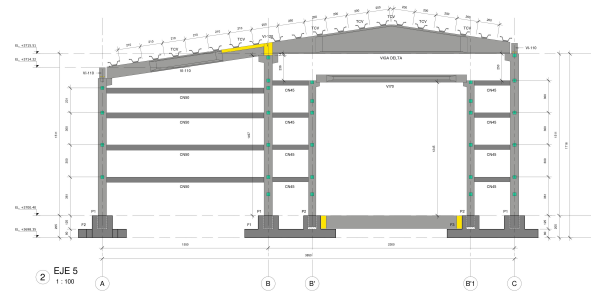


Figura 24: Detalle Eje 5 Nave de Lavados
Fuente: SalfaMontajes

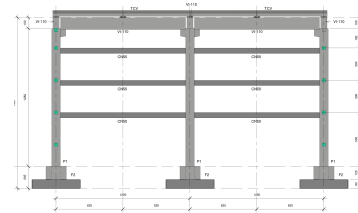


Figura 25: Detalle Eje A
Fuente: SalfaMontajes

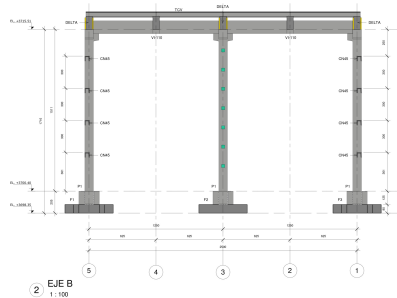


Figura 26: Detalle Eje B
Fuente: SalfaMontajes

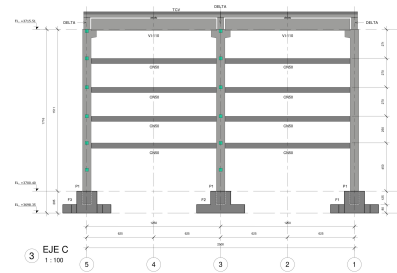


Figura 27: Detalle Eje C
Fuente: SalfaMontajes

8.2. Detalle fundaciones

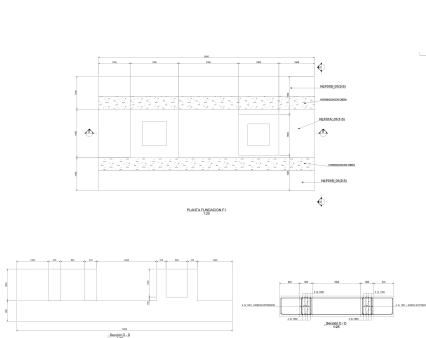


Figura 28: Detalle Fundación
01
Fuente: SalfaMontajes

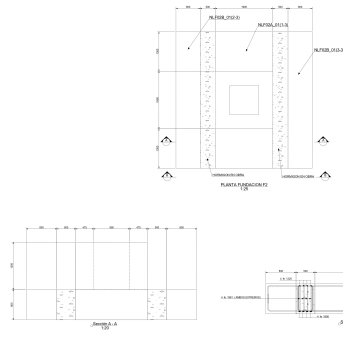


Figura 29: Detalle Fundación
02
Fuente: SalfaMontajes

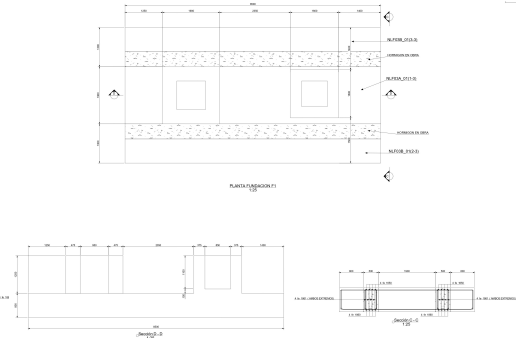


Figura 30: Detalle Fundación
03
Fuente: SalfaMontajes

8.3. Columnas

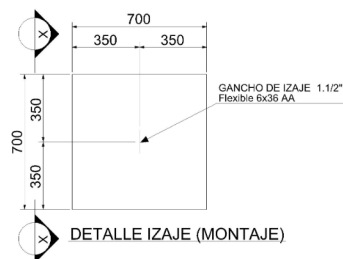
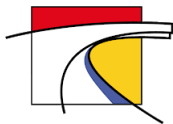


Figura 31: Detalle Columna 07 Altura 13.66 m
Fuente: SalfaMontajes



8.4. Cálculo de amortiguamiento

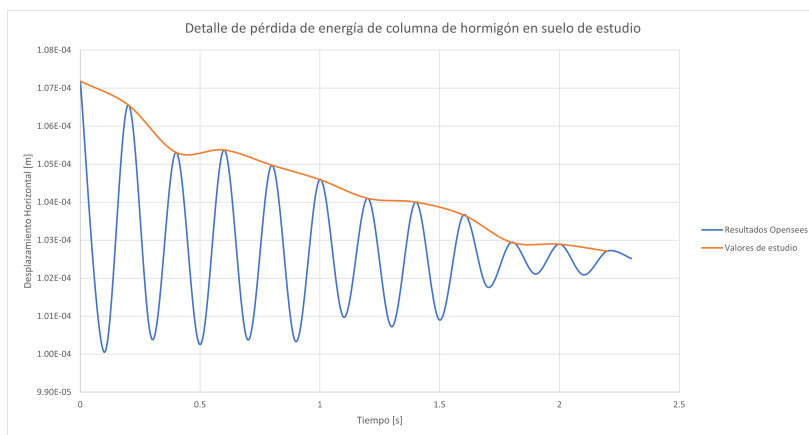


Figura 32: Detalle del cálculo del amortiguamiento del suelo con la ecuación de decaimiento exponencial.

8.5. Características Modelos

Tabla 4: Detalle de Velocidades de Onda de Suelo de modelos

Muestras			
52	253	338	435
53	262	347	443
93	265	361	445
97	272	362	448
100	279	364	455
144	284	369	466
150	285	373	470
154	296	377	473
172	306	392	476
181	309	393	482
202	310	395	484
205	312	396	491
208	317	399	509
217	321	406	510
220	325	408	557
223	329	410	571
227	332	412	610
229	333	413	613
235	334	425	655
240	337	429	689