

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante:** Mg. Franco Benedetti L.

**Profesores Comisión:** Mg. Gilda Espinoza V.

Mg. Alexander Opazo V.

**ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO SISMICO EN  
FUNCIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE  
DINÁMICA DE LA FUNDACIÓN**

**UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO**

Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para optar al título de Ingeniero  
Civil

**JORGE ANDRÉS DÍAZ BURGOS**

CONCEPCIÓN, JULIO DEL 2017

**D e d i c a t o r i a**

*Jorge Díaz Burgos.*

**A g r a d e c i m i e n t o s**

*A Dios, mi familia, mis amigos y mi perrita*

*Canela.*

## **NOMENCLATURA**

OpenSees: Open System for Earthquake Engineering Simulation

SFSI: Interacción Suelo-Fundación-Estructura

SSI: Interacción Suelo-Estructura

B: Ancho de la Fundación

Qu: Capacidad de Soporte

FS: Factor de Seguridad Estático

FSd: Factor de Seguridad Dinámico

Vs: Velocidad de ondas de corte

T: Periodo de estructura

H: Altura de estructura

MEF: Modelo de elementos finitos

GDL: Grados de Libertad

## CONTENIDO

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos.....	iii
1 INTRODUCCIÓN.....	3
2 OBJETIVOS.....	5
2.1 Objetivo General .....	5
2.2 Objetivos Específicos .....	5
3 METODOLOGIA.....	7
3.1 Enfoque del Problema.....	7
3.2 Modelos de elementos Finitos (MEF) .....	8
3.3 Dominio de variables.....	10
3.3.1 Dominio de las estructura. ....	10
3.3.2 Capacidad de la estructura .....	10
3.3.3 Masa de la estructura .....	11
3.3.4 Dominio de la fundación.....	11
3.3.5 Dominio del suelo.....	11
3.4 Demandas Sísmicas .....	13
3.5 Construcción de modelos.....	15
3.5.1 Dominio del suelo.....	15
3.5.2 Fundación.....	16
3.5.3 Estructura .....	16
3.5.4 Contacto fundación-estructura .....	17
3.5.5 Contacto suelo fundación.....	17
3.5.6 Aplicación de demanda sísmica .....	17
3.6 Análisis del modelo .....	18

3.7	Casos de estudio .....	19
4	RESULTADOS .....	20
4.1	Resultados capacidad de soporte.....	20
4.2	Resultados factor de seguridad.....	21
4.3	Resultados desempeño sísmico .....	22
4.3.1	Comparación Drift/Fs .....	22
4.3.2	Análisis de la demanda .....	23
4.3.3	Efectos de la demanda .....	29
4.4	Análisis finales .....	31
5	DISCUSIÓN FINAL .....	35
6	CONCLUSIONES .....	36
7	REFERENCIAS .....	38

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación simplificada del análisis.....	7
Figura 2: Análisis tipo Pushover.....	9
Figura 3: Análisis Transiente.....	9
Figura 4:Gráfico de espectro de Aceleración .....	14
Figura 5: Gráfico de espectro de velocidad.....	14
Figura 6: Gráfico de espectro de desplazamiento.....	14
Figura 7: Aplicación de las cargas sísmicas al modelo.....	17
Figura 8: Casos de modelación.....	19
Figura 9: Curvas capacidad de Soporte $V_s=220$ $V_s=250$ .....	20
Figura 10: Comparación de FS. por tipo de suelo .....	21
Figura 11: Comparación de FS. por tipo de suelo .....	22
Figura 12: Comparación Drift/FS registro Concepción Long. ....	22
Figura 13: Comparación por tipo de suelo Intensidad Arias/FS. ....	24
Figura 14: Comparación por tipo de suelo Intensidad Arias/Drift. ....	26
Figura 15: Comparación por tipo de suelo Intensidad Arias/Giro.....	27
Figura 16: Espectro de respuesta Registro Kocaeli .....	30
Figura 17: Comparación por tipo de suelo. Drift/ Fs.....	31
Figura 18: Comparación por tipo de suelo. Giro/ Fs. ....	33

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Alturas correspondiente a cada periodo estructural .....	10
Tabla 2: Anchos de fundación considerados .....	11
Tabla 3: Parámetros de suelo utilizados.....	12
Tabla 4: Registros sísmicos y sus parámetros .....	13
Tabla 5: Intensidad de Arias.....	24
Tabla 6: Periodos con base Flexible .....	29



## **ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO SÍSMICO EN FUNCIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DINÁMICA DE LA FUNDACIÓN**

**Autor: Jorge Díaz Burgos**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

[jdiazb@alumnos.ubiobio.cl](mailto:jdiazb@alumnos.ubiobio.cl)

**Profesor patrocinante: Mg. Franco Benedetti Leonelli**

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad del Bío Bío

[fbenedetti@ubiobio.cl](mailto:fbenedetti@ubiobio.cl)

### **RESUMEN**

Una gran cantidad de investigaciones vinculan la interacción Suelo-Fundación-Estructura (SFSI) en el desempeño sísmico estructural. Sin embargo, hasta ahora no existen estudios que consideren la resistencia real aportada por el suelo ante un evento dinámico. Por esto se busca relacionar la capacidad de soporte dinámica del suelo con el desempeño sísmico estructural, mediante la implementación de modelos numéricos de elementos finitos, los cuales simularán estructuras de un grado de libertad con comportamiento elasto-plástico, fundadas sobre losas rígidas de ancho variable con conducta elástico-lineal conectadas a mallas de suelo de elementos finitos que permitirán representar su comportamiento no lineal. En total se establecieron 960 casos de estudio, desarrollados y analizados mediante la herramienta OPENSEES y MATLAB, con la finalidad de obtener un amplio rango de en términos de Factor de seguridad y Drift para posteriormente evaluar el desempeño sísmico estructural. Los resultados se presentarán en forma de gráficos comparativos entre el factor de seguridad de dinámico y indicadores de daño, los cuales infieren la relevancia de la demanda ante la respuesta de un sistema estructural.

Palabras claves: Interacción suelo fundación estructura (SFSI), desempeño estructural, capacidad de soporte, Factor de seguridad, Drift, OPENSEES, MATLAB.

8534 Palabras Texto + 18 Figuras \* 500 + 6 Tablas \* 250 = 19034 Palabras Totales.

**ABSTRACT**

A large amount of research links the Soil-Foundation-Structure (SFSI) interaction in structural seismic performance. However, until now there are no studies that consider the actual resistance provided by the soil to a dynamic event. Therefore, it is sought to relate the dynamic support capacity of the soil with the structural seismic performance, through the implementation of numerical models of finite elements, which will simulate structures of a degree of freedom with elasto-plastic behavior, based on rigid slabs of variable width with elastic-linear behavior connected to finite element soil meshes that will allow them to represent their non-linear behavior. In total, 960 case studies were developed and analyzed using the OPENSEES and MATLAB tools, in order to obtain a wide range in terms of FS and Drift to later evaluate the structural seismic performance. The results will be presented in the form of comparative graphs between the dynamic safety factor and damage indicators, which infer the relevance of the demand to the response of a structural system.

## 1 INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de dotar a las edificaciones con un mecanismo económico y eficaz que permita solventar la problemática sísmica, numerosas investigaciones convergen en el diseño por capacidad, paradigma constructivo utilizado en la actualidad, que considera en su formulación la concepción de edificaciones “a prueba de fallos”, es decir, que contengan más de un medio para distribuir la carga que ha sobrepasado la resistencia del elemento estructural principal.

Sin embargo, esta “filosofía de diseño” en general ignora o simplifica de manera poco precisa el fenómeno interacción Suelo-Fundación-Estructura (SFSI), tal como propone Gazetas & Mylonakis (2001) que, por medio de análisis teóricos y numéricos, critican la simplificación del efecto interacción suelo-estructura (SSI) y su rol siempre benéfico adoptado en las prácticas de diseño convencionales, en particular los espectros de respuesta, ejemplificando con el caso del Hanshin Expressway, cuyas falencias constructivas serían solo una parte de las razones del fatídico colapso durante el terremoto de Kobe en 1995, suceso que más tarde sería ampliamente profundizado por Mylonakis et al. (2006) a través de un riguroso análisis del efecto negativo del SSI sobre el sistema estructural, como filtración del contenido de frecuencia (de modo que el movimiento superficial tenía una frecuencia perjudicial para la columna) o el aumento de la participación del modo fundamental desencadenando respuestas de mayor intensidad.

Por otro lado, las primeras investigaciones delegaban el comportamiento del suelo bajo la fundación a un rango lineal, y consideraban el contacto pleno del suelo con la fundación. No obstante, terremotos, tales como el de Kobe en el año 1995 o Kocaeli en 1999 evidenciarían más tarde el error de estos supuestos a través de fuertes no-linealidades en la interfaz suelo-fundación. Gazetas & Apostolou (2004) – Khoshnoudian (2013) reconocen tres tipos de no-linealidades: deslizamiento de la fundación, levantamiento de la fundación, fluencia del suelo, e investigan sus efectos, a través de un modelo elasto-plástico Mohr-Coulomb, en la respuesta de fundaciones superficiales sujetas a fuertes movimientos sísmico. Concluyendo que, para un período estructural y una excitación dada, la falla por capacidad del suelo puede ser beneficioso para la súper-estructura. Harden et al. (2006) contrastan los beneficios y desventajas, por medio de un estudio determinístico, del levantamiento de la fundación cuya no linealidad puede reducir potencialmente la demanda sísmica, en contraste con el daño colateral producto de las deformaciones.

Anastasopoulos et al. (2010) proponen que el daño en la superestructura a lo largo del segmento del Expressway Hanshin, expresada a través de las rótulas plástica, puede ser evitado bajo una

nueva filosofía de diseño que, por medio del sub-dimensionamiento intencional de la fundación, trasladaría la falla al suelo bajo la fundación.

Las investigaciones sobre el tema abarcan un amplio abanico de modelos estructurales desde sistemas con base fija (Ciampoli & Pinto, 1995) modelados como sistemas de un grado de libertad hasta complejos modelos de elementos finitos (Jemeric et al., 2009; Pecker et al., 2013; Trombetta et al., 2014), quienes sentaron las bases de la estabilidad numérica. Por otro lado, diversos tipos de análisis también se han llevado a cabo, se destaca ampliamente el uso de análisis determinísticos (Harden et al., 2006 ;Burgos & Ojeda, 2015) como también simulaciones de Monte-Carlo (Moghaddasi et al. 2011), en este último, evalúan la influencia de la flexibilidad de la fundación en el desempeño.

Pese a los estudios existentes sobre la interacción suelo-fundación-estructura, al día de hoy, no existen investigaciones que vinculen la resistencia real aportada por el suelo, para un evento sísmico, con el subsecuente daño en la estructura. Por tanto, el objetivo de este estudio es correlacionar por medio del factor de seguridad, el tipo de suelo, resistencia estructural, dimensión de la fundación y período del sistema con la capacidad de soporte del suelo, considerando la carga solicitante como la fuerza efectiva transmitida por un sismo. Para posteriormente evaluar el desempeño sísmico través de un índice de daño como el drift. Para ello, se utilizó el software Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees), en donde múltiples modelos de elementos finitos (MEF) fueron sometidos a un análisis determinístico en el dominio de tiempo.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo General**

- Analizar el comportamiento de la respuesta sísmica de estructuras a través de la variación de la capacidad de soporte de la fundación considerando un factor de seguridad dinámico.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Sintetizar el estado del arte en base a la interacción Suelo-Fundación-Estructura ante un evento dinámico
- Establecer el dominio a estudiar, definiendo casos y variables a utilizar
- Construir modelos numéricos de elementos finitos para el sistema suelo-fundación-estructura
- Determinar la capacidad de soporte de distintos sistemas suelo-fundación realizando simulaciones numéricas
- Analizar la relación que existe entre la capacidad de soporte y el desempeño sísmico, considerando una demanda dinámica

### 3 ESTRATEGIA DE ANÁLISIS

ETAPA	SUB ETAPAS			HITO
Estudio de antecedentes	Recopilación Bibliografica	Análisis de antecedentes	Síntesis de información	Estado del arte
Dominio de estudio	Caracterización de la estructura	Caracterización del suelo	Caracterización de la demanda	Casos de estudio
Desarrollo de modelos numéricos	Generación de comandos	Modelos capacidad de soporte	Modelos análisis transiente	Modelos operativos
Determinar capacidad de soporte	Análisis Pushover	Curvas de capacidad del suelo	Establecer indicadores de daño	Resultados capacidad de soporte
Análisis desempeño estructural	Análisis sísmicos	Análisis de resultados	Conclusiones y comentarios	Resultados desempeño sísmico

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Enfoque del Problema

La problemática a resolver en esta investigación radicó en analizar la influencia de la capacidad de soporte dinámica de la fundación en el desempeño sísmico estructural, considerando la interacción Suelo-Fundación-Estructura (SFSI). Para desarrollar este análisis se implementaron modelos de elementos finitos en dos dimensiones, utilizando el software de simulación y análisis de sistemas estructurales y geotécnicos no lineales OpenSees.

El tipo de estructura a modelar durante los análisis corresponde a una representación simplificada de edificios simétricos regulares, con losas que desarrollan la función de un diafragma rígido. El modo de vibración predominante de estos edificios es el traslacional, por lo que es posible representar la estructura como un sistema de un grado de libertad, conectada a una fundación tipo losa, donde la masa se concentra en su totalidad en la parte superior de esta.

Esta simplificación se ilustra en la figura 1, donde  $k$ ,  $M$ ,  $T$  y  $H$  son la rigidez, la masa, el periodo y la altura del edificio, respectivamente, mientras que,  $B$  es el ancho de Fundación.

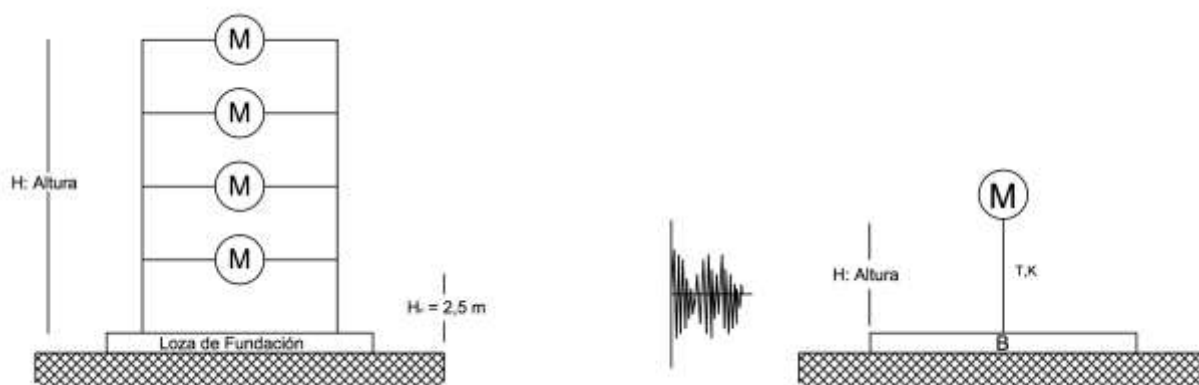


Figura 1. Representación simplificada del análisis.

El sistema estructural se encuentra apoyado a una losa de fundación muy rígida y sin confinamiento, la cual es conectada al suelo de forma que permita la interacción cinemática e inercial, para así poder desarrollar no-linealidades como el deslizamiento y el levantamiento de la fundación.

Una consideración importante de mencionar es el comportamiento Elasto-Plástico definido para el dominio del suelo y para la estructura, mientras que, para la fundación se definió un comportamiento Elástico-Lineal.

Finalmente, para obtener un amplio rango, en términos de factor de seguridad, se consideró en el análisis 3 diferentes tipos de estructuras de periodo “T” apoyadas en losas de fundación de ancho “B” variable, las cuales serán sometidas posteriormente a demandas monotónicas y sísmicas. En las siguientes secciones se explica de manera detallada: los procedimientos, casos estudiados y consideraciones realizadas.

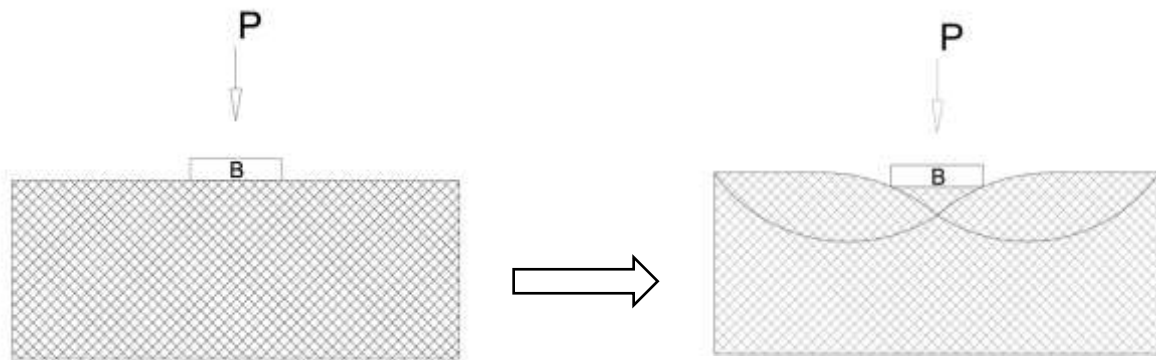
#### **4.2 Modelos de elementos Finitos (MEF)**

Con el fin de vincular la demanda sísmica con indicadores de daño(drift), en términos de Factor de Seguridad dinámico (FSd), se construyeron dos tipos de MEF.

El primero consistió en un sistema Suelo-Fundación, el cual fue sometido a un análisis monotónico tipo Pushover para determinar la capacidad de soporte del suelo. El análisis radica en la aplicación de una carga vertical creciente en el centro de la fundación, la cual es transmitida al suelo generando deformaciones que comienzan en el rango elástico y siguen hasta alcanzar la fluencia y posterior plastificación. Complementario a esto, se aplicaron elementos grabadores de fuerza en los nodos de suelo bajo la fundación para llevar un seguimiento del análisis y de esta forma obtener la curva que define la máxima fuerza resistente del suelo.

A continuación en la figura 2 se muestra la representación del análisis Pushover en el sistema suelo-fundación.

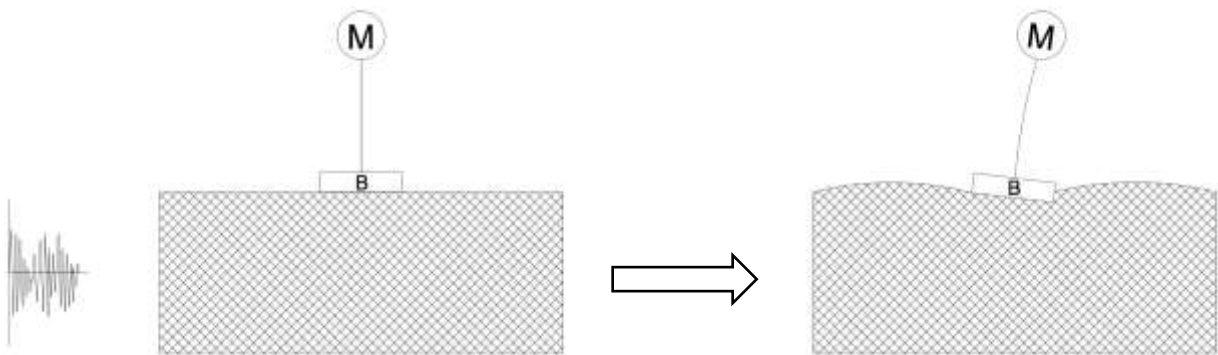




**Figura 2: Análisis tipo Pushover**

Para el segundo modelo de elementos finitos se consideró un sistema Suelo-Fundación-Estructura, correspondiente a la estructura de 1GDL anteriormente descrita. A este modelo se le aplicaron diversas demandas dinámicas en forma de registros sísmicos del tipo desplazamiento, los cuales llevan al sistema alcanzar estados de deformación plástica, y así de esta forma, registrar parámetros de fuerzas y desplazamientos que permitirán evaluar el desempeño sísmico del sistema.

En la figura 3 se representa gráficamente la aplicación del análisis sísmico al modelo en estudio.



**Figura 3: Análisis Transiente**

### 4.3 Dominio de variables

#### 4.3.1 Dominio de las estructura.

Se seleccionaron tres tipos de edificios con distintos periodos estructurales. El primer edificio tiene un periodo de  $T=0,3(s)$ , el segundo  $T=0,7(s)$  y el tercero  $T=1,2(s)$ .

En base a estudios de desempeño sísmico de edificios en Chile, se logró realizar una calibración que permite relacionar la altura ( $H$ ) con el periodo fundamental ( $T$ ) para estructuras de hormigón armado con rigidez alta, media y flexible (Guendelman et al., 2010).

Para esta investigación se utilizó la ecuación 1, que considera una estructura con rigidez media, para obtener las alturas de las estructuras correspondiente a cada periodo estructural.

$$\frac{H}{T} = 70 \quad (1)$$

**Tabla 1. Alturas correspondiente a cada periodo estructural**

<i>Periodo T (s)</i>	<i>Altura H(m)</i>
0,3	21
0,7	49
1,2	84

#### 4.3.2 Capacidad de la estructura

El diseño por desempeño sísmico propuesto por el documento “VISION 2000” se cuantifica en términos de la cantidad de daño recibido por la estructura ante una demanda dinámica. En consideración a esto se definió un valor drift de fluencia del 0,2% , el cual corresponde a una respuesta inmediatamente operacional por parte de la estructura ante una sollicitación sísmica (SEAOC, 1995).

Para considerar los efectos de resistencia sobre la estructura se definieron dos niveles de capacidad: 0,1g y 0.2g. Los cuales corresponden al 10% y 20% del peso de la estructura.

En investigaciones previas estas capacidades fueron calibradas en función de la estructura y su periodo estructural, donde se pudo observar claramente el comportamiento Elasto-Plástico de la curva de capacidad para drift superiores a 0,002.

#### 4.3.3 *Peso de la estructura*

Para la estructura se considerara un peso de 80000(KN), y para la fundación un peso total de 8000(KN).

#### 4.3.4 *Dominio de la fundación*

Para este análisis se considerarán ocho tamaños de fundación, los cuales se muestran en la tabla 2.

**Tabla 2: Anchos de fundación considerados**

<i>Ancho B (m)</i>							
6	9	12	17	20	23	26	31

#### 4.3.5 *Dominio del suelo*

Los tipos de suelo ha utilizar corresponden a dos depósitos de arenas de diferentes densidades en condición drenada. Para obtener los parámetros de interés por cada tipo de suelo, se procedió a utilizar la constante velocidad de onda de corte ( $V_s$ ) como término de entrada para el cálculo de Densidad ( $\gamma$ ), Módulo de corte ( $G$ ), Modulo de Bulk ( $K$ ) y Ángulo de fricción ( $\Phi$ ), mediante la utilización de relaciones matemáticas. (Kramer, 1996)

Los parámetros del suelo son definidos en la siguiente tabla 3.

**Tabla 3: Parámetros de suelo utilizados**

	$V_s(m/s)$	$\gamma$ (T/m <sup>3</sup> )	$\Phi$ (grados)	$G(Kpa)$	$K(Kpa)$	$e$	$\nu$ (Poisson)
<i>Suelo 1</i>	220	1.8	32	87120	406560	0.6	0.4
<i>Suelo 2</i>	250	2.1	36.5	131250	612500	0.55	0.4

#### 4.4 Demandas Sísmicas

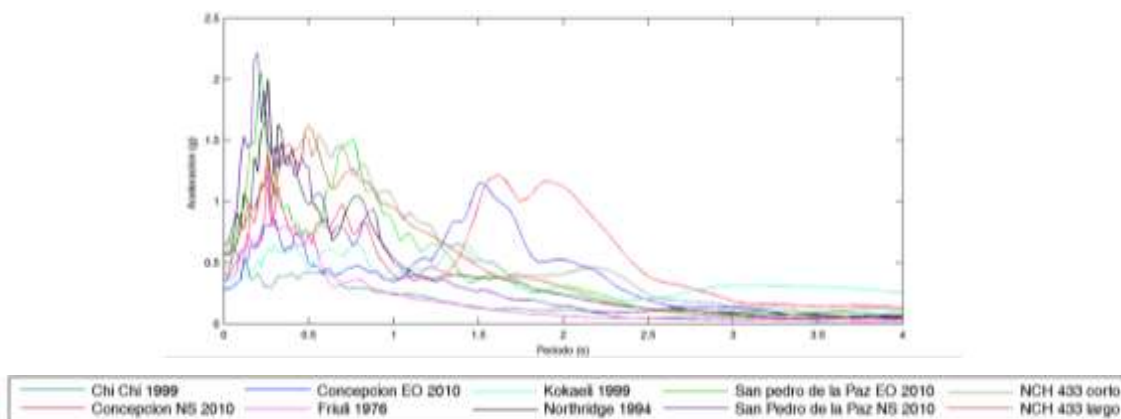
Para esta investigación se realizará un estudio determinístico donde se han escogido 10 registros sísmicos, donde si bien, no es una cantidad suficiente para poder representar de una manera optima la demanda sísmica, para nuestro caso ya se considera representativa la aleatoriedad en las sollicitaciones dinámicas que pueden afectar a una estructura.

A continuación en la tabla 4 se muestran los registros sísmicos con sus características en términos de magnitud, intensidad y duración efectiva.

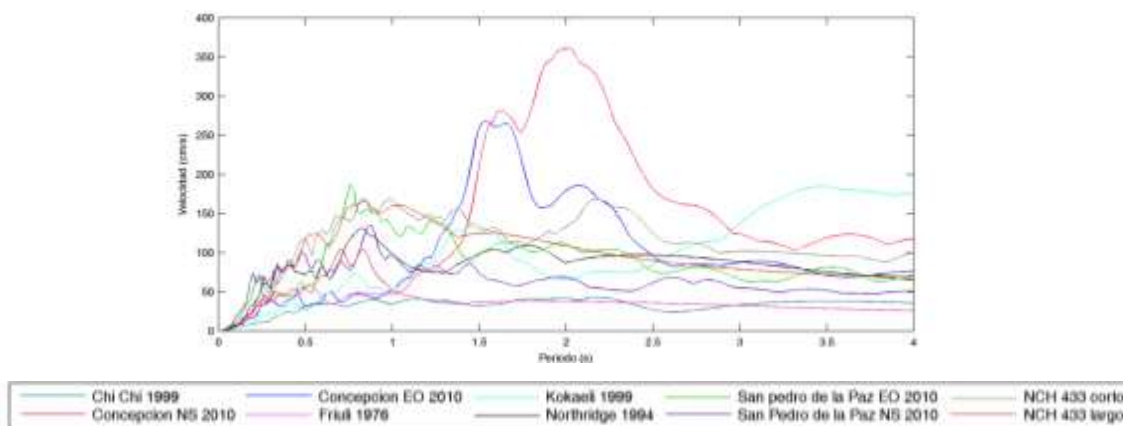
**Tabla 4: Registros sísmicos y sus parámetros**

N°	Registro sísmico	Tipo de terremoto	Magnitud (Mw)	Aceleración máxima(g)	Velocidad máxima(cm/s)	Desplazamiento o máximo(cm)	Intensidad de Arias	Duración efectiva(s)
1	Concepción N S 2010,Chile	Subducción	8.8	0.40	69.38	21.56	8.72	80.72
2	Concepción E O 2010,Chile	Subducción	8.8	0.2	52.63	14.74	5.68	88.235
3	Chi Chi 1999,Taiwán	Subducción	7.7	0.36	21.54	21.88	0.37	11.55
4	Friuli 1976,Italia	-	6.5	0.35	22.02	4.07	0.78	4.21
5	Kocaeli 1999,Turquía	-	7.4	0.35	62.18	51.30	1.32	15.90
6	NCH433.Suelo D corto, Chile	-	-	0.56	63.74	10.49	2.48	3.53
7	NCH433.Suelo D largo, Chile.	-	-	0.46	57.2	13.8	3.74	81.76
8	Northridge 1994,EUA	Cortical	6.7	0.57	51.83	9.03	2.73	9.06
9	San Pedro de la paz E O 2010,Chile	Subducción	8.8	0.60	43.08	14.82	6.84	73.08
10	San Pedro de la paz N S 2010,Chile	Subducción	8.8	0.65	37.02	9.77	5.53	69.35

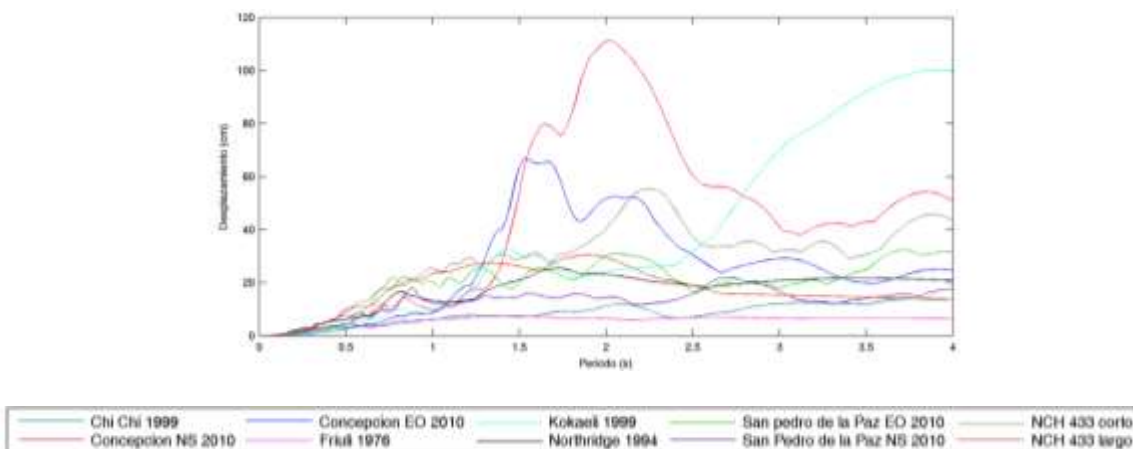
En las siguientes figuras 4, 5 y 6 se presentan los espectros de aceleración, velocidad y desplazamiento para cada una de las demandas seleccionadas.



**Figura 4: Gráfico de espectro de Aceleración**



**Figura 5: Gráfico de espectro de velocidad**



**Figura 6: Gráfico de espectro de desplazamiento**

## 4.5 Construcción de modelos

### 4.5.1 Dominio del suelo

Considerando el comportamiento inelástico del suelo, se modelarán mallas de elementos finitos mediante el software GMSH, el cual posteriormente es compatibilizado con el lenguaje de programación TCL de OpenSees (Mazzoni et al. 2007).

Para realizar el análisis se asume el suelo como un tipo de arena en condición drenada, al ser este un modelo en dos dimensiones, se considera una malla con dos grados de libertad por nodo, los que corresponden a desplazamientos horizontal y vertical.

Cabe destacar que para la construcción de la malla de suelo se tomaron las siguientes consideraciones:

#### a) Elementos de suelo

Para caracterizar la respuesta tensión-deformación del suelo, se dividió la malla en elementos de tipo triangular con un único punto de integración en su centro, el cual facilita la convergencia numérica del modelo.

#### b) Material de suelo

A cada elemento de la malla se le asoció un material que simule el comportamiento elasto-plástico del suelo para condiciones de cargas generales (Yang, 2009).

#### c) Condiciones de contorno y tamaño de malla

Para favorecer la eficiencia computacional, es necesario reducir el dominio del suelo de una forma que se permita llevar a fin un análisis en una cantidad razonable de tiempo. Por otra parte a medida que el dominio se reduce, las condiciones de contorno se vuelven cada vez más importantes (Zhang et al; 2003).

Uno de los criterios utilizados para modelar las condiciones de contorno fue desarrollar fronteras absorbentes con un amortiguador de tipo viscoso (Lysmer & Kuhlemeyer, 1969), de tal forma que las ondas producidas por una fuente sísmica sean únicamente absorbidas sin que exista reflexión de ningún tipo al dominio de estudio.

Respecto al rango de dimensiones, se definieron cuatro mallas de elementos finitos de distinto tamaño, donde cada una de estas es construida en base a las dimensiones de los sistemas

fundación-estructura, de manera que no existan problemas de que un sistema no pueda ser contenido en un tamaño de malla y provoque alteraciones en las condiciones de frontera por la distribución de tensiones de los bulbos de esfuerzos.

#### d) Espaciamiento entre nodos

El dominio de suelo debe cumplir con la condición de que la más pequeña longitud de onda que viajará por el medio debe ser mayor que la distancia entre 10 nodos consecutivos, de acuerdo a la ecuación 2 (Jeremic, 2009).

$$\Delta h \leq \frac{\lambda_{\min}}{10} = \frac{v_s}{10f_{\max}} \quad (2)$$

Donde " $\Delta h$ " es el espaciamiento entre nodos de suelo; " $\lambda_{\min}$ " es la longitud de onda mínima que viaja por el suelo; " $v_s$ " es la velocidad de propagación de ondas y " $f_{\max}$ " la frecuencia máxima que viaja por el suelo.

Se estableció que la velocidad mínima a la cual viaja una onda en el modelo, es de 100 m/s y cuenta con una frecuencia de 10 Hz por lo que la longitud de onda resulta en 10 m y el espaciamiento final es de 1 m para todas las mallas de elementos finitos.

#### 4.5.2 *Fundación*

Siguiendo los fundamentos que la fundación se modelara bajo el rango elástico, se proceden a crear nodos espaciados a 50 cm que se unen con elementos que simulan el comportamiento lineal del material.

Posterior a esto, se definió un modulo de elasticidad de gran magnitud para asegurar altos niveles de rigidez y, de esta forma, lograr una transmisión óptima de las cargas al dominio del suelo.

#### 4.5.3 *Estructura*

La estructura será modelada de forma que sus propiedades simulen un comportamiento elasto-plástico ante una demanda dinámica. Esta estructura es calibrada mediante un análisis monotónico Pushover, para obtener una rigidez estructural compatible con el periodo del primer modo de vibrar (modo fundamental).



#### 4.5.4 Vinculo fundación-estructura

El contacto entre la fundación y la estructura se consideró como una unión monolítica mediante la unión de un nodo, la cual hace posible el traspaso carga y giro.

#### 4.5.5 Contacto suelo fundación

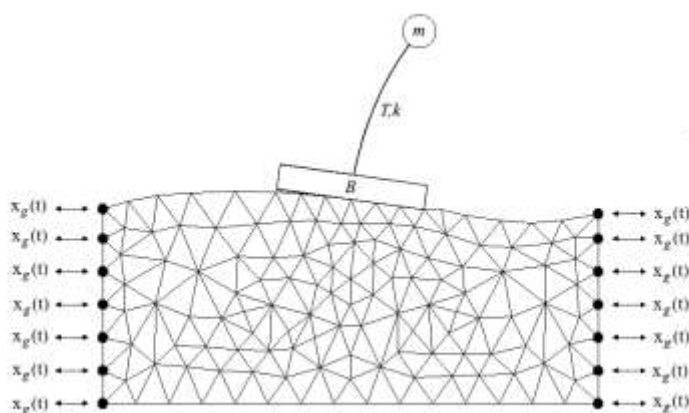
El contacto entre los nodos de suelo (2 GDL) y los nodos de fundación (3GDL) se realizó mediante la creación de nodos auxiliares, los cuales comparten las mismas coordenadas que los nodos de fundación y el suelo. Estos nodos auxiliares se unen al suelo mediante elementos que simulan el un comportamiento no lineal (ZeroLength), permitiendo de esta forma la optima conexión del sistema suelo-fundación.

#### 4.5.6 Aplicación de demanda sísmica

Para llevar a fin el análisis transiente es necesario la utilización de los registros sísmicos de tipo desplazamiento, los cuales son ingresados y aplicados en los nodos de las fronteras laterales del modelo como carga de desplazamiento para cada paso de tiempo.

A continuación en la figura 7 se muestra la representación del sistema, donde se observan los puntos de aplicación de los desplazamientos sísmicos en función del paso de tiempo  $X_g(t)$ .  $T$ ,  $k$  y  $m$  son el periodo, la rigidez y la masa respectivamente, mientras que  $B$  es la base de la estructura.

El paso de tiempo ( $\Delta t$ ) utilizado para el análisis transiente, depende de cada registro y es clave para la estabilidad numérica (Jeremic, 2009).



**Figura 7: Aplicación de las cargas sísmicas al modelo**

#### 4.6 Análisis del modelo

El sistema modelado se someterá a los siguientes análisis:

- **Análisis gravitacional del suelo:** Este análisis consistió en el aumento de tensiones del suelo debido a los efectos de la gravedad, para de esta forma poder emular el fenómeno de esfuerzos efectivos. El análisis fue controlado por la fuerza y realizado en 10 pasos de tiempo.
- **Análisis gravitacional de la fundación y estructura:** Para este análisis se consideró el aumento de tensiones debido al peso del suelo y la estructura, no existiendo deformaciones, lo cual favoreció la convergencia numérica del modelo. El análisis fue controlado por fuerza y se realizó en 10 pasos de tiempo.
- **Análisis Sísmico:** Este análisis consistió en la aplicación de registros sísmicos de tipo desplazamiento en los nodos laterales de la malla de suelo para un determinado paso de tiempo, que llevan a la estructura a su máxima capacidad entregando parámetros de desplazamiento, tensiones y deformaciones que posteriormente permitirán evaluar el desempeño sísmico del sistema.

### 4.7 Casos de estudio

Antes del análisis sísmico fue necesario establecer las variables a considerar para generar casos de modelación, las cuales son: tipo de suelo, capacidad estructural, periodo estructural, ancho de fundación y demandas sísmicas.

La figura 8 muestra la combinación de variables, dando como resultado 960 casos de estudio.

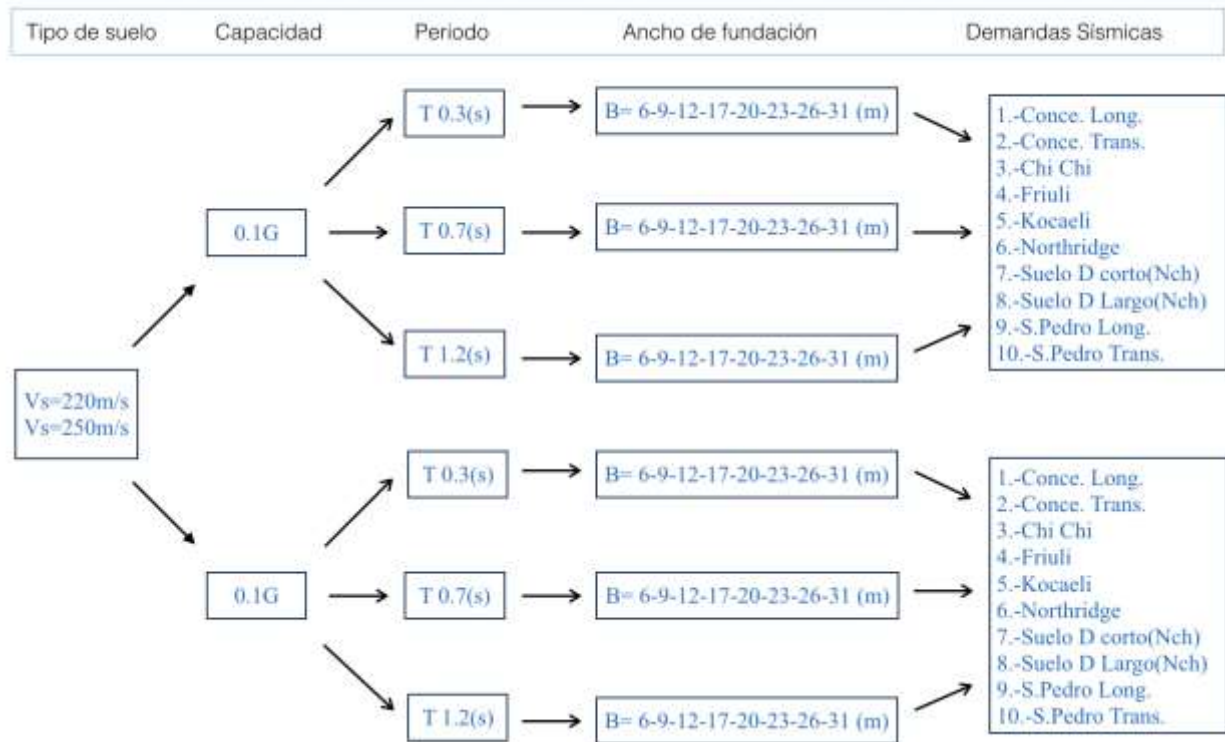


Figura 8: Casos de modelación

## 5 RESULTADOS

La modelación en OpenSees generó gran cantidad de líneas de código, que dieron como resultado un total de 180 GB de memoria almacenados en archivos de texto, los cuales debieron ser procesados y analizados mediante el software Matlab.

### 5.1 Resultados capacidad de soporte

La capacidad de soporte del suelo fue determinada como la máxima fuerza transmitida a los nodos de fundación debido a la aplicación de la carga monotonica.

En la figura 9 se representa gráficamente la capacidad de soportante para ambos tipos de suelo y cada ancho de fundación (qult), las cuales muestran un comportamiento lineal a medida que va en aumento el tamaño de fundación. Cabe mencionar además que para un mejor tipo de suelo en términos de velocidad de onda de corte (Vs), se presenta una mayor capacidad resistente del suelo.

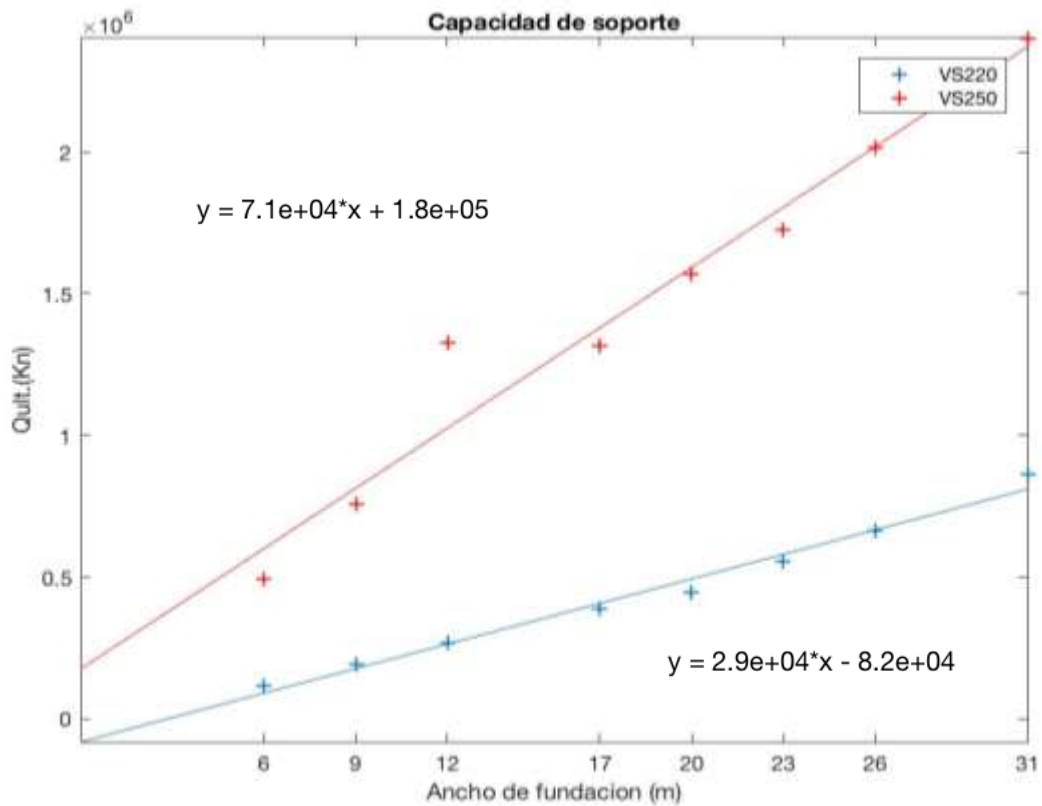


Figura 9: Curvas capacidad de Soporte Vs=220 Vs=250

## 5.2 Resultados factor de seguridad

En estudios anteriores sobre SFSI se asumió que la forma de obtener factores de seguridad es en base a la razón entre la resistencia del suelo y el peso del sistema estructural. Sin embargo, para esta investigación se considera que la forma más adecuada de obtener el factor de seguridad es reemplazando el peso del sistema estructural por la fuerza transmitida al suelo debido a sollicitaciones sísmicas. Llevando el parámetro de factor de seguridad estático a un carácter dinámico, como se muestra en la ecuación 3.

$$FS = \frac{\text{Resistencia del suelo } (q. ult)}{\text{Demanda de fuerza}} \quad (3)$$

En la figura 10 se entregan valores de factor de seguridad para el registro de Friuli de una estructura con capacidad 0.1G, donde se observa que para esta demanda la excitación de la estructura fue mínima, obteniendo una tendencia lineal en factores de seguridad, que van del orden de uno hasta 10 para el primer tipo de suelo y hasta los 25 para el tipo de suelo mas rígido. En lo que respecta a periodos estructurales, no se evidencio mayor diferencia en FS.

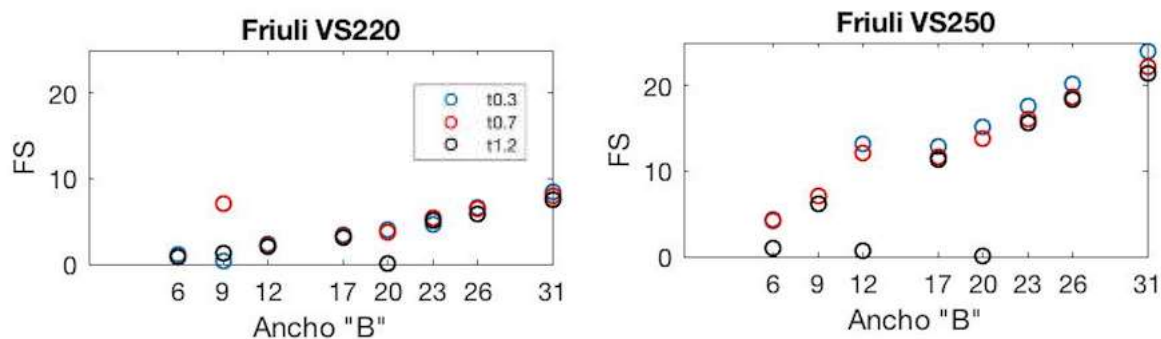


Figura 10: Comparación de FS. por tipo de suelo

En la figura 11 se presentan factores de seguridad para el registro de San Pedro componente transversal con capacidad 0.2G, donde se observa que los FS son de magnitud baja debido a que este registro en particular presenta altos niveles de demanda. En lo que respecta a periodos estructurales, no se represento tanta diferencia en FS.

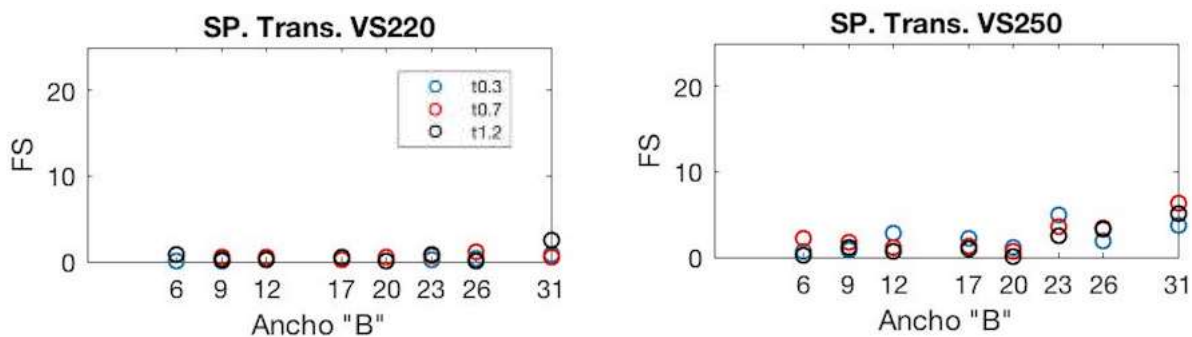


Figura 11: Comparación de FS. por tipo de suelo

### 5.3 Resultados desempeño sísmico

Se establecieron dos indicadores de daño para caracterizar el desempeño sísmico: Drift y Giro de fundación.

#### 5.3.1 Comparación Drift/Fs

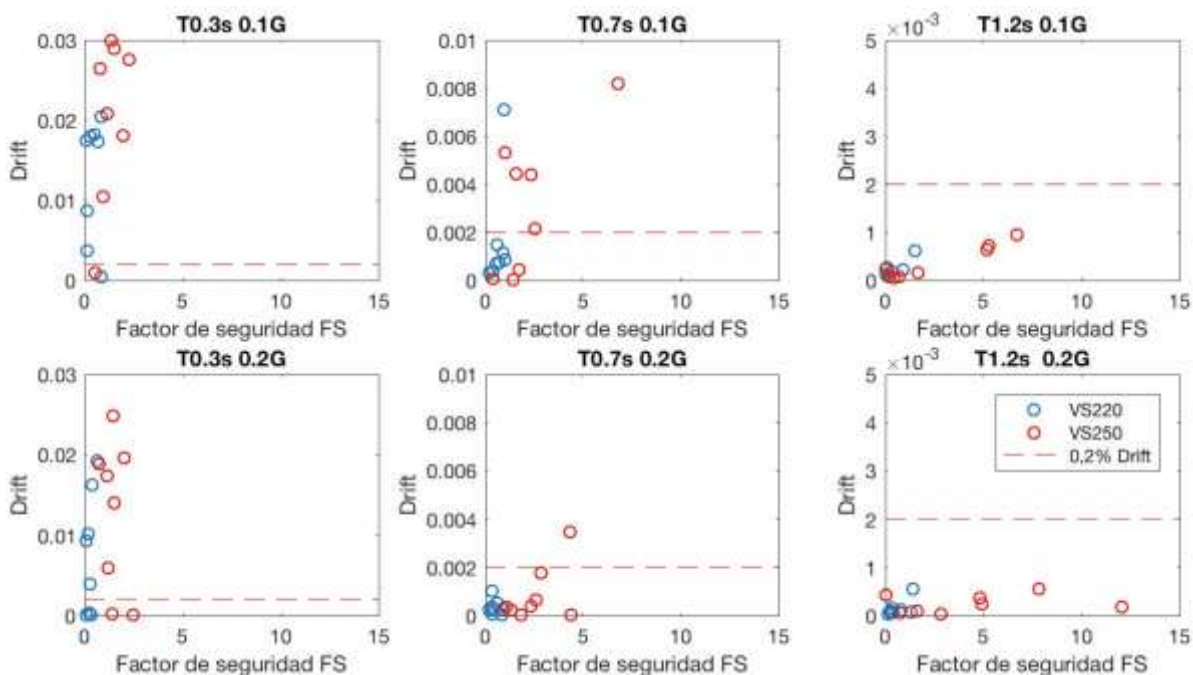


Figura 12: Comparación Drift/FS registro Concepción Long.

En la figura 12 se presenta la comparación entre Drift y FS para el registro de Concepción, donde se puede observar que para un periodo  $T=0,3(s)$  se presentan grandes niveles de deformación para

ambos tipos de suelo, llegando a valores cercanos del 3% de drift para un el suelo con VS250 y próximos al 2% para el suelo con VS220. En cuanto al Factor de seguridad se encuentran valores próximos a 3 para el tipo de suelo con mayor rigidez y cercanos a 1 para el tipo de suelo con VS220. Al considerar el sistema con una capacidad estructural de 0.2G se presentan leves disminuciones y aumentos en lo que respecta a Drift y Fs.

Para estructuras mas flexibles con periodos  $T=0,7(s)$  y  $T=1,2(s)$  se presenta una disminución considerable en los niveles de daño, llegando a valores menores del 0,2% (drift de fluencia) para periodos de 1,2s en ambos tipos de suelos y para las dos capacidades.

En lo que respecta al Factor de seguridad, este tiende ir en aumento para tipos de suelo con mayor rigidez (VS250), llegando a valores cercanos a 7 para una capacidad 0,1G y valores próximos a 13 para la capacidad 0,2G. Para el tipo de suelo con VS220 los niveles de Fs son casi constantes para los 3 periodos propuestos, alcanzando valores del orden de 2 a 3.

Este mismo análisis se reitero para las 9 demandas restantes, entregando resultados muy similares en cuanto a las tendencias anteriormente encontradas para Drift y Fs. Sin embargo estas tendencias no concuerdan con la propuestas por Burgos & Ojeda., 2016, quienes afirmaron que existía una relación directa entre Drift y Fs.

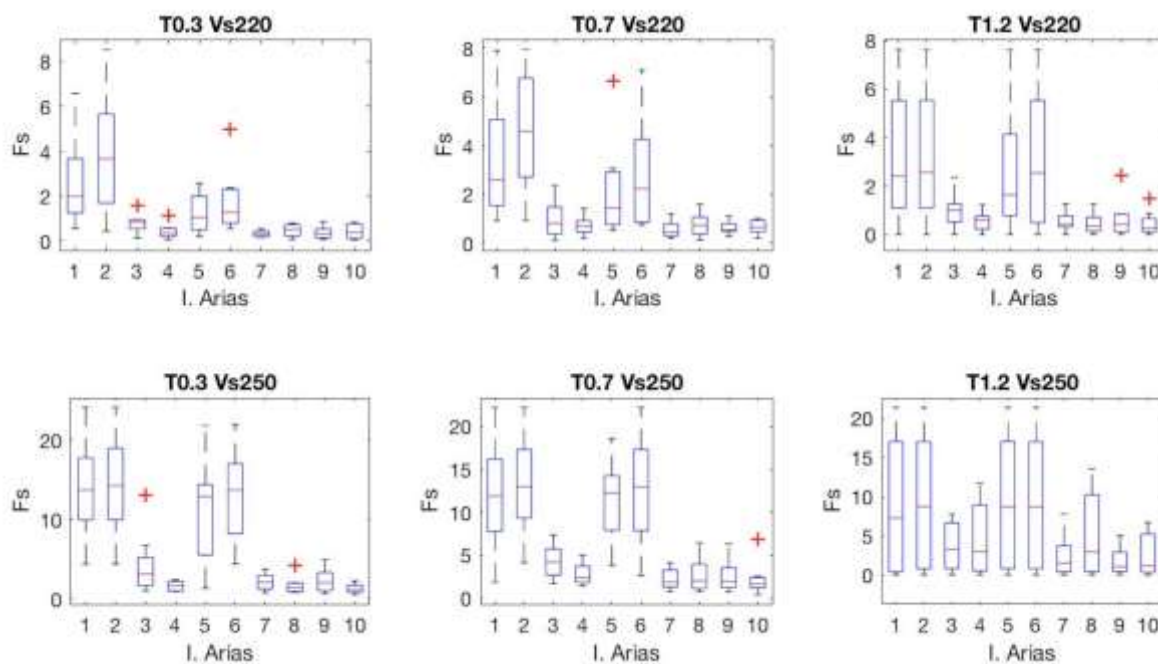
### 5.3.2 *Análisis de la demanda*

Para analizar los niveles de daño estructural en términos de factor de seguridad dinámico, se propuso independizar la demanda en términos Intensidad de Arias, de manera de encontrar una relación entre Drift y Fs, la cual corresponde a la energía contenida en un registro sísmico en términos de velocidad.

Para llevar a fin los análisis se ordenaron las demandas de forma ascendente cómo se muestra la siguiente tabla.

**Tabla 5: Intensidad de Arias**

Registros	I. Arias
1.-Chi Chi	0.37
2.-Friuli	0.78
3.-Kocaeli	1.32
4.-Nch suelo D Corto	2.48
5.-Northridge	2.73
6.-Nch suelo D largo	3.74
7.-San Pedro Long.	5.53
8.-Concepción Trans.	5.68
9.-San Pedro Trans.	6.84
10.-Concepción Long.	8.72



**Figura 13: Comparación por tipo de suelo Intensidad Arias/Fs.**

En la figura 13 se presenta gráficamente la comparación entre intensidad de Arias y factor de seguridad para una estructura de capacidad 0.1G. Los valores de factor de seguridad se encuentran agrupados en los diagramas de caja para los distintos periodos de base fija y tipo de suelo.

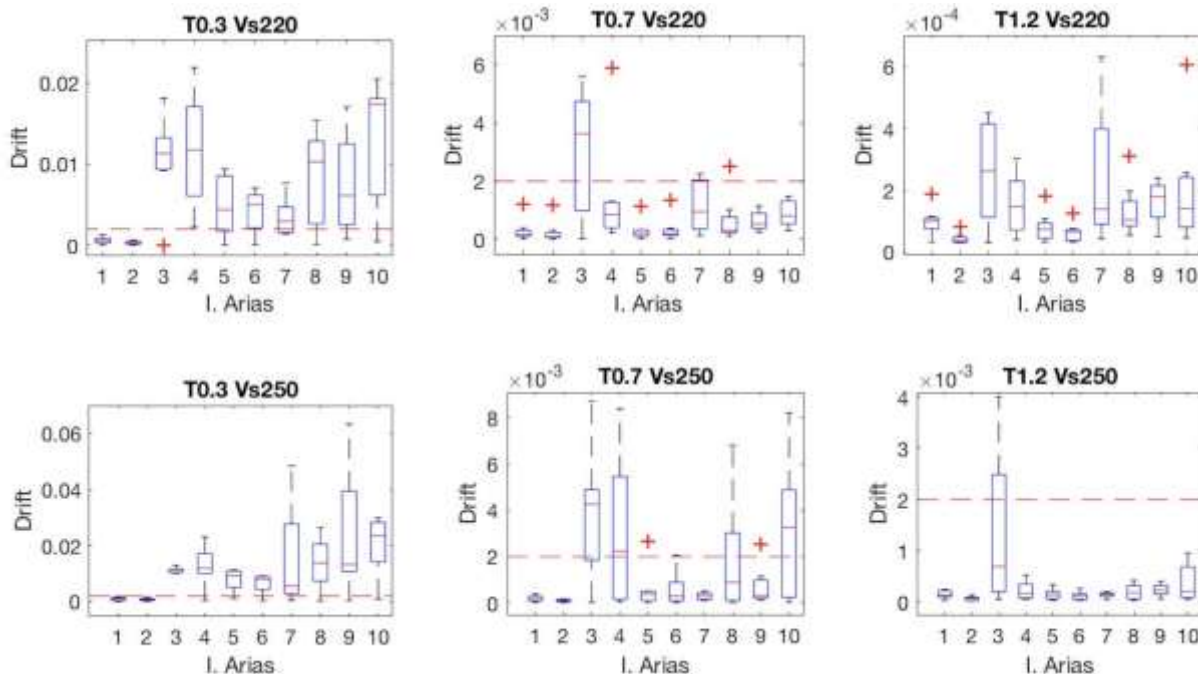


Para una estructura con  $T=0,3(s)$  y un suelo con VS220 se muestran niveles de Fs cercanos a 6 para la demanda de Chi Chi y Friuli y valores muy cercanos a 1 para el registro de Concepción Longitudinal el cual cuenta con mayores niveles de demanda. Realizando este mismo análisis para un suelo mas rígido (VS250), se presentan valores de Fs próximos a 25 para registros con bajas demandas, y Fs bajos para altas demandas.

Para estructuras mas flexibles con  $T=0,7(s)$  y  $T=1,2(s)$  y un tipo suelo de VS220 los valores de factores de seguridad tienden ir en aumento a medida que se flexibiliza el sistema, alcanzando valores cercanos a 8 para los registros que presentan mayor intensidad de Arias, y para los casos de bajos niveles de demanda los Fs tienen aumentar levemente cómo se muestra para la demanda de concepción. Realizando esta misma comparación para un suelo con VS250, se aprecia un aumento considerable en lo que respecta a Fs para el dominio de registros, llegando a valores cercanos a 25 para bajas demandas y Fs cercanos a 5 para bajas intensidades de Arias, demostrando que el aumento de rigidez en el suelo favorecen los niveles de Fs en lo que respecta a la estructura.

De esta forma se puede demostrar claramente un tipo de tendencia, la cual indica que para grandes niveles de demanda los niveles de factor de seguridad tienden a ser menores y para bajas demandas estos tienden ir en aumento, estableciendo una relación de tipo inversa entre estas dos variables.

En este análisis hay casos que salen de la tendencia promedio de Fs, uno de estos es el registro de Kocaeli, el cual presenta bajos niveles de Factor de seguridad pese a sus bajos niveles de demanda. Fenómeno que será explicado en el próximo apartado.



**Figura 14: Comparación por tipo de suelo Intensidad Arias/Drift.**

En la figura 14 se muestra la comparación entre Drift y Intensidad de Arias para una capacidad de 0.1G. Los valores de Drift se encuentran agrupados en los diagramas de caja para los distintos periodos de base fija y tipo de suelo.

La línea roja punteada corresponde al drift de fluencia del 0.2%, donde para una estructura con periodo  $T=0,3(s)$  se observa que esta es sobrepasada para la gran mayoría de los registros, alcanzando valores cercanos al 2% y 4% para un tipo de suelo con VS220 y VS250.

Para una estructura con periodo  $T=0,3(s)$  y un suelo con VS220 se presentan niveles de daño cercano a 0 para los registros de Friuli y Chi Chi, y para altas demandas como es el registro de concepción para sus dos componentes se alcanzan niveles de drift del orden del 2%, los cuales incursionan en el rango no lineal. Realizando este mismo análisis para el tipo de suelo con mayor rigidez (VS250), se observan niveles de daño cercanos al 4% para altas demandas y valores casi 0 para los registros con niveles de demanda baja.

Para periodos de  $T=0,7(s)$  y  $T=1,2(s)$  y un tipo de suelo con VS220 se observa una disminución considerable en los niveles de daño debido a la flexibilización del sistema, llegando a valores de 0.02% para altas intensidades de Arias y casi 0 para bajos niveles de demandas (0,7s), del mismo

modo para la estructura con periodo de 1,2s se alcanzan niveles de daño cercanos al 0.0005 para grandes niveles de demanda y a la vez drift cercanos a 0 para bajas intensidades de Arias. Al realizar este mismo análisis con un suelo con mayor rigidez (VS250), se encuentra una tendencia muy similar al caso anterior, la cual indica que para bajos niveles de demanda los niveles de daño son casi nulos y a la vez para registros con altos niveles de intensidad de Arias como es el registro de concepción se tiene mayores niveles de drift del orden 0,7% para un periodo de 0,7(s) y del orden del 2% para un periodo de 1,2(s). Cabe destacar que al rigidizar el suelo los niveles de daño tienden a ser mayores que para un suelo con VS220.

Además de esto, según los resultados anteriores, se puede establecer un tipo de relación directa entre la demanda y los niveles de daño, ya que para mayores niveles de intensidad de Arias los valores de drift son ascendentes y a la vez para bajos niveles de demanda los daños estructurales eran casi nulos.

En este análisis también se muestran casos que salen de la tendencia promedio en Drift, uno de estos es el registro de Kocaeli, el cual presenta bajos niveles de Drift pese a sus bajos niveles de demanda. Fenómeno que será explicado en el próximo apartado.

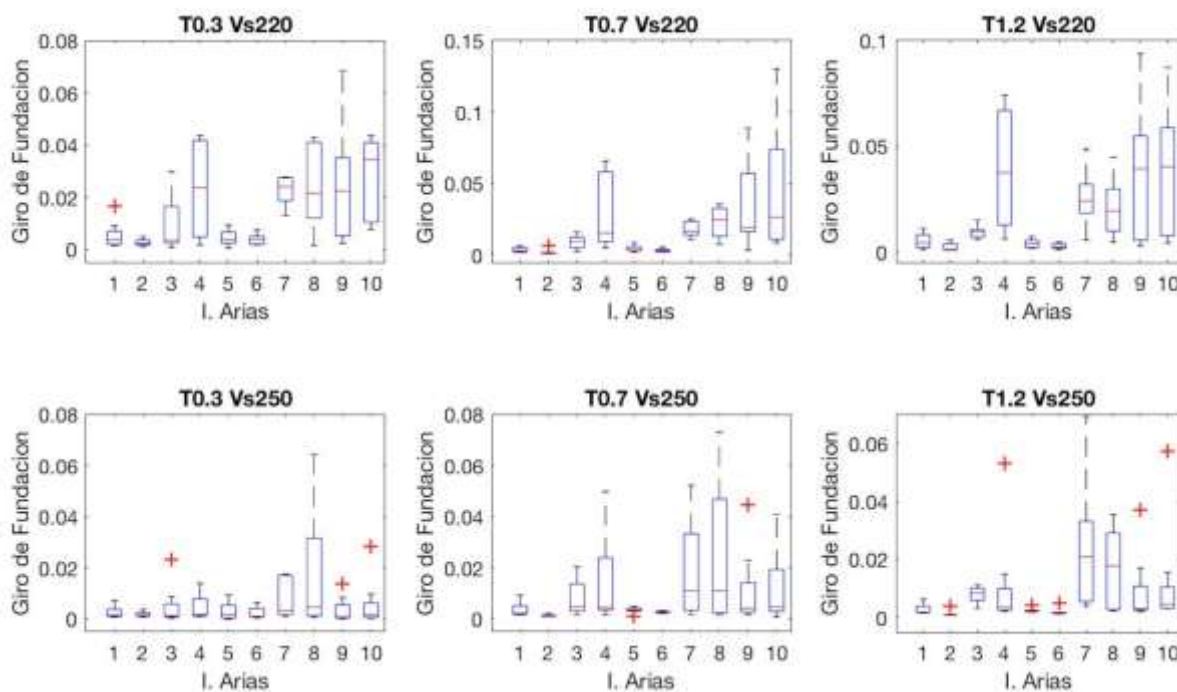


Figura 15: Comparación por tipo de suelo Intensidad Arias/Giro.

En la figura 15 se representa la comparación de giro de fundación y intensidad de Arias para una capacidad estructural de 0.1G. Los valores de giro de fundación se encuentran agrupados en los diagramas de caja para los distintos periodos de base fija y tipo de suelo.

Para  $T=0,3(s)$  se aprecian bajos de giros de fundación para niveles bajos de intensidad de Arias y su vez para altos niveles de demanda los giros de fundación tienden a alcanzar valores cercanos al 0.04. Al realizar este mismo análisis pero con un suelo de mayor rigidez(VS250) se muestra una disminución en los niveles de giro para altos niveles de demanda, como es el caso del registro de Concepción que alcanza valores de giro de fundación cercanos a 0.01(rad), y a su vez para bajas demandas presenta valores de giro próximos a cero.

Para estructuras con periodos  $T=0,7(s)$  y  $T=1,2(s)$  apoyadas en un tipo de suelo con VS220 se presenta un aumento en los niveles de giro, alcanzando valores cercanos a 0.09 (rad) para la el registro de Concepción con un periodo de 0,7s y giros cercanos 0.1 (rad) para estructuras con periodo de 1,2s. Al realizar este mismo análisis para un suelo con mayor rigidez (VS250) se presenta una disminución en los niveles de giro en lo que respecta el dominio de estudio, llegando a valores del orden del 0.05 (rad) para un periodo de 0,7s y giros de fundación cercanos a 0.02 (rad) para un periodo de 1,2s.

En base a los resultados anteriores, se puede establecer un tipo de relación directa entre la demanda y el giro de fundación, ya que para mayores niveles de intensidad de Arias los valores de giro tienden a ser ascendentes y a la vez para bajos niveles de demanda los niveles de giro de fundación son casi nulos.

En este análisis también se muestran casos que salen de la tendencia promedio en lo que respecta al giro de fundación, uno de estos es el registro de Kocaeli, el cual presenta bajos niveles de giro pese a sus bajos niveles de demanda. Fenómeno que será explicado en el próximo apartado.

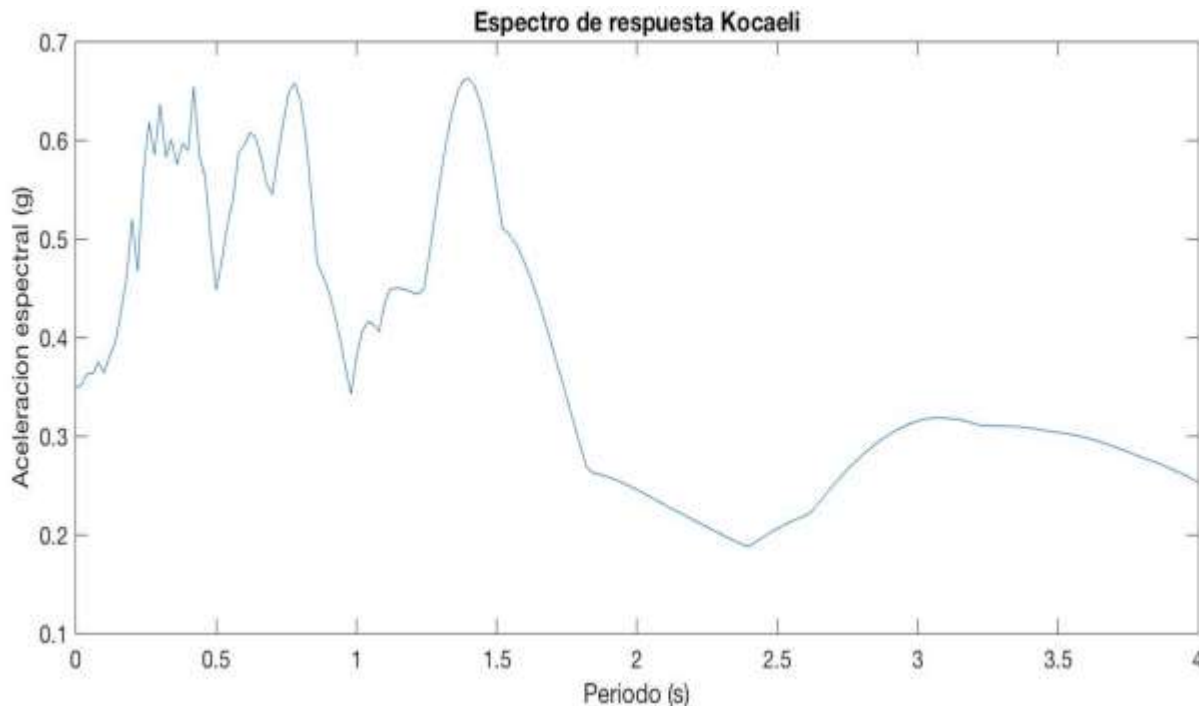
### 5.3.3 Efectos de la demanda

Al realizar los análisis anteriores se descubrió que tanto el Factor de seguridad dinámico como el indicador de daño Drift no tienen ninguna relación directa, todo esto debido a que ambos factores dependen completamente de la demanda sísmica. Esto explica de cierta forma el por qué para ascendentes niveles de demanda los niveles de daño son mayores y los FS tienden a aumentar. En las figuras anteriores se vieron casos que salían de la tendencia promedio tanto para Fs, Drift y giro de fundación. Uno de estos casos fue el registro de Kocaeli, el cual presentaba grandes deformaciones pese a su baja intensidad de demanda. Para evaluar este fenómeno se procedió a analizar como interviene la interacción Suelo-Fundación-Estructura en la obtención de la demanda de diseño. En consideración a esto, se procede a determinar los nuevos periodos del sistema con base flexible, los cuales son determinados a través de las ecuaciones empíricas propuestas por J. Stewart et al., 1999.

A continuación, en la tabla 6, se muestran los periodos del sistema con base flexible, los cuales fueron determinados en función de los periodos con base fija, tipo de suelo y ancho de fundación.

**Tabla 6: Periodos con base Flexible**

B (m)	Vs220			Vs250		
	Periodos base fija (s)			Periodos base fija (s)		
	t'0,3(s)	t'0,7(s)	t'1,2(s)	t'0,3(s)	t'0,7(s)	t'1,2(s)
<b>6</b>	3,70	8,56	14,66	3,02	6,99	11,96
<b>9</b>	2,05	4,71	8,05	1,68	3,86	6,59
<b>12</b>	1,37	3,11	5,31	1,13	2,57	4,38
<b>17</b>	0,87	1,94	3,30	0,73	1,63	2,78
<b>20</b>	0,72	1,59	2,70	0,61	1,36	2,30
<b>23</b>	0,62	1,36	2,30	0,54	1,18	2,00
<b>26</b>	0,56	1,20	2,03	0,49	1,06	1,79
<b>31</b>	0,48	1,03	1,74	0,43	0,93	1,58



**Figura 16: Espectro de respuesta Registro Kocaeli**

En la figura 16 se muestra el espectro de respuesta para el registro de Kocaeli, el cual se diferencia de las demás demandas en las elevadas aceleraciones espectrales presentes para periodos altos (3s).

Al vincular como intervienen los periodos de base flexible en la obtención de la demanda mediante el espectro de respuesta, se puede inferir a partir de la tabla 6 lo siguiente:

A medida que el ancho de fundación va en ascenso los periodos de base flexible tienden a disminuir, induciendo altos niveles de demanda, tal como se observa en la figura 16, y a su vez para menores tamaños de fundación (6m) se presentan periodos mayores del orden de los 3,7(s), los cuales para este registro en particular siguen produciendo altos niveles de demanda y por lo consiguiente mayores niveles de daño.

Cabe destacar que, al considerar una estructura flexible con un periodo de 1,2(s) los periodos de base flexible para los distintos anchos de fundación también tienden ir en ascenso como muestra la tabla 6, lo cual explicaría los bajos niveles de aceleración espectral inducidos para una demanda en específico.

Al momento de considerar un aumento de rigidez en el suelo (VS250), los periodos con base flexible tienden a disminuir para los anchos de fundación y periodos de base fija, lo cual justifica los mayores niveles de daño producidos para este tipo de suelo comparado con un tipo de suelo con VS220.

#### 5.4 Análisis finales

Teniendo en consideración la relevancia de la demanda tanto en el Factor de seguridad como en el Drift, se presentan los siguientes análisis con la intención de determinar un tipo de relación entre estos indicadores.

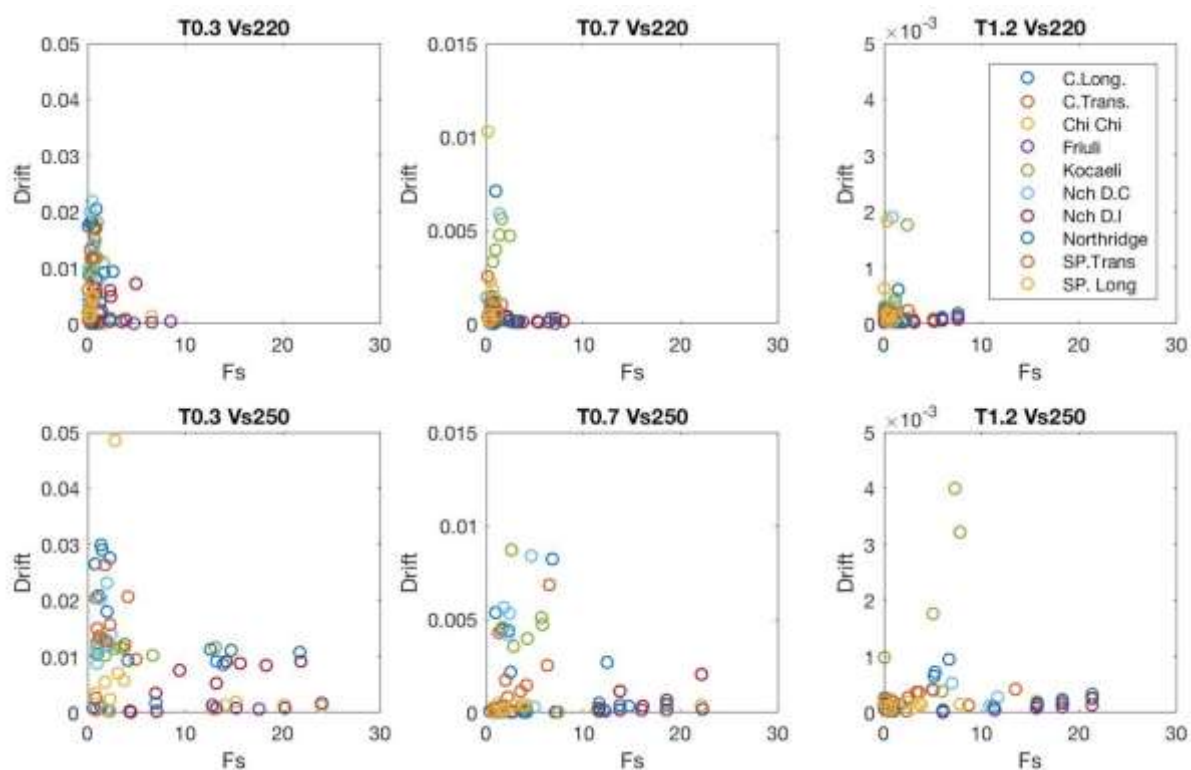


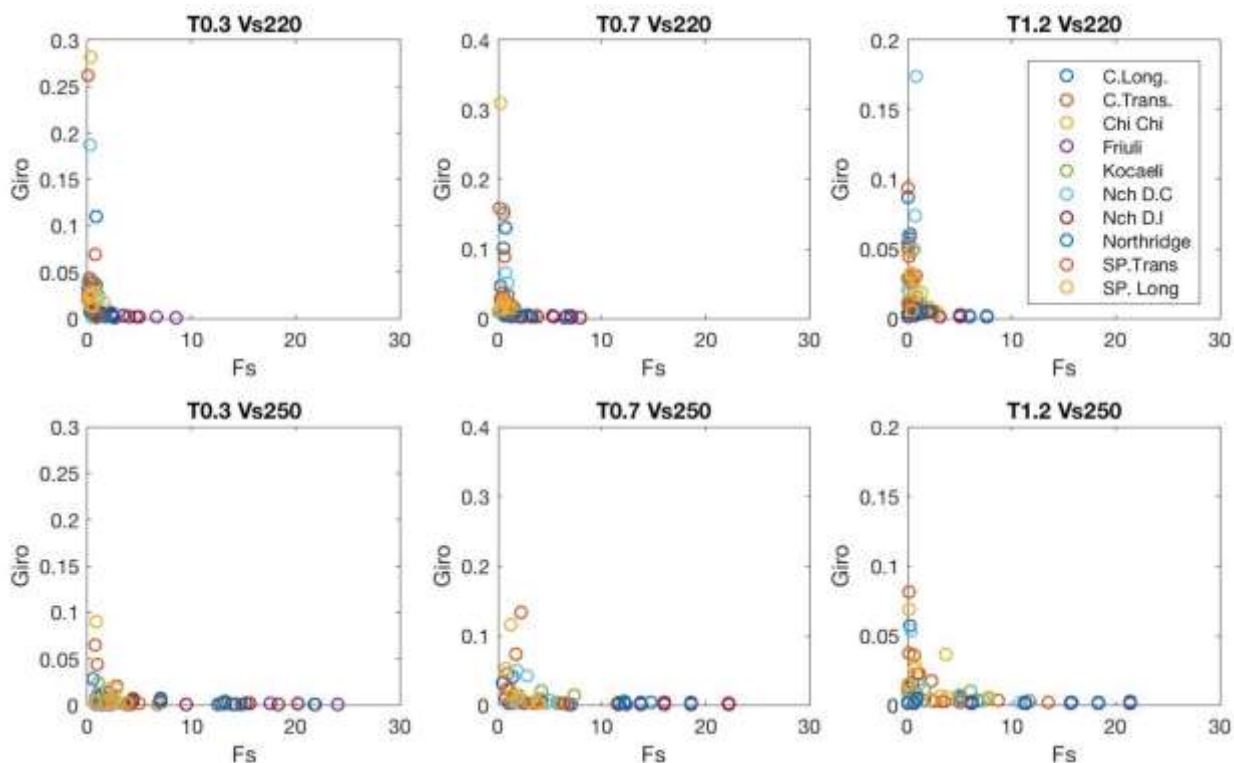
Figura 17: Comparación por tipo de suelo. Drift/ Fs.

En la figura 17 se presenta la comparación entre Drift/Fs para una estructura de 0.1G de capacidad. Para un periodo  $T=0.3(s)$  y un suelo con VS220 se observan elevados niveles de daño del orden del 2.5% para la mayoría de los registros seleccionados, los cuales superan el 0.2% de drift de fluencia. Estos niveles de daño están asociados a bajos valores de Factor de seguridad, lo cual es justificado en base a los altos niveles de demandas que presentan los registros para este periodo y tipo de suelo en particular, llegando a valores de  $F_s$  cercanos a 1 para los registros con altos niveles

de demanda y  $F_s$  cercanos a 7 para los registros con menores niveles de intensidad de Arias. Realizando este mismo análisis para un suelo con mayor rigidez (VS250), se presenta un aumento considerable en las variables  $F_s$  y Drift, llegando a valores cercanos al 5% de drift para los registros con mayores niveles de demanda y  $F_s$  cercanos a 25 para registros con bajos niveles de demanda. Para estructuras con periodo  $T=0,7(s)$  y  $T=1,2(s)$  apoyadas en suelo con VS220, se presenta una disminución en los niveles de daño debido a la flexibilización del sistema y por ende a la disminución de la demanda, alcanzando valores pick de drift del orden del 0.5% para un periodo de 0,7s y valores muy por debajo del drift de fluencia para una estructura con periodo 1,2s. Esta disminución en los niveles de demanda genera un aumento en lo que respecta a los  $F_s$  para gran parte de los registros, llegando a valores cercanos a 4 para bajas demandas y  $F_s$  del orden de 8 para bajas intensidades de Arias. Al realizar este mismo análisis para un suelo con VS250, se presenta un aumento para las variables de  $F_s$  y Drift, alcanzando valores pick de niveles de daño del orden del 0.8% para un periodo de 0,7(s) y valores cercanos al 0,2% del drift de fluencia para estructuras con periodos de 1,2(s). Respecto a los factores de seguridad, se tiene un aumento considerable debido al aumento de rigidez del suelo y por ende un aumento en la capacidad de soporte, llegando a valores próximos a 25 para los periodos 0,7(s) y 1,2(s).

En base al análisis de estos resultados, se puede establecer un tipo de relación inversa entre factor de seguridad y drift, mostrando claramente que para registros con mayores niveles de demanda los niveles de daño serán mayores y los  $F_s$  tenderán a ser muy bajos, y a la vez a medida que se flexibilice el sistema la demanda tiene a disminuir al igual que los niveles de daño y los niveles de factor de seguridad tienden a aumentar.





**Figura 18: Comparación por tipo de suelo. Giro/ Fs.**

En la figura 18 se presenta la comparación Giro/Fs para una estructura de capacidad de 0.1G.

Para un periodo de  $T=0,3(s)$  y un suelo de VS220 se encuentran niveles de giro de fundación que van del orden de los 0.3(rad) para registros con altos niveles de demanda hasta giros cercanos a 0 para los registros que presentan bajos niveles de demanda como lo es el registro de Friuli. Los elevados niveles de giro están asociados a factores de seguridad cercanos a 2 debido a los altos niveles de intensidad de Arias presentes en estos registros y a la vez para demandas con bajos niveles de giro los Fs alcanzan niveles cercanos a 8. Al momento de realizar este mismo análisis para un suelo con VS250, se presenta una disminución en los niveles de giro, alcanzando valores de 0,1(rad) para los registros con bajas demandas y valores casi nulos para los registros con baja intensidad de Arias. Todo esto es debido al aumento de rigidez del suelo, lo que a la vez favorece el aumento de los niveles de Fs para la estructura, alcanzando niveles que van de los 10 hasta los 25 para los registros Chi Chi y Friuli.

Para estructuras con periodos  $T=0,7(s)$  y  $T=1,2(s)$  apoyadas en suelo con VS220 se presenta un aumento en los niveles de giro, llegando a valores cercanos a 0.2(rad) para un periodo de 0,7(s) y

a 0,1(rad) para estructuras con periodos de 1,2(s). La disminución en el giro de fundación para un periodo de 1,2(s) comparado con la de 0,7(s), se debe a que el giro esta directamente relacionado con los niveles de demanda, por lo cual a medida que se flexibiliza el sistema los niveles de demanda disminuyen y por ende también el giro de fundación. Realizando este mismo análisis para un tipo de suelo con mayor rigidez (VS250) se presentan niveles de giro menores en comparación al tipo de suelo con VS220, los que van de los 0.1(rad) para estructuras con periodo 0,7(s) y cercanos a 0.7(rad) para estructuras con periodo 1,2(s). En cuanto a los niveles de Fs, se encuentra un aumento considerable comparado al tipo de suelo con menor rigidez, alcanzando valores cercanos a 25 para los registros de Chi Chi, Friuli y Northridge.

En base a los análisis de resultados anteriores, se puede establecer un tipo de relación inversa entre las variables giro de fundación y factor de seguridad, debido a que para mayores niveles de demanda el giro de fundación tiende ir en aumento y los niveles de factor de seguridad en descenso, y a la vez a medida que se flexibiliza el sistema los niveles de giro tienden a disminuir y los Fs tienden aumentar.

## 6 DISCUSIÓN FINAL

Dentro de las investigaciones de la SFSI, no existen estudios que vinculen la resistencia real aportada por el suelo, para un evento sísmico, con el subsecuente daño a la estructura. Es por esto que se determinó un Factor de Seguridad de carácter dinámico, donde se consideró a la solicitación como la real fuerza transmitida al suelo debido a una demanda sísmica, y de esta forma poder vincular la capacidad real con indicadores de daño estructural. Sin embargo en la investigación anterior propuesta por Burgos & Ojeda se propuso un factor de seguridad de carácter estático, donde se consideraba a la solicitación como el peso de la estructura transmitido al suelo, no involucrando a la demanda en términos de FS para los análisis posteriores de desempeño sísmico, lo cual cataloga a este FS como muy conservador.

Al momento de relacionar el FS con indicadores de daño estructural en la investigación previa, se comprobó mediante la representación gráfica que existía una relación directa entre estas dos variables, probando que para mayores niveles de factor de seguridad las deformaciones tienden a ir en aumento. Por lo contrario, en los análisis actuales no se logra relacionar estas dos variables de manera explícita, ya que tanto el Factor de Seguridad como el Drift están gobernados por la demanda sísmica.

Cabe destacar también que al considerar la SFSI en el diseño estimula a que el sistema se flexibilice aumentando sus periodos (Periodos de base Flexible) y amortiguamiento, siendo esta la razón por la cual estructuras con periodo rígido, baja capacidad y fundaciones pequeñas traen consigo bajos niveles de demanda, y no porque la capacidad de soporte de estas fundaciones sea mayor y permita protegerlas ante altas demandas.

Por otra parte, previamente se afirman especies de recomendaciones de diseño considerando la SFSI, en lo que respecta a resistencias y periodos estructurales, sin embargo la inexactitud de poder predecir el comportamiento de una demanda sísmica en términos de amplitud, duración y contenido de frecuencia, hacen que las investigaciones sigan considerándose un tanto limitadas para realizar este tipo de prácticas.

## 7 CONCLUSIONES

Pese a la cantidad de estudios sobre interacción suelo-fundación-estructura, al día de hoy, no existen investigaciones que vinculen la resistencia real aportada por el suelo ante un evento sísmico, con el subsecuente daño a la estructura. Siendo esta la causal del enfoque entregado en este trabajo de investigación.

En cuanto a la elección del dominio de estudio, se definieron casos y variables con la finalidad de obtener de amplio rango en términos de demandas sísmicas, capacidad de soporte y Factor de seguridad dinámico, para así de esta forma poder evaluar de manera optima el desempeño sísmico estructural.

La capacidad de soporte del suelo esta directamente relacionada con los distintos sistemas Suelo-Fundación propuestos inicialmente, a los cuales se le realizó un análisis monotónico tipo Pushover con la finalidad de obtener curvas de fuerzas de capacidad que definan la máxima resistencia del suelo. En función se obtuvieron resultados de capacidad de soporte para cada ancho de fundación y tipo de suelo, las cuales fueron analizadas y posteriormente graficados como curvas con un comportamiento lineal creciente en función del ancho de fundación. Cabe destacar que al aumentar la rigidez del suelo estas curvas de capacidad tienden a aumentar considerablemente.

Al momento de considerar la interacción suelo-fundación-estructura en los parámetros de diseño se asume una flexibilización del sistema, la cual trae consigo un aumento en los periodos de la estructura y en el amortiguamiento. En base a esto se procedió a calcular los periodos con base flexible del sistema, ya que son estos los responsables de cómo responde la estructura a las sollicitaciones sísmicas propuestas.

Para encontrar un tipo de relación entre la capacidad de soporte y el desempeño sísmico, fue necesario tener en consideración la relevancia de la demanda en las variables factor de seguridad, drift y giro de fundación. Para realizar esto, fue necesario independizar la demanda en términos de intensidad de Arias de las variables de interés, obteniendo una relación inversa entre la demanda y  $F_s$ , y una relación directa entre la demanda y los niveles de daño y giro de fundación. Tendiendo en consideración lo anterior se propuso encontrar algún tipo de relación entre estas variables, dentro de las que destacan:

Para estructuras con altos niveles de rigidez apoyadas en suelos flexibles, se presentaran elevados niveles de daño acompañado de bajos valores de factores de seguridad. Realizando esta misma

comparación pero con suelo mas rígido, tanto los valores de drift como de factor de seguridad tienden ir en aumento, todo esto es debido a que se genera una mayor demanda de desplazamiento para la estructura, no haciendo participe a la capacidad del suelo para proteger al sistema estructural.

Para estructuras mas flexibles apoyadas en suelos blandos, se presentan mínimos niveles de daño estructural acompañado de altos niveles de factor de seguridad, lo cual se debe, que al considerar una flexibilización del sistema los niveles de demanda tienden a disminuir por la participación de la capacidad de soporte del suelo en la resistencia total del sistema estructural ante una sollicitación sísmica.

## 8 REFERENCIAS

- Anastasopoulos, I., G. Gazetas, M. Loli, M. Apostolou, and N. Gerolymos (2010) Soil failure can be used for seismic protection of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 8(2). 309–326.
- Burgos, G., and Ojeda, D. (2016). Análisis de la influencia de la capacidad de soporte de la fundación en el desempeño sísmico de estructuras . Proyecto de Titulo , 1, 35.
- Ciampoli, M., & Pinto, P. E. (1995). EFFECTS OF SOIL-STRUCTURE INTERACTION ON INELASTIC SEISMIC RESPONSE OF BRIDGE PIERS. *Journal of Structural Engineering*, 121(5).
- Gazetas, G., and Apostolou, M. (2004). Nonlinear Soil–Structure Interaction: Foundation Uplifting and Soil Yielding. Proceeding of the Third UJNR Workshop on Soil-Structure Interaction. Menlo Park, California, USA.
- Geuzaine, C., Remacle, J.F., 2009, Gmsh: a three-dimensional finite element mesh generator with built-in pre- and post-processing facilities. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 79 (11), 1309-1331.
- Guendelman, T., and Lindenberg (2010) Cambio en Solicitaciones Sísmicas en Edificios, seminario Efectos del Terremoto en el Nuevo Diseño Sísmico y Estructural en Chile, ICH NOV.
- Harden, C., Hutchinson, T., & Moore, M. (2006). Investigation into the Effects of Foundation Uplift on Simplified Seismic Design Procedures. *Earthquake Spectra*, 22(3), 663–692.
- Jeremić, B., G. Jie, M. Preisig, and N. Tafazzoli (2009) Time domain simulation of soil–foundation–structure interaction in non-uniform soils. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 38(5). 699–718.
- Khoshnoudian, F., Ahmadi, E., & Nik, F. A. (2013). Inelastic displacement ratios for soil-structure systems. *Engineering Structures*, 57, 453–464.
- Kramer, S. *Geotechnical Earthquake Engineering*. (1996).
- Lagos, R., M. Kupfer, J. Lindenberg, P. Bonelli, G. R. Saragoni, T. Guendelman, L. Massone, R. Boroschek and F. Yañez (2012) Seismic performance of high-rise concrete buildings in Chile. *International Journal of High-Rise Buildings*. 1(3). 181–194

- Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R. L. (1969). Finite Dynamic Model For Infinite Media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 95(4), 859–878.
- Moghaddasi, M., M. Cubrinovski, J. G. Chase, S. Pampanin, and A. Carr (2011) Probabilistic evaluation of soil–foundation–structure interaction effects on seismic structural response. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. 40(2). 135–154.
- Mylanokis, G., G. Gazetas (2001) - Simplified model for seismic pile bending at soil layer interfaces. *Soils and Foundations*, 41, n. 4, pp. 47-58.
- Mylonakis, G., Syngros, C., Gazetas, G., & Tazoh, T. (2006). The role of soil in the collapse of 18 piers of Hanshin Expressway in the Kobe earthquake. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 35(5), 547–575.
- Pecker, A., R. Paolucci, C. Chatzigogos, A. A. Correia, and R. Figini (2013). The role of nonlinear dynamic soil-foundation interaction on the seismic response of structures. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 12(3). 1157–1176.
- SEAOC (1995) Vision 2000 - A Framework for Performance Based Earthquake Engineering. Structural Engineers Association of California. USA.
- Silvia Mazzoni, Frank McKenna, Michael H. Scott, Gregory L. Fenves. (2007) OpenSees Command Language Manual.
- Stewart, J.P., Fenves, G.L. and Seed, R.B. (1999). “Seismic soil-structure interaction in buildings. I: Analytical aspects,” *J. Geotech. & Geoenviron. Engrg.*, ASCE, 125 (1), 26-37.
- Trombetta, N., Mason, H., Hutchinson, T., Zupan, J., Bray, J., & Kutter, B. (2014). Nonlinear Soil–Foundation–Structure and Structure–Soil–Structure Interaction: Centrifuge Test Observations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 140(5), 04013057.
- Yang, Z (2009). Finite element response sensitivity analysis of multi-yield-surface J 2 plasticity model by direct differentiation method.
- Zhang, X. and Ren, L., (2003). Lattice Boltzmann model for agrochemical transport in soils. *Journal of Contaminant Hydrology*, 67:27-42.