

**UNIVERSIDAD DEL BÍO – BÍO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**Profesor Patrocinante:** Ing. Franco Benedetti Leonelli

**Profesores Comisión:** Mg. Gilda Espinoza

Mg. Alexander Opazo

**“ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA DEBIDO  
A LA INTERACCIÓN SUELO – ESTRUCTURA EN EDIFICIOS REGULARES DE  
MEDIANA ALTURA DE HORMIGÓN ARMADO”**

**Proyecto de Título presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de  
Ingeniero Civil**

**IRIS OLGA GRANDÓN GODDARD**

Concepción, Marzo 2015

*Dedicatoria:*

*A las personas más bellas que he de encontrar en mi camino,  
a quienes con todo amor y gozo consagraré siempre cada  
uno de mis triunfos, siendo ustedes el mayor de ellos.*

*Dios, Padres y hermano.*

## NOMECLATURA

ACI	:	(American Concrete Institute) Instituto Americano del Concreto.
ASCE	:	(American Society of Civil Engineers) Sociedad Americana de Ingenieros Civiles
D.S.61	:	Decreto Supremo número 61.
ISE	:	Interacción Suelo-Estructura.
L/a	:	Largo/ancho.
S <sub>a</sub>	:	Pseudoaceleración.
S <sub>d</sub>	:	Desplazamiento.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS .....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
RESUMEN.....	2
ABSTRACT .....	3
1. INTRODUCCIÓN .....	4
1.1. Objetivos de la Investigación.....	5
1.1.1. Objetivo general .....	5
1.1.2. Objetivos específicos.....	5
2. GENERALIDADES.....	6
2.1. Interacción Suelo-Estructura.....	6
3. METODOLOGÍA .....	9
3.1 Parámetros de análisis.....	9
3.1.1. Densidad de muros .....	9
3.1.2. Relación L/a de la fundación .....	9
3.1.3. Número de pisos .....	10
3.2. Elaboración de los modelos y obtención de periodos fundamentales en base fija .....	11
3.3. Estimación de periodos fundamentales de modelos para base flexible .....	12
3.4. Estudio de la variación de las coordenadas espectrales .....	14
3.5.1 Espectro de pseudoaceleración y desplazamiento normativos .....	14
3.5.2. Espectro de pseudoaceleración 27/F.....	14
3.5.3. Variación de las coordenadas espectrales.....	16
3.5. Determinación del parámetro $\sigma$ .....	16
4. RESULTADOS .....	17
4.1. Incremento periodo fundamental.....	17
4.2. Variación coordenadas espectros normativa chilena.....	17
4.2.1. Variación coordenadas espectro de pseudoaceleración.....	17
4.2.2. Variación coordenadas espectro desplazamiento .....	19
4.3. Variación coordenadas espectrales registro 27/F .....	21
4.4. Propuesta para estimar el incremento del periodo fundamental.....	23
5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....	26
6. REFERENCIAS .....	29
ANEXOS.....	31

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura n°1 Tipos de base para fundación	7
Figura n°2 Fuerzas participantes en condición de base flexible	7
Figura n°3 Modelos analizados (a) Modelo $(L=a)(1.5\%)(10p)$ – (b) Modelo $(L=2a)(1.5\%)(10p)$ - (c) Modelo $(L=3a)(1.5\%)(10p)$ – (d) Estructuración del modelo (vista en planta)	11
Figura n°4 Factores de rigidez para fundación rígida. Aproximación versus solución de Apsel y Luco (1987)	13
Figura n°5 Comparación del espectro de diseño del código sísmico con espectros de terremotos reales.	15
Figura n°6 Incremento de periodos fundamentales base fija	17
Figura n°7 Variación pseudoaceleración espectro norma chilena (a) Para $L/a=1$ – (b) Para $L/a=3$	18
Figura n°8 Variación pseudoaceleración promedio (a) Para suelo tipo A - (b) Para suelo tipo E	19
Figura n°9 Variación desplazamiento espectro norma chilena ( $L/a=3$ )	20
Figura n°10 Variación desplazamiento promedio espectro norma chilena (a) Para suelo tipo A - (b) Para suelo tipo D	21
Figura n°11 Variación pseudoaceleración sismo 27/F para $L/a=1$ (a) Registro longitudinal ( $L/a=1$ ) – (b) Registro transversal	22
Figura n°12 Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal (a) Para suelo tipo A - (b) Para suelo tipo D	22
Figura n°13 Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro transversal (a) Para suelo tipo B - (b) Para suelo tipo E	23
Figura n°14 Estimación incremento de $T_n$ (Suelos A, B y C)	24
Figura n°15 Estimación incremento de $T_n$ (Suelos D y E)	24

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla n°1 Identificación de cada modelo	10
Tabla n°2 Información líneas de tendencia	25

**Alcance:**

*La presente memoria de título estudiará la influencia que poseen determinados parámetros de diseño en el desarrollo del fenómeno Interacción Suelo-Estructura, específicamente en la interacción inercial.*

*Por otro lado, cabe mencionar que los resultados expuestos en este informe son los de mayor relevancia y aquellos que expresan con mayor claridad el tema abordado. Los demás resultados estarán disponibles en los anexos.*

# **ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DE LA DEMANDA SÍSMICA DEBIDO A LA INTERACCIÓN SUELO – ESTRUCTURA EN EDIFICIOS REGULARES DE MEDIANA ALTURA DE HORMIGÓN ARMADO**

Autor: Iris Grandón Goddard

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Del Bío Bío

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

Profesor Patrocinante: Franco Benedetti Leonelli

Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad Del Bío Bío

[fbenedet@gmail.com](mailto:fbenedet@gmail.com)

## **RESUMEN**

A lo largo de los años se han desarrollado múltiples metodologías para conocer el comportamiento dinámico de estructuras, todas con distintos grados de dificultad, sin embargo muchas de estas por más elaboradas que sean no consideran la flexibilidad presente en el sistema suelo-estructura, factor que modifica en gran manera la demanda a la cual se ven enfrentadas las estructuras ante sollicitaciones sísmicas. No obstante existen metodologías que consideran un fenómeno llamado Interacción Suelo-Estructura (ISE), el cual utiliza en su procedimiento de análisis la influencia del suelo de fundación en el comportamiento propio de la estructura, teoría que será utilizada en el desarrollo de esta memoria permitiendo de esta forma determinar de qué manera se ve afectado el comportamiento de la estructura producto de la influencia de sus propiedades intrínsecas (nº de pisos, densidad de muros y relación L/a) y de las del terreno de cimentación.

Aplicada la metodología propuesta se obtiene que el fenómeno de ISE tiene gran influencia en el comportamiento dinámico de edificaciones rígidas fundadas en terrenos de baja densidad, ya que al poseer características dinámicas que contrastan una respecto a otra, se ve incrementado significativamente el desplazamiento y la demanda pseudoaceleraciones al cual es ve sometida durante un evento sísmico.

**Palabras clave:** Interacción suelo estructura, variación demanda sísmica, interacción inercial.

5595 Palabras Texto +16 Figuras/Tablas\*250 = 9595 Palabras Totales

## **STUDY OF CHANGES IN DEMAND DUE TO SEISMIC SOIL INTERACTION STRUCTURE-BUILDING HEIGHT MEDIUM REGULAR CONCRETE**

Author: Iris Grandón Goddard

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

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

Professor Sponsor: Franco Benedetti Leonelli

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Bío Bío

[fbenedet@gmail.com](mailto:fbenedet@gmail.com)

### **ABSTRACT**

Over the years there have been multiple methodologies to determine the dynamic behavior of structures, all with varying degrees of difficulty, however many of these more elaborate than regard flexibility in the soil-structure system factor greatly modified demand which are confronted structures under seismic loads. However there are methodologies that consider a phenomenon called Soil-Structure Interaction (ISE), which uses in its method of analysis the influence of foundation soil in the proper behavior of the structure, theory will be used in the development of this specification allowing thus determine how the behavior of the product of the influence of their intrinsic properties (number of floors, walls and density ratio  $L / a$ ) and the foundation soil structure is affected.

Applied the proposed methodology is obtained that the phenomenon of ISE has great influence on the dynamic behavior of rigid constructions based on low-density land, Because it has dynamic characteristics that contrast relative to each other, is significantly increased displacement and demand pseudo accelerations to which it is subjected during a seismic event.

**Keywords:** soil interaction structure, seismic demand variation, inertial interaction.

## 1. INTRODUCCIÓN

Durante el desarrollo del análisis y diseño estructural de una edificación, el calculista considera una serie de supuestos, los cuales poseen el objetivo de simplificar el análisis, y raudamente así conocer el comportamiento de la estructura ante diferentes escenarios a los cuales se verá enfrentada durante su vida útil. Una de las hipótesis quizás más utilizadas a lo largo del tiempo, ha sido considerar la estructura empotrada a la superficie de terreno, donde se define por defecto que el área sobre el cual se implementa la superestructura es una planicie de apoyo rígida e indeformable. Pero los fundamentos que sostienen este supuesto distan mucho de lo que se exhibe en realidad, dado que el suelo de fundación experimenta una serie de deformaciones producto de su naturaleza, como también a través de los esfuerzos adicionales a los cuales estará sometido producto de la implementación de la estructura sobre este. Diversos autores han investigado y buscado la manera de implementar en métodos de cálculo la influencia que posee la estructura en el comportamiento del terreno de fundación y de esta manera visualizar una respuesta sísmica de la edificación más aproximada a la realidad. Y es así que a través de estas investigaciones surge una teoría que en sus esbozos plantea la consideración del comportamiento dinámico del suelo, definiendo al suelo como un medio susceptible a deformaciones, teoría hoy es conocida como Interacción Suelo-Estructura.

Es así, que el presente proyecto de título se centra en determinar la influencia que poseen determinados parámetros de diseño (relación  $L/a$ , densidad de muros, tipología de suelo y número de pisos) en el comportamiento dinámico de estructuras, permitiendo de esta forma, visualizar a través de los mismos variaciones en las coordenadas espectrales que los modelos estructurales experimentarían, modificando de esta manera las demandas a las cuales estarán sometidos.

## **1.1. Objetivos de la Investigación**

### **1.1.1. Objetivo general**

- Análisis de la variación de la demanda sísmica debido al efecto inercial de la Interacción Suelo – Estructura en edificios tipo de hormigón armado.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Sintetizar el estado del arte de la evaluación Interacción Suelo-Estructura y su relación con la demanda sísmica.
- Desarrollar un diseño experimental con las variables relevantes en el fenómeno Interacción Suelo – Estructura.
- Construir modelos analíticos y obtener resultados mediante la aplicación de la metodología propuesta en la literatura y por software.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos y definir el rango de valores de los parámetros incidentes para la efectiva aplicación del método ISE.

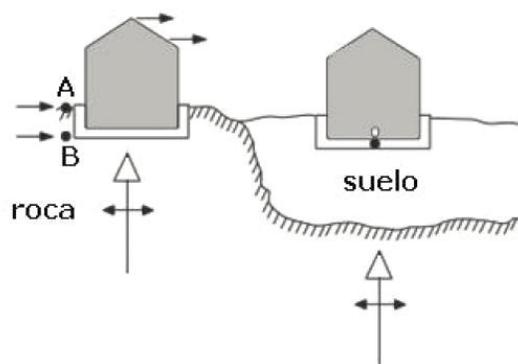
## 2. GENERALIDADES

Para el desarrollo de la presente memoria resulta importante tener claros los conceptos respecto a la Interacción Suelo-Estructura, tema que será expuesto a continuación.

### 2.1. Interacción Suelo-Estructura

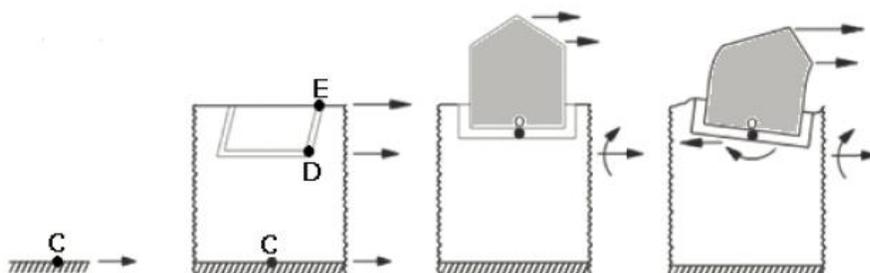
Se conoce como Interacción Suelo-Estructura (ISE) a las modificaciones generadas en el movimiento del terreno y en la respuesta dinámica de la superestructura debido a la flexibilidad relativa que existe en el sistema suelo-fundación respecto a la rigidez del sistema. En pocas palabras, la ISE es la consideración de la flexibilidad del suelo de cimentación de forma que la estructura ya no se encuentra empotrada en la base. Una forma fácil de visualizar la ISE es mediante la variación de los desplazamientos experimentados durante un sísmico. Si los movimientos de campo libre son diferentes a los del sistema de fundación se dice que la ISE existe. Por otro lado, si los movimientos de campo libre son iguales a los de la fundación de la estructura entonces este fenómeno no se desarrolla. Ahora bien, para identificar de mejor forma los principales efectos que genera el considerar la base de la edificación deformable es necesario conocer las principales diferencias que tienen ambos modelos (base rígida v/s base flexible).

Considerando dos estructuras iguales, una fundada sobre un lecho rocoso (base rígida), mientras que la otra está sobre un suelo de baja rigidez (base flexible), todo esto como se muestra en la figura n°1. Para el caso en el que la estructura se encuentra sobre una base indeformable, los movimientos en toda la fundación son iguales (puntos A y B), considerando que la excitación varía muy poco en todo el estrato rocoso. En cuanto a la respuesta de la estructura, esta primordialmente estará dada por las propiedades de la misma (rigidez, masa y amortiguamiento), así como los desplazamientos que sean permitidos por su deformidad. Mientras que para la condición de base flexible el análisis debe ser subdividido para una mayor comprensión, lo cual es señalado a través de la figura 2.



**Figura n° 1 - Tipos de base para fundación**

De forma análoga al caso anterior, el punto C corresponde al movimiento en el estrato rocoso, pero esta vez en base flexible. Dado que en esta situación se presenta un estrato que descansa sobre un lecho rocoso, al poseer propiedades distintas el uno del otro se genera una variación entre los movimientos de los puntos C, D y E, variación que se traduce en una amplificación del movimiento. Mientras que para el caso anteriormente expuesto, los movimientos que estos tres puntos experimentaban eran los mismos.



**Figura n°2 - Fuerzas participantes en condición de base flexible**

Ahora bien, al introducir al mismo la cimentación correspondiente, al ser un elemento de gran y mayor rigidez respecto al suelo, el campo de desplazamientos que sufriría el terreno en ausencia de fundación se verá modificado producto de la presencia de esta. Además, todo esto genera una disminución de la amplitud del movimiento y adicionalmente introduce una excitación rotación en la base de la fundación (punto O), producto que los puntos D y E están impedidos de moverse de manera independiente entre ellos. A las modificaciones del movimiento, debido a la presencia de un elemento de mayor rigidez se denomina “Interacción cinemática”.

Por otro lado, si ahora la estructura es sometida a excitaciones, los movimientos que se generan estarán compuestos por tres importantes componentes. En primer lugar, los movimientos traslacionales inducidos por las fuerzas de inercia de la estructura en el sistema suelo-fundación. Como segundo elemento, se tienen los movimientos producto de los giros impuestos en el sistema suelo-fundación y por los momentos de volteo producto de las fuerzas de inercia de la superestructura. Y finalmente, los desplazamientos permitidos por las propiedades y deformabilidad intrínseca de la estructura. Esta parte, donde se consideran las deformaciones generadas por las fuerzas de inercia de la superestructura sobre el sistema suelo-fundación, se denomina “Interacción inercial”. Los efectos más estudiados de la interacción inercial son la modificación del amortiguamiento y alargamiento del periodo fundamental, entre otros. Desde el punto de vista de la presente memoria, cabe señalar que será estudiada la influencia del incremento del periodo fundamental, ya que dado una cierta condición de demanda sísmica de diseño, al aumentar  $T_n$ , significa que esta puede cambiar, traducándose en aumento o reducción de las fuerzas de diseño.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1 Parámetros de análisis

La cantidad de modelos en estudio resulta como producto de la combinación de los parámetros de análisis involucrados en el estudio, los cuales son los siguientes:

##### 3.1.1. Densidad de muros

La densidad de muros se define mediante la siguiente expresión:

$$d = \frac{\text{Área de muros en una dirección [m}^2\text{]}}{\text{Área de planta del piso considerado del edificio [m}^2\text{]}} \quad \text{Ec. (1)}$$

Ahora bien, para determinar cuáles serían las densidades con las que se trabajará, se utiliza lo recomendado en la investigación por Calderón C., Javier (2007). Esta investigación, a partir de los edificios estudiados llegó a concluir que la densidad de los muros en planta está dentro de un rango, donde sus valores fluctúan entre 0.015 – 0.035. Para el contexto de la presente memoria, se analizarán tres condiciones de densidad de muros, cuyos valores serán 0.015, 0.035 y 0.025, donde el último de estos corresponde a la media entre los valores límites del rango de densidad de muros.

##### 3.1.2. Relación L/a de la fundación

Con respecto a las dimensiones en planta de los modelos estructurales cabe señalar que se tuvo presente como referencia lo señalado en el punto 12.3.1.2 del ASCE 7-10, normativa que establece una razón máxima de 3 entre el largo y ancho de la base de la estructura, sujeto a la condición que la estructura no debe presentar ninguna de las irregularidades horizontales definidas en la tabla 12.3-1, del mismo artículo, para que esta pueda ser considerada rígida. Dado lo anteriormente expuesto, se definieron las siguientes tipologías de planta a evaluar en el análisis:

L/a =1

L/a =2

L/a =3

3.1.3. Número de pisos

El número de pisos de los modelos varía en el rango comprendido entre 5 a 25 pisos para todos los modelos a excepción de aquello con relación  $L/a=3$ . Todo esto teniendo como base las alturas de los edificios construidos a nivel país, donde las alturas promedio se encuentran comprendidas en dichos márgenes.

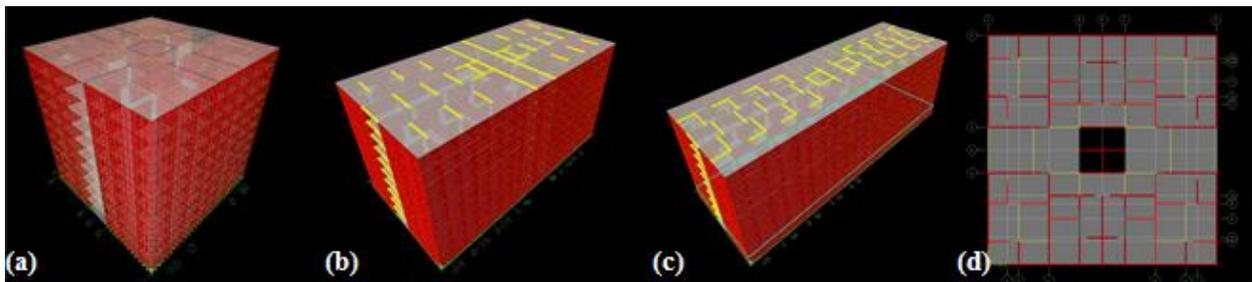
A partir de la combinación antes mencionada, los modelos que deberán ser estudiados y analizados corresponden a 42 modelos los son señalados con sus respectivas propiedades de diseño y nombre a través de la tabla n°1.

L/a	Densidad muros	Nº pisos	Modelo
1	1.5%	5	(L=a)(1.5%)(5p)
		10	(L=a)(1.5%)(10p)
		15	(L=a)(1.5%)(15p)
		20	(L=a)(1.5%)(20p)
		25	(L=a)(1.5%)(25p)
	2.5%	5	(L=a)(2.5%)(5p)
		10	(L=a)(2.5%)(10p)
		15	(L=a)(2.5%)(15p)
		20	(L=a)(2.5%)(20p)
		25	(L=a)(2.5%)(25p)
	3.5%	5	(L=a)(3.5%)(5p)
		10	(L=a)(3.5%)(10p)
		15	(L=a)(3.5%)(15p)
		20	(L=a)(3.5%)(20p)
		25	(L=a)(3.5%)(25p)
2	1.5%	5	(L=2a)(1.5%)(5p)
		10	(L=2a)(1.5%)(10p)
		15	(L=2a)(1.5%)(15p)
		20	(L=2a)(1.5%)(20p)
		25	(L=2a)(1.5%)(25p)
	2.5%	5	(L=2a)(2.5%)(5p)
		10	(L=2a)(2.5%)(10p)
		15	(L=2a)(2.5%)(15p)
		20	(L=2a)(2.5%)(20p)
		25	(L=2a)(2.5%)(25p)
	3.5%	5	(L=2a)(3.5%)(5p)
		10	(L=2a)(3.5%)(10p)
		15	(L=2a)(3.5%)(15p)
		20	(L=2a)(3.5%)(20p)
		25	(L=2a)(3.5%)(25p)
3	1.5%	5	(L=3a)(1.5%)(5p)
		10	(L=3a)(1.5%)(10p)
		15	(L=3a)(1.5%)(15p)
		20	(L=3a)(1.5%)(20p)
	2.5%	5	(L=3a)(2.5%)(5p)
		10	(L=3a)(2.5%)(10p)
		15	(L=3a)(2.5%)(15p)
		20	(L=3a)(2.5%)(20p)
	3.5%	5	(L=3a)(3.5%)(5p)
		10	(L=3a)(3.5%)(10p)
		15	(L=3a)(3.5%)(15p)
		20	(L=3a)(3.5%)(20p)

**Tabla n°1 – Identificación de cada modelo**

### 3.2. Elaboración de los modelos y obtención de periodos fundamentales en base fija

En cuanto a estructuración y arquitectura, cabe mencionar que la estructura tipo fue definida con cimentación del tipo losa superficial, con largo y ancho igual a las respectivas longitudes de la base de la superestructura y espesor de 100[cm]. Las dimensiones en planta de la superestructura, largo y ancho son de 30[m], donde el largo de la edificación (dirección X) para cada caso se encuentra sujeto a modificaciones producto del enfoque del análisis, dichas variaciones se basan en lo señalado en el punto 3.1.2., del presente texto. Además, la edificación posee una losa de entrepiso de espesor 20[cm], dimensión que estuvo condicionada por los requisitos mínimos establecidos en el ACI 318S-08, donde se detalla a través de la tabla 9.5(c) el mínimo espesor que deben poseer las losas de modo que las deflexiones cumplan con los requisitos establecidos por serviciabilidad. Por otro lado, cabe señalar que el sistema de losas de entrepiso fue considerado como diafragma rígido, permitiendo así reducir el número de variables de cálculo para el análisis. Además, se encuentra conformada por un sistema de muros y vigas, donde el espesor de los primeros varía según lo señalado en el punto 3.1.1., mientras que las vigas poseen sección definida de 30 x 30[cm]. En cuanto a materialidad, todos los elementos estructurales y no estructurales están diseñados en base a hormigón H25. La geometría de la superestructura es señalada a continuación:



**Figura n°3 – Modelos analizados**

**(a) Modelo (L=a) (1.5%) (10p) – (b) Modelo (L=2a) (1.5%) (10p)**  
**(c) Modelo (L=3a) (1.5%) (10p) – (d) Estructuración del modelo (vista en planta)**

En cuanto a las cargas aplicadas al sistema estructural, se han considerado sólo las de peso propio y sobrecargas de uso, todo esto de acuerdo a lo señalado en la tabla 4 de la Nch 1537 Of-2009 para estructuras del tipo habitacional. Además, a partir de la Nch 433 Of-1996 Mod-2009 la estructura que da definida como categoría II, dado que estará designada para uso habitacional, se

emplazará en zona sísmica 3 y con un factor de modificación de respuesta equivalente a 7, dado que el sistema estructural es en base a muros.

Para el análisis se estableció que estarían participando tres G.D.L. por piso, debido que al poseer base fija como sistema de unión al terreno de fundación, esto modificaría el comportamiento de la estructura, restringiéndola solo a dos traslaciones (direcciones X e Y) y una rotación. Mientras que para el cálculo de las masa a considerar se utilizó lo señalado en el punto 5.5.1 de la Nch 433 Of-1996 Mod-2009, donde se establece que *“Para el cálculo de las masas se deben considerar las cargas permanentes más un porcentaje de la sobrecarga de uso, que no puede ser inferior a 25% en construcciones destinadas a habitación privada o al uso público donde no es usual la aglomeración de personas o cosas, ni a un 50% en construcciones en que es usual esa aglomeración”*.

Finalmente la confección, prueba y obtención de resultados del análisis de los modelos estructurales (periodos fundamentales en base fija) fue llevada a cabo mediante el software ETABS v.9.7.4.

### 3.3. Estimación de periodos fundamentales de modelos para base flexible

Para el desarrollo de esta etapa fue utilizado Método Analítico, teoría que fue propuesta por Veletsos y Meek (1974), donde definieron la razón de incremento del periodo fundamental del modelo estructural al considerar la flexibilidad del suelo de fundación (ver ecuación n°2). La hipótesis sólo es válida para sistemas de 1G.D.L. y fue implementada dado que las estructuras sometidas al análisis son regulares y simétricas, donde además el primer modo de vibración posee gran participación (superior al 70%), siendo esta una buena aproximación.

$$\frac{\tilde{T}}{T} = \sqrt{1 + \frac{k}{k_u} + \frac{k * h^2}{k_\theta}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Con respecto a los parámetros de análisis participantes están,  $\tilde{T}$  y  $T$  que son los periodos fundamentales en base flexible y base rígida respectivamente,  $k$  la rigidez del sistema de 1GDL sobre base rígida y  $h$  corresponde a la altura modal efectiva. Además de los anteriores parámetros están,  $k_u$  que describe la rigidez traslacional y  $k_\theta$  la rigidez de balanceo. Ambas rigideces

dependen intrínsecamente de las características del suelo de fundación, que para este análisis corresponden a los suelos tipo A, B C, D y E detallados en el D.S. 61., 2011.

Las expresiones que definen las rigideces en cuestión son las siguientes, donde primeramente se detallan las rigideces traslacional y rotacional, ambas estáticas y forma análoga se presentan las dinámicas:

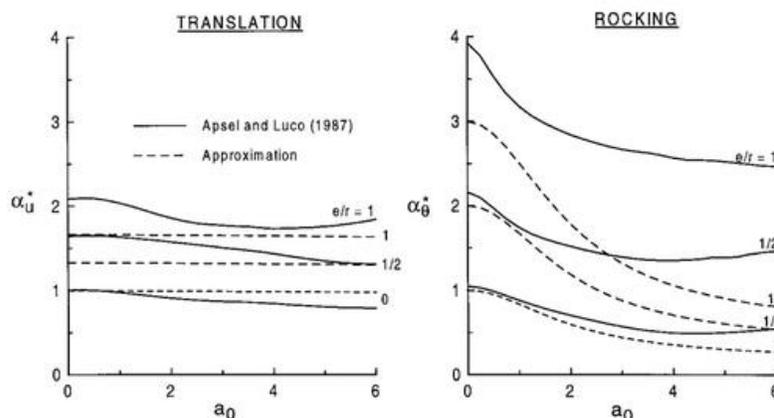
$$K_u = \frac{8}{2 - \nu} G * r_u \quad \text{Ec. (3)}$$

$$K_\theta = \frac{8}{3(1 - \nu)} G * r_\theta^3 \quad \text{Ec. (4)}$$

$$k_u = \alpha_u * K_u \quad \text{Ec. (5)}$$

$$k_\theta = \alpha_\theta * K_\theta \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde G es el módulo de corte dinámico del suelo;  $\alpha_u$  y  $\alpha_\theta$  son parámetros que son función de la frecuencia. La figura 5 muestra los factores para un  $\nu=0.4$  en el suelo.



**Figura n°4 – Factores de rigidez para fundación rígida. Aproximación versus solución de Apsel y Luco (1987).**

La frecuencia angular es representada por  $\omega$ ,  $a_0$  es la frecuencia adimensional calculada a partir de la siguiente expresión  $a_0 = \omega * r / V_s$ . Donde r es el radio de la fundación,  $V_s$  la velocidad de onda de corte del suelo obtenida a partir de la tabla Clasificación sísmica del terreno de fundación, del D.S. 61.

Los radios de fundación traslacional y de balanceo se calculan como el radio equivalente al área de fundación  $A_f$  y la inercia de fundación  $I_f$  de la fundación real.

$$a_0 = \frac{\omega * r}{V_s} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$r_u = \sqrt{\frac{A_F}{\pi}} \quad \text{Ec. (8)}$$

$$r_\theta = \sqrt[4]{\frac{4 * I_F}{\pi}} \quad \text{Ec. (9)}$$

### 3.4. Estudio de la variación de las coordenadas espectrales

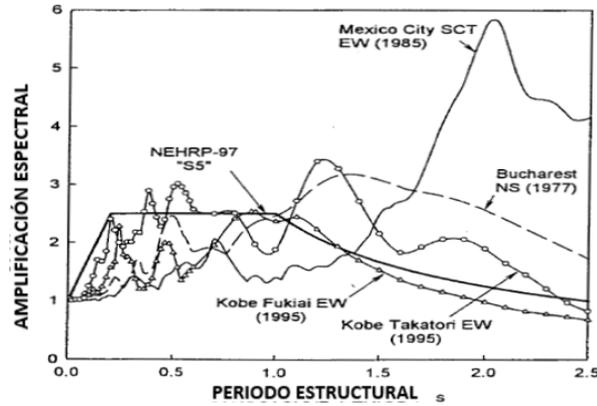
Se procederá fabricar dos tipos de espectros, los establecidos por normativa nacional y otra a partir de los registros del terremoto del 27 de febrero de 2010.

#### 3.5.1 Espectro de pseudoaceleración y desplazamiento normativos

Ambos serán generados de acuerdo a lo señalado en el D.S. 61 y la Nch 433 Of-1996 Mod-2009.

#### 3.5.2. Espectro de pseudoaceleración 27/F

El fundamento de la realización esta etapa radica en lo propuesto por Milonakis y Gazetas (2000), ellos propusieron la teoría de que generalmente los códigos de diseño utilizan espectros que no representarían necesariamente los probables eventos sísmicos futuros (ver figura n°5).



**Figura nº5 – Comparación del espectro de diseño del código sísmico con espectros de terremotos reales.**

El análisis utilizado para generar este espectro corresponde a una respuesta de sitio desarrollado dentro del rango elástico para los distintos perfiles de suelo, todo esto realizado a través del programa Deepsoil, el cual requería el ingreso del registro de aceleraciones en roca del sismo 27/F a la base de datos propia del programa, registro el cual inicialmente describía las mediciones longitudinales y transversales en superficie (epicentro). Por lo cual fue necesario desarrollar un proceso de deconvolución, para obtener así la señal sísmica percibida en el hipocentro.

Posteriormente fue necesario elaborar los perfiles de terreno cuyas propiedades a definir para su generación fueron las siguientes:

Velocidad onda de corte ( $V_s$ ): definida para cada tipo de suelo a partir de lo señalado en el DS 61 en el artículo 6, Tabla de clasificación sísmica del terreno de fundación.

Espesor (H): este parámetro queda definido al despejarlo de la siguiente ecuación (Kramer, 1996), donde T corresponde al periodo de vibración para cada tipo de suelo, definido en la tabla del punto 12.3 del DS 61 como  $T_0$  y  $V_s$  es la velocidad de onda de corte anteriormente definida.

$$T = \frac{4 * H}{V_s} \tag{Ec. (10)}$$

Amortiguamiento: dado que el análisis desarrollado es para rango elástico, la razón amortiguamiento presente en el estrato de suelo fue de 5 por ciento.

### 3.5.3. Variación de las coordenadas espectrales

Una vez finalizadas las anteriores etapas se procederá a encontrar la coordenada espectral correspondiente a cada periodo en base fija en cada uno de los espectros generados, para luego realizar de forma análoga el paso anterior, pero esta vez para los periodos de base flexible. De esta manera será posible visualizar de manera gráfica mediante comparación entre periodos de un mismo modelo, los cambios que puede experimentar la resistencia sísmica de la estructura, ya sea en términos de aceleración y/o desplazamiento, como la que pudo haber desarrollado durante la presencia del sismo del 27/F.

### 3.5. Determinación del parámetro $\sigma$

El parámetro  $\sigma$  definido por Veletsos y Nair (1975) describe la relación entre la rigidez del terreno y la rigidez de la estructura construida sobre él. Su función es ser un controlador crítico del incremento de  $T_n$ , por ello autores proponen que para estructuras convencionales, este debería alcanzar valores superiores a 2, ya que al incrementarse, el fenómeno se vuelve menos relevante. La expresión que define el parámetro en cuestión, es señalada a continuación:

$$\sigma = \frac{V_s * T}{h} \quad \text{Ec. (11)}$$

Donde  $V_s$  es la velocidad de propagación de ondas de corte,  $T$  el periodo en base fija de la estructura y  $h$  la altura modal para el periodo  $T$ .

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Incremento periodo fundamental

La figura n°6 resume el incremento que sufre el periodo fundamental resultante del análisis de cada modelo en condición de base fija producto de considerar posteriormente de la flexibilidad del terreno de fundación, todo esto para cada tipo de suelo. Respecto al comportamiento del periodo fundamental, cabe señalar que este se ve incrementado para cada uno de los casos expuestos, conforme la calidad del suelo disminuye el aumento de  $T_n$  se hace cada vez más notable. Esto debido a que al ser más flexible el suelo, la estructura implementada sobre este, tendría menor resistencia al movimiento en la base permitiendo de esta forma un campo de desplazamiento mayor y por consiguiente periodos de vibración mayor para cada estructura.

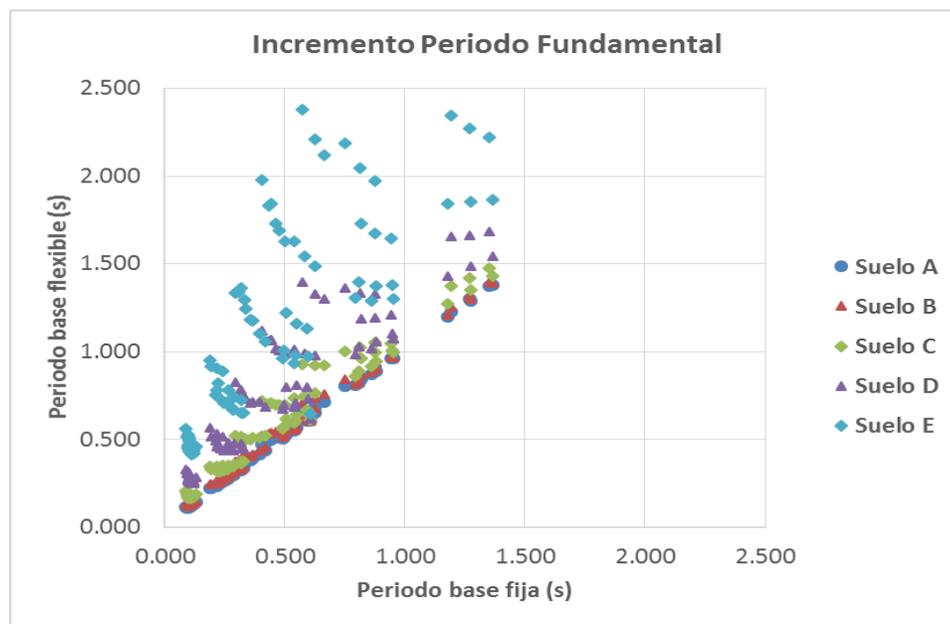


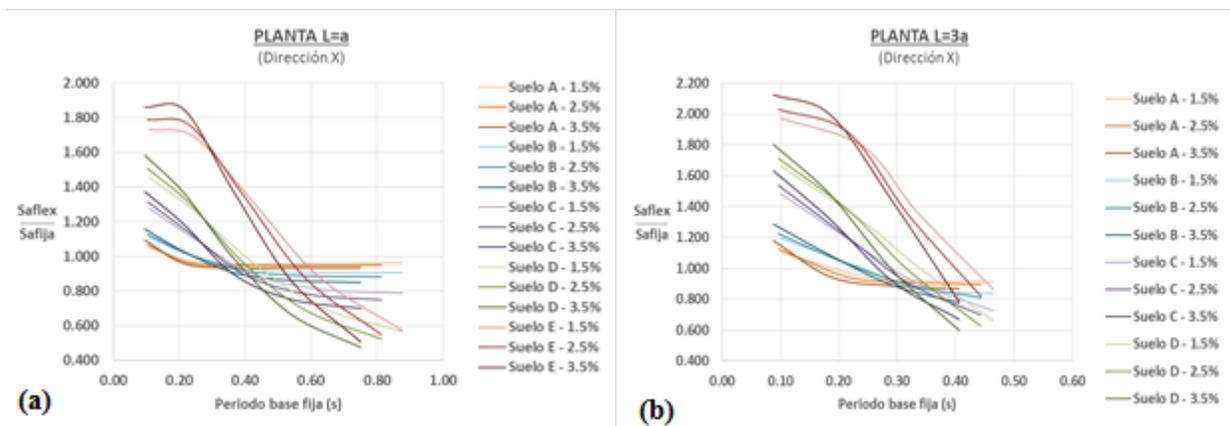
Figura n°6 – Incremento de periodos fundamentales base fija

### 4.2. Variación coordenadas espectros normativa chilena

#### 4.2.1. Variación coordenadas espectro de pseudoaceleración

Las figuras n°7(a) y (b) respectivamente demuestran las máximas y mínimas variaciones que experimenta la pseudoaceleración calculada para el rango de periodos de mayor masa traslacional en base fija. Es posible apreciar que cada una de las gráficas que describen la variación de pseudoaceleración posee un comportamiento decreciente con el aumento del periodo fundamental

de las estructuras, denotando mayor influencia de la ISE en estructuras de periodo de vibración bajo. Por otro lado, al contrastar ambas figuras es posible presenciar el incremento que tiene la  $S_a$  con la disminución de la calidad del suelo, manifestándose los mayores aumentos para suelos clasificados como tipo E, especialmente para aquellos modelos cuya planta es más alargada. No obstante la figura n°7 (a) posee una variación en este comportamiento, dado que llegado un punto el incremento de  $S_a$  en suelos con  $V_s$  menor se ve reducido, manifestando que en estructuras muy flexibles construidas sobre suelos blandos la variación de la demanda de aceleraciones se transformaría en una disminución al considerar base flexible, denotando que la zona de importancia es aquella donde las estructuras poseen rigidez muy superior con relación a la del terreno de fundación.



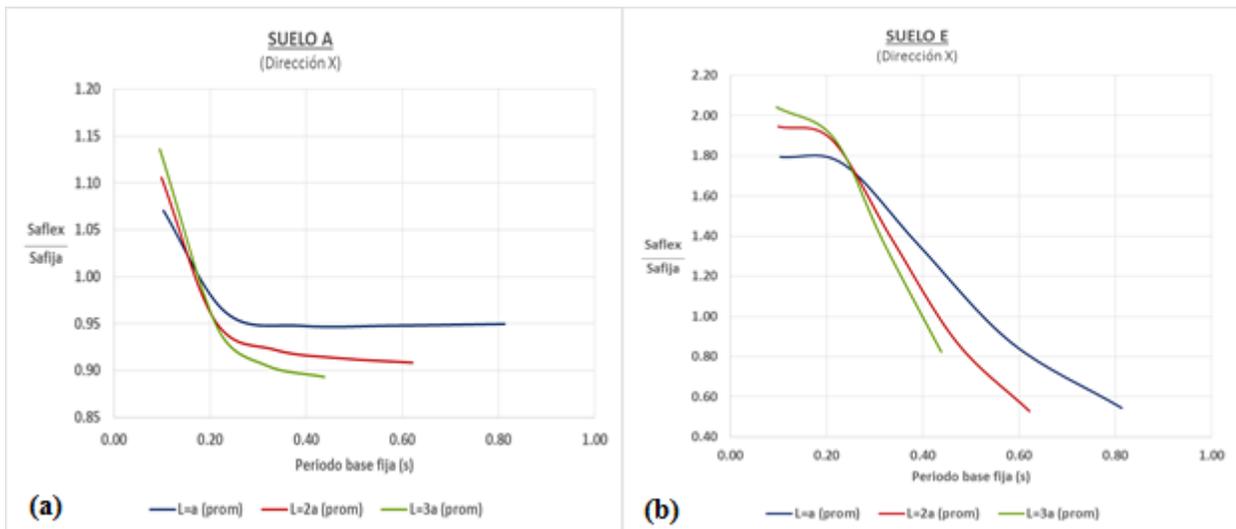
**Figura n°7 - Variación pseudoaceleración espectro norma chilena**

**(a) Para  $L/a=1$  – (b) Para  $L/a=3$**

A partir del comportamiento demostrado en las gráficas anteriores, donde las estructuras para distintas densidades de muros en una misma categoría de suelo presentan similar comportamiento durante todo el rango de periodos, se desarrolló una aproximación promedio para estos modelos, permitiendo de esta forma analizar el comportamiento de la variación de  $S_a$  al modificar la geometría de las edificaciones y la tipología de suelo presente. Todo esto se resume en la figura n°8, donde es posible ver los diferentes comportamientos descritos por estructuras en relación a la razón  $L/a$  y en condiciones de terreno más extremas, es decir, suelo tipo A y E.

Observando la figura expuesta se confirma el comportamiento descrito para las figuras anteriores, la variación de pseudoaceleración es decreciente con el aumento del periodo y a su vez, para el

caso de estructuras con mayor dimensión en planta esta variación de  $S_a$  es mayor para altas frecuencias, mientras que conforme el periodo de vibración aumenta esta característica se manifiesta para los modelos con  $L/a$  menor, revelando que conforme más rígida sea la estructura respecto al suelo más influyente es el incremento de pseudoaceleración. Por otro lado, al modificar el terreno de fundación según los distintos tipos de suelo que son señalados en la normativa, es posible apreciar que el rango de periodos de vibración que contempla un aumento de pseudoaceleración al pasar de una base fija a una deformable ( $[S_{a_{flex}}/S_{a_{fija}}] > 1$ ), como también el aumento de  $S_a$ , se incrementan conforme el suelo tiene  $V_s$  menor y de esta manera sería el suelo tipo E el cual afectaría una mayor gamma de edificaciones presentando a su vez, significativos aumentos de pseudoaceleración.



**Figura n°8 - Variación pseudoaceleración promedio**

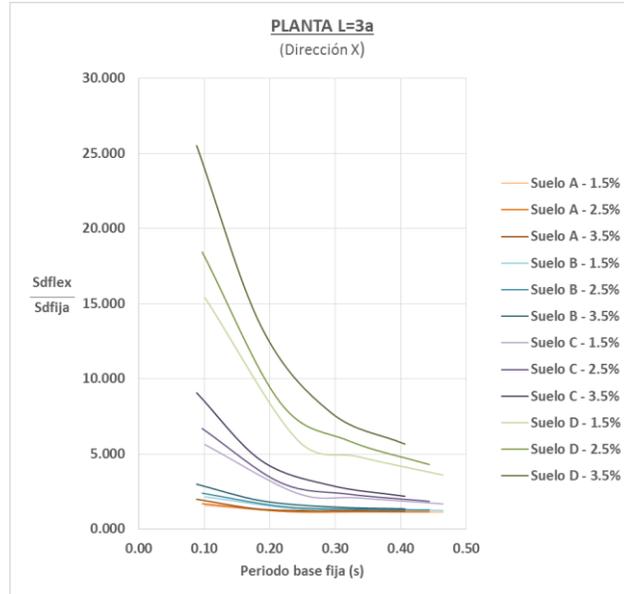
**(a) Para suelo tipo A - (b) Para suelo tipo E**

**4.2.2. Variación coordenadas espectro desplazamiento**

En la figura n°9 se denota el aumento de desplazamiento para estructuras cuya planta presenta relación  $L/a=3$ , calculado para los periodos de mayor masa participante, esto ya que el comportamiento para las demás relaciones de  $L/a$  es similar y además el caso expuesto es el que experimenta mayores aumentos en cuanto a desplazamientos.

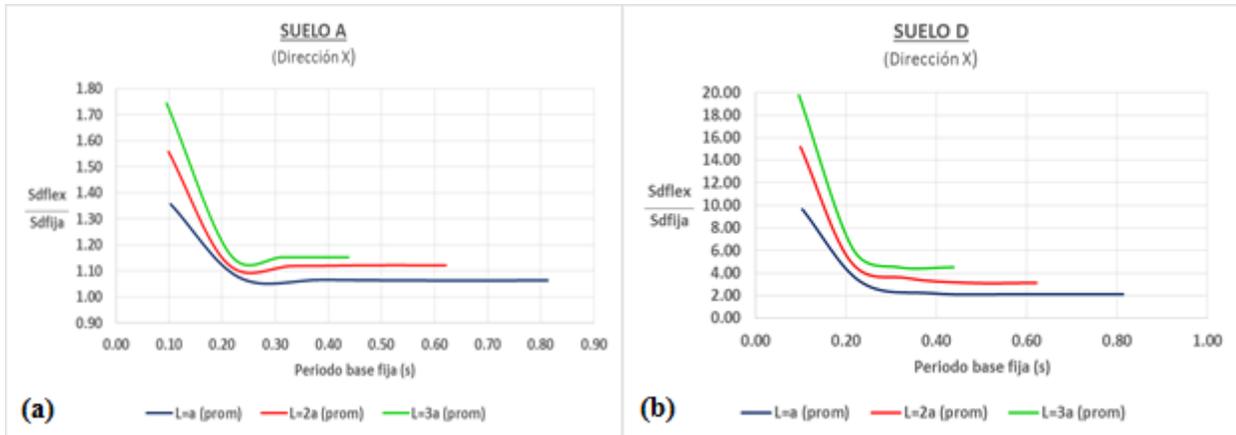
Al observar la figura presentada es posible notar que la variación del desplazamiento es para todos los casos igual o superior a la unidad, esto debido a la forma que describe el espectro. Por otro lado se ve como este incremento de  $S_a$  se ve impulsado con el aumento de la densidad de

muros y de la relación  $L/a$ , y como a su vez lo hace con la reducción de la calidad del suelo; teniéndose en suelos C y D extremos aumentos de desplazamiento en estructuras de comportamiento bastante rígido.



**Figura n°9 - Variación desplazamiento espectral norma chilena ( $L/a=3$ )**

Ahora bien, dado el similar comportamiento que presentan las estructuras se pudo utilizar analogamente la metodología usada para el caso de pseudoaceleración, permitiendo de este modo visualizar el comportamiento que describe la variación del desplazamiento para cada tipo de suelo cada tipo de estructura. Las figuras n°10 (a) y (b) exhiben las gráficas resultantes de los tres tipos de planta, para los suelos tipo A y D respectivamente. Al comparar ambas imágenes es posible apreciar el notable incremento del desplazamiento que se genera en los modelos si estos fueran concebidos en suelo tipo E y de especial manera si su planta es de grandes dimensiones, demostrando que todas las estructuras estarían afectas al fenómeno en estudio y de especial manera las más robustas.



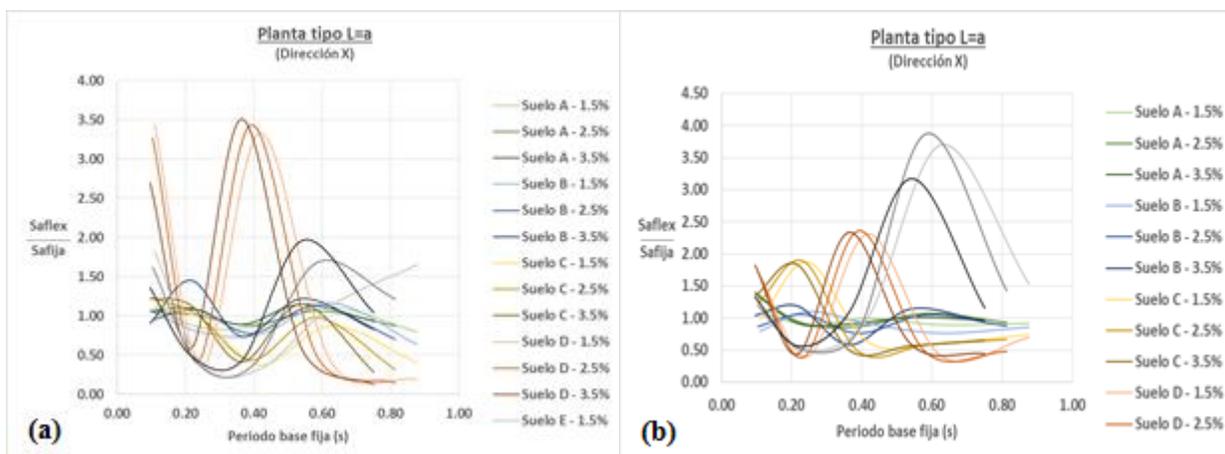
**Figura n°10 - Variación desplazamiento promedio espectro norma chilena**

**(a) Para suelo tipo A - (b) Para suelo tipo D**

### 4.3. Variación coordenadas espectrales registro 27/F

La figura n°11 demuestra los casos más extremos del comportamiento que tiene la variación de pseudoaceleraciones para el registro longitudinal y transversal del sismo ocurrido en nuestro país el 27 de febrero del 2010, esto es para las edificaciones cuya planta presenta  $L/a=1$  en la dirección de análisis X.

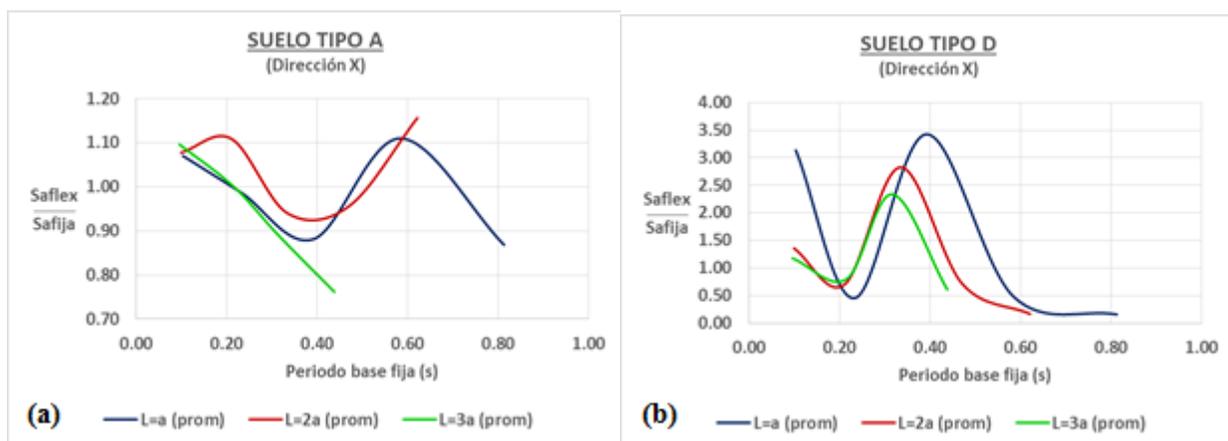
A simple vista se puede percibir que para ambos escenarios la variación de  $S_a$  que describe cada una de las gráficas posee un comportamiento similar al comparar entre densidades de muros dentro de una misma categoría de suelo, pero muy distinta si el contraste fuera entre tipologías de suelo para un mismo tipo de modelo, manifestándose claramente en la figura n°11(a) que las estructuras que fuertemente se verían afectas a este aumento de demanda serían aquellas cuyo terreno de fundación califique como suelo tipo D, alcanzando así un amplio rango de periodos, mientras que para el registro transversal serían aquellas fundadas en suelo tipo E, sometiendo a las estructuras a pseudoaceleraciones aún mayores que las presentadas en el anterior registro.



**Figura n°11 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F para L/a=1**  
**(a) Registro longitudinal (L/a=1) – (b) Registro transversal**

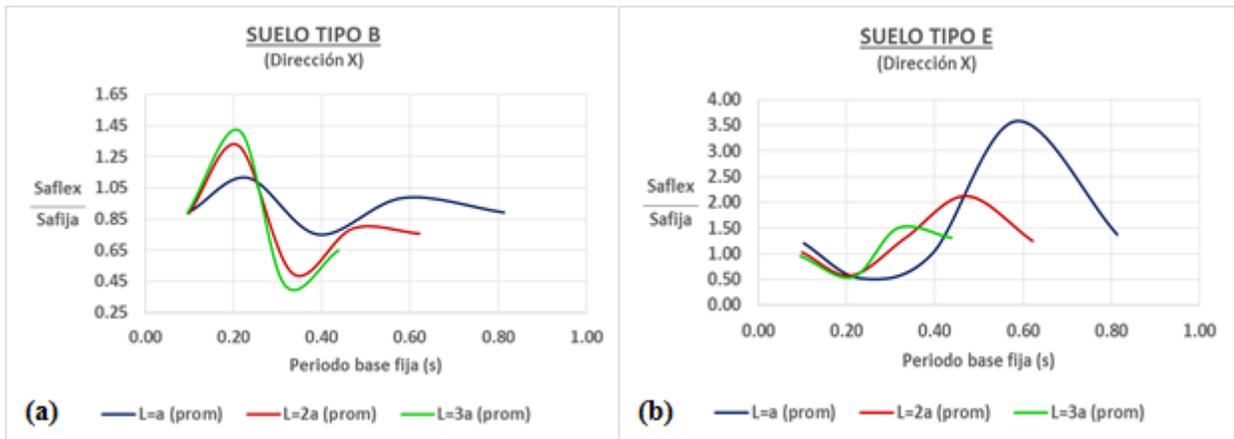
Si ahora el enfoque es para cada caso de forma independiente, al analizar el promedio de las  $S_a$  como anteriormente ya se hizo resultan las figuras n°12 y 13 que describen la variación de pseudoaceleración para los casos extremos en el registro longitudinal y transversal del sismo 27/F respectivamente.

En el caso de la figura n°12 es posible notar que el caso más desfavorable desde el punto de vista del aumento de demanda sísmica es el del suelo tipo D, en el cual las estructuras cuya relación L/a es igual a 1 serían las más afectadas por el aumento de demanda. Mientras que en el caso de edificaciones en suelo tipo A lo serian aquellas con L/a=2.



**Figura n°12 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F**  
**Registro longitudinal (a) Para suelo tipo A - (b) Para suelo tipo D**

Mientras que en el caso del registro transversal las estructuras que serán más afectadas en suelo B serán aquellas cuya planta es más alargada para bajos periodos y para los demás lo serian aquellas con planta cuadrada. Para el caso de suelo tipo E, los modelos que se ven involucrados son principalmente aquellos cuya base presenta relación  $L/a=1$  y para un mayor universo de periodos, alcanzando estos a su vez los mayores aumentos de  $S_a$  con respecto a las demás clasificaciones de suelo para este registro. Denotando que aquellas estructuras que son más flexibles serán más susceptibles al aumento de  $S_a$  para el caso de este registro.



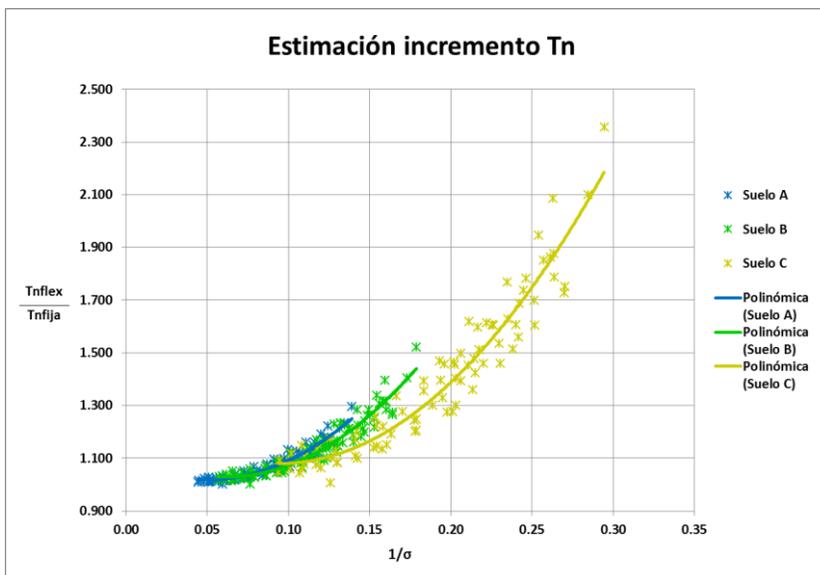
**Figura n°13 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro transversal (a) Para suelo tipo B - (b) Para suelo tipo E**

#### 4.4. Propuesta para estimar el incremento del periodo fundamental

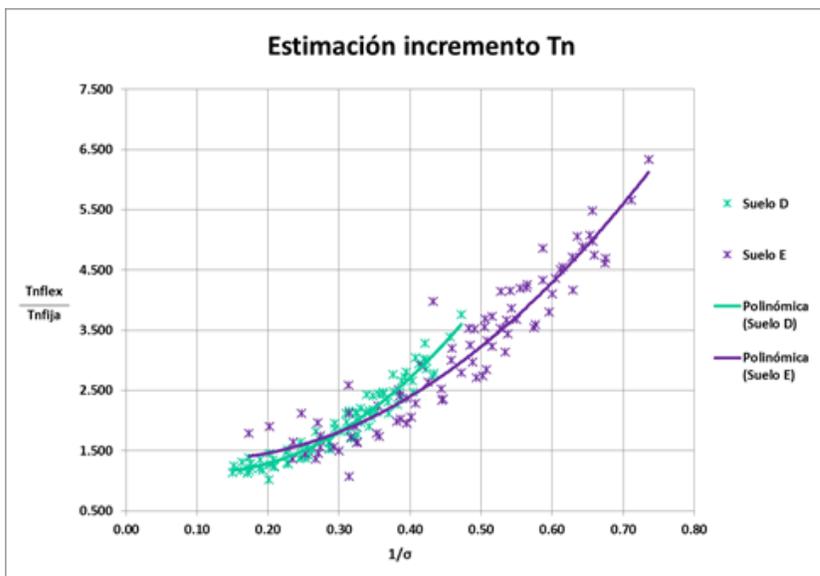
Lo descrito por las figuras n°14 y 15 es el incremento que experimenta el periodo fundamental de las estructuras analizadas al modificar su inicial condición de base fija, por una base flexible, para cada una de las categorías de suelo consideradas; permitiendo a través de un simple procedimiento, que es calcular el parámetro  $\sigma$ , conocer el incremento del periodo fundamental, evitando de esta forma el largo proceso de análisis que comúnmente es desarrollado para determinar esto.

Analizando las gráficas expuestas es posible percibir que a medida que  $V_s$  disminuye el incremento del periodo fundamental se hace cada vez más relevante alcanzando valores altísimos sobre todo para suelos calificados como tipo E. Por otro lado al considerar el valor de  $\sigma > 2$  propuesto por literatura ( $1/\sigma < 0.5$ ) se puede apreciar que los modelos edificados en suelos tipo A, B, C y D cumplen de forma satisfactoria esta condición, mientras que para el suelo E cerca de la mitad de las estructuras no cumplirían con esta condición, dado que su resistencia sería muy

superior respecto a la del suelo. Razón por la cual las estructuras que no cumplirían serian aquellas cuya relación de  $L/a$  es igual y superior a 2 para dicho tipo de suelo.



**Figura n°14 – Estimación incremento de  $T_n$  (Suelos A, B y C)**



**Figura n°15 – Estimación incremento de  $T_n$  (Suelos D y E)**

Por otro lado, la tabla n°2 contiene información relevante y concerniente a las gráficas anteriores, como lo son las expresiones para determinar de forma aproximada el incremento de  $T_n$  para cada tipo de suelo y el factor  $R^2$ , el cual indica la confiabilidad que posee cada una de las expresiones señaladas.

Línea de tendencia		
Suelo	Ecuación	R <sup>2</sup>
A	$y = 28.961(1/\sigma)^2 - 2.8602(1/\sigma) + 1.0875$	0.9111
B	$y = 29.913(1/\sigma)^2 - 3.6823(1/\sigma) + 1.1424$	0.9122
C	$y = 27.603(1/\sigma)^2 - 5.2048(1/\sigma) + 1.3249$	0.9215
D	$y = 19.024(1/\sigma)^2 - 4.3037(1/\sigma) + 1.3882$	0.9369
E	$y = 11.936(1/\sigma)^2 - 2.4642(1/\sigma) + 1.4752$	0.910

**Tabla n°2 – Información líneas de tendencia**

## 5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

Respecto a la variación de la demanda sísmica producto del efecto inercial de la interacción suelo-estructura, experimentada por los modelos estructurales analizados, se presentó mayor influencia del fenómeno en edificaciones cuyos periodos fundamentales eran bajos y en estructuras rígidas construidas sobre suelos blandos, tal como Kramer propuso en su investigación desarrollada en 1996.

A partir de los resultados obtenidos y expuestos en la presente memoria, se señala desde el punto de vista de las pseudoaceleraciones, que las estructuras edificadas sobre suelo A que se verían afectadas por el fenómeno serían aquellas con periodo fundamental en base fija inferior a 0.18(s), mientras que en suelo tipo E serían las que manifiesten  $T_n < 0.57(s)$ . Con respecto al desplazamiento, debido a la forma que describe el espectro todas las estructuras experimentaron los efectos de la ISE. Mientras que para el caso de los registros del 27/F, no hay una tendencia clara para poder definir como en los otros casos un rango de  $T_n$  donde es influyente la Interacción suelo-estructura en el comportamiento de la misma.

El aumento del periodo fundamental experimentado en cada una de las estructuras se debe a que las edificaciones con base deformable, incrementan su periodo de vibración debido a la flexibilización del sistema suelo-estructura. Siendo tal que las edificaciones fundadas sobre suelo tipo A experimentaron aumento de  $T_n$  del orden de 8% aproximadamente, representando este el menor aumento respecto los demás tipos de suelos. Para suelo tipo C, se presentó un alza de 40% y el mayor de todos fue manifiesto en suelo tipo E, donde se alcanzó el 213% de incremento en promedio.

Respecto a la demanda de aceleraciones y desplazamiento resultante de la aplicación de la metodología señalada en la norma chilena, es necesario mencionar que es imperioso que los códigos de diseño nacionales introduzcan en sus pasos de cálculo la importante incidencia que el fenómeno Interacción suelo-estructura posee en el comportamiento dinámico de las edificaciones. Esto, dado el no despreciable aumento de pseudoaceleración y desplazamiento experimentado por las estructuras demostrado a través de los resultados expuestos con anterioridad. A través de lo cual se concluye que estructuras construidas sobre suelo tipo A experimentan una disminución de la demanda sísmica al considerar la influencia del fenómeno del orden del 1.8%, para el caso

de suelo tipo C existe un incremento promedio de pseudoaceleración de 1.9%, mientras que la mayor variación fue para el suelo E, donde el incremento fue de 29.6% en promedio. Para el caso del desplazamiento, el incremento de este se fue potenciando a medida que el suelo perdía resistencia, las estructuras analizadas experimentaron incrementos cercanos al 16% para suelo tipo A, mientras que en suelo tipo D el incremento fue de 424% en promedio.

Respecto al cálculo de  $S_a$  a partir de los registros del 27/F, es necesario señalar que dado el comportamiento irregular que describen ambos espectros, la respuesta de las estructuras frente a los distintos tipos de suelo es muy distinta entre sí, y durante todo el rango de periodos. Presentándose para el caso del registro longitudinal casi nula variación de las coordenadas espectrales para suelo A, mientras que el suelo tipo B presenta en promedio una disminución cercana al 4%, y el gran aumento de pseudoaceleración fue de 33% descrito para suelo tipo D. Del registro transversal, cabe señalar que la gran disminución de  $S_a$  fue en promedio de 6% presente para suelo tipo B, y el mayor aumento para suelo tipo E, el cual fue equivalente a un 30%, donde además el suelo C, fue quien presentó menor variación, la cual fue de 1%.

Por otro lado, la teoría propuesta por Milonakis y Gazetas (2000), de igual manera se cumplió, dado que al comparar los aumentos de pseudoaceleración en el espectro generado a partir de los códigos de diseño con los estimados a partir los registros del 27/F, estos últimos presentaron mayores incrementos de  $S_a$  respecto a las de diseño, siendo estos incrementos del orden de 15% y 27% aproximadamente para los registros longitudinal y transversal respectivamente.

Con respecto a la propuesta para la estimación del incremento de  $T_n$  a través del parámetro  $1/\sigma$ , cabe mencionar que dicha metodología fue establecida para el análisis de estructuras regulares y simétricas de mediana altura. No obstante, su efectividad fue evaluada para el caso de edificaciones reales, las cuales fueron utilizadas en la investigación desarrollada por Salas S., Yerko (2015), donde la teoría propuesta presentó una efectividad cercana al 93% al analizar las estructuras para suelo tipo E y la mayor para suelo tipo A, donde esta fue de 99% aproximadamente. Demostrando de esta forma, que la opción propuesta podría presentar resultados aproximados para este tipo de estructuras.

Finalmente, con el objetivo de formular futuras líneas de investigación, se propone el análisis de la variación de la demanda sísmica debido al alargamiento del periodo fundamental. Donde este incremento de  $T_n$  sea el resultado de la superposición de dos eventos, la interacción suelo-estructura y la degradación estructural de la edificación, producto de su incursión en el rango no lineal. Permitiendo de esta forma evaluar el comportamiento de la estructuras bajo una condición que eventualmente puede resultar más perjudicial.

## 6. REFERENCIAS

Comité ACI 318 (Estados Unidos). Requisitos de reglamento para concreto estructural. ACI 318S. Estados Unidos. 2008. 132, 268p.

Instituto Nacional de Normalización (Chile). Diseño sísmico de edificios. Nch43. Santiago, Chile. 1996. 19,28-29p.

CALDERON Corail, Javier A. Actualización de tipologías usadas en edificios de hormigón armado en Chile. Tesis (Ingeniero Civil). Santiago, Chile. Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil, 2007. 26h.

CHOPRA, Anil K. Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering. 3ª ed. University of California at Berkeley. Pearson, Prentice Hall. 2007. 517-518p.

DECRETO SUPREMO 61. CHILE. Diseño sísmico de edificios. Santiago, Chile, noviembre de 2011. 9, 13-14p.

STEWART, Jonathan P., FENVES, Gregory L., SEED, Raymond B. Seismic soil-structure interaction in buildings. Berkeley, 1999. 27-28p.

APSEL, R.J., y LUCO, J.E. Impedance functions for foundations embedded in a layered medium: An integral equations approach. California, EEUU. 15. 1987.

BALKAYA, Can, YUKSEL, Bahadır, S., DERINOZ, Okan. Soil-structure interaction effects fundamental periods of the shear-wall dominant buildings. Konya, Turkia. Universidad de Selcul. Department of Civil Engineering, Engineering and Architecture Faculty. 2010. 418h.

MYLONAKIS, George. Seismic soil-structure interaction: Beneficial or detrimental?. New York, USA. City University of New York. Department of Civil Engineering. 2000. 281p.

SALAS Salas, Yerko G. Estudio de la variación de la demanda sísmica debido a la interacción suelo-estructura en edificios de mediana altura. Tesis (Ingeniero Civil). Concepción, Chile. Universidad del Bío Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, 2015.

**ANEXOS**

## ÍNDICE GENERAL ANEXOS

Anexo A	34
Anexo B	36
Anexo C	39
Anexo D	43

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura B1 Variación pseudoaceleración espectro norma chilena, Dirección Y (a) $L/a=1$ – (b) $L/a=3$	37
Figura B2 Variación pseudoaceleración espectro norma chilena ( $L/a=2$ ) (a) Dirección X – (b) Dirección Y	37
Figura B3 Variación pseudoaceleración promedio, Dirección Y (a) Suelo A – (b) Suelo E	37
Figura B4 Variación pseudoaceleración promedio, Suelo B (a) Dirección X – (b) Dirección Y	38
Figura B5 Variación pseudoaceleración promedio, Suelo C (a) Dirección X – (b) Dirección Y	38
Figura B6 Variación pseudoaceleración promedio, suelo D (a) Dirección X – (b) Dirección Y	38
Figura C1 Variación desplazamiento espectro norma chilena, $L/a=1$ (a) Dirección X – (b) Dirección Y	40
Figura C2 Variación desplazamiento espectro norma chilena, $L/a=2$ (a) Dirección X – (b) Dirección Y	40
Figura C3 Variación desplazamiento espectro norma chilena ( $L/a=3$ )	41
Figura C4 Variación desplazamiento promedio espectro norma chilena, Suelo B (a) Dirección X – (b) Dirección Y	41
Figura C5 Variación desplazamiento promedio espectro norma chilena, Suelo C (a) Dirección X – (b) Dirección Y	41
Figura C6 Variación desplazamiento promedio espectro norma chilena, Dirección Y (a) Suelo A – (b) Suelo D	42
Figura D1 Espectros 27/F registro longitudinal	44
Figura D2 Espectros 27/F registro transversal	44
Figura D3 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro longitudinal, $L/a=1$ , Dirección Y	45
Figura D4 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro longitudinal, $L/a=2$ (a) Dirección X – (b) Dirección Y	45

Figura D5 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro longitudinal, L/a=3	
(a) Dirección X – (b) Dirección Y	46
Figura D6 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Dirección Y (a) Suelo A – (b) Suelo D	46
Figura D7 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo B (a) Dirección X – (b) Dirección Y	46
Figura D8 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo C (a) Dirección X – (b) Dirección Y	47
Figura D9 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo E (a) Dirección X – (b) Dirección Y	47
Figura D10 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro transversal, L/a=1, Dirección Y	47
Figura D11 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro transversal, L/a=2 (a) Dirección X – (b) Dirección Y	48
Figura D12 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro transversal, L/a=3 (a) Dirección X – (b) Dirección Y	48
Figura D13 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Dirección Y (a) Suelo B – (b) Suelo E	48
Figura D14 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo A (a) Dirección X – (b) Dirección Y	49
Figura D15 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo C (a) Dirección X – (b) Dirección Y	49
Figura D16 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo D (a) Dirección X – (b) Dirección Y	49

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla A-1 Periodos base fija y base flexible	35
--	----

**Anexo A**  
**Periodos de vibración base fija – base flexible**

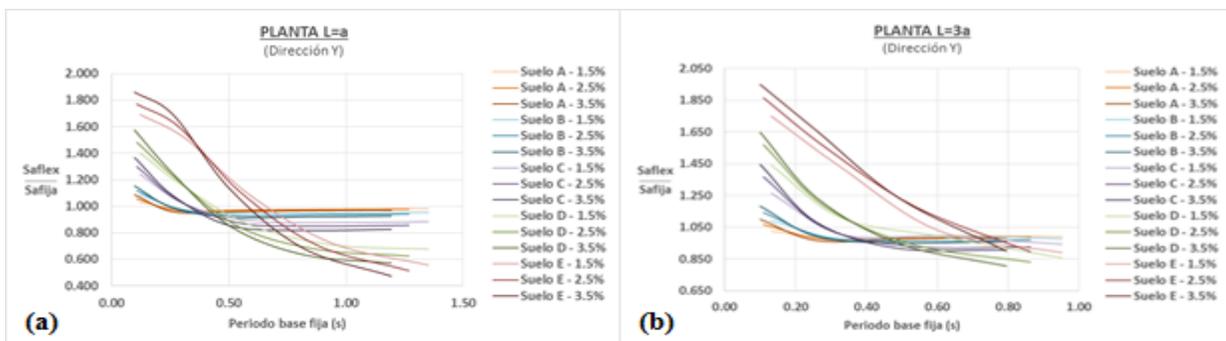
La tabla presentada a continuación contiene los periodos en base fija para cada uno de los modelos sometidos al análisis, como también los periodos de fundamentales de base flexible para cada tipo de suelo.

L = a	N° pisos	% muros	Periodo Teorico (s)	Tipos de suelo											
				Periodo base fija		Suelo A Vs=910 (m/s)		Suelo B Vs=700 (m/s)		Suelo C Vs=425 (m/s)		Suelo D Vs=265 (m/s)		Suelo E Vs=170 (m/s)	
				Tx (s)	Ty (s)	Tx (s)	Ty (s)	Tx (s)	Ty (s)	Tx (s)	Ty (s)	Tx (s)	Ty (s)	Tx (s)	Ty (s)
L = a	5	1.5	0.557	0.110	0.122	0.120	0.132	0.129	0.140	0.166	0.174	0.249	0.252	0.417	0.419
		2.5		0.104	0.108	0.116	0.120	0.126	0.130	0.166	0.169	0.256	0.256	0.431	0.431
		3.5		0.096	0.098	0.110	0.113	0.122	0.124	0.168	0.170	0.267	0.269	0.449	0.453
	10	1.5	0.937	0.248	0.317	0.262	0.328	0.273	0.337	0.322	0.377	0.439	0.479	0.705	0.724
		2.5		0.234	0.288	0.250	0.301	0.263	0.312	0.318	0.360	0.446	0.475	0.733	0.744
		3.5		0.217	0.264	0.236	0.281	0.252	0.294	0.316	0.351	0.460	0.484	0.779	0.783
	15	1.5	1.270	0.419	0.593	0.439	0.608	0.454	0.619	0.521	0.671	0.683	0.800	1.059	1.129
		2.5		0.393	0.547	0.416	0.565	0.434	0.580	0.511	0.640	0.714	0.807	1.100	1.160
		3.5		0.364	0.506	0.393	0.528	0.415	0.545	0.507	0.620	0.716	0.798	1.175	1.220
	20	1.5	1.576	0.627	0.942	0.654	0.962	0.675	0.977	0.766	1.044	0.980	1.213	1.486	1.642
		2.5		0.585	0.878	0.617	0.901	0.641	0.919	0.747	0.997	0.989	1.192	1.545	1.673
		3.5		0.541	0.818	0.580	0.846	0.610	0.867	0.734	0.961	1.011	1.187	1.628	1.731
	25	1.5	1.863	0.876	1.351	0.911	1.375	0.938	1.394	1.054	1.476	1.328	1.685	1.969	2.219
		2.5		0.813	1.269	0.855	1.298	0.886	1.320	1.022	1.419	1.334	1.663	2.044	2.271
		3.5		0.750	1.194	0.802	1.229	0.840	1.256	1.003	1.373	1.363	1.658	2.186	2.344
L = 2a	5	1.5	0.557	0.105	0.123	0.121	0.134	0.133	0.143	0.183	0.179	0.287	0.264	0.475	0.436
		2.5		0.100	0.109	0.118	0.122	0.131	0.132	0.186	0.175	0.295	0.269	0.490	0.446
		3.5		0.091	0.098	0.112	0.114	0.128	0.126	0.191	0.175	0.307	0.280	0.514	0.466
	10	1.5	0.937	0.223	0.317	0.243	0.325	0.259	0.332	0.326	0.365	0.478	0.447	0.823	0.652
		2.5		0.213	0.286	0.236	0.297	0.253	0.305	0.328	0.344	0.492	0.438	0.755	0.670
		3.5		0.195	0.260	0.222	0.273	0.244	0.283	0.331	0.331	0.518	0.442	0.919	0.704
	15	1.5	1.270	0.356	0.595	0.383	0.604	0.405	0.611	0.499	0.645	0.710	0.733	1.182	0.973
		2.5		0.339	0.545	0.370	0.556	0.395	0.565	0.501	0.604	0.733	0.708	1.241	0.978
		3.5		0.310	0.497	0.350	0.511	0.380	0.522	0.505	0.570	0.770	0.695	1.342	1.007
	20	1.5	1.576	0.501	0.949	0.540	0.959	0.571	0.968	0.699	1.005	0.988	1.104	1.628	1.379
		2.5		0.476	0.879	0.520	0.891	0.555	0.901	0.697	0.945	1.010	1.060	1.691	1.375
		3.5		0.436	0.807	0.492	0.822	0.534	0.834	0.704	0.888	1.064	1.027	1.828	1.394
	25	1.5	1.863	0.663	1.368	0.715	1.379	0.756	1.389	0.924	1.432	1.298	1.545	2.118	1.863
		2.5		0.627	1.277	0.687	1.291	0.733	1.302	0.922	1.353	1.331	1.486	2.211	1.851
		3.5		0.574	1.179	0.650	1.197	0.706	1.211	0.930	1.272	1.399	1.430	2.378	1.841
L = 3a	5	1.5	0.557	0.101	0.131	0.120	0.143	0.135	0.151	0.197	0.191	0.308	0.283	0.511	0.462
		2.5		0.097	0.109	0.118	0.124	0.135	0.135	0.202	0.184	0.317	0.290	0.530	0.475
		3.5		0.088	0.100	0.114	0.118	0.134	0.131	0.208	0.187	0.332	0.299	0.558	0.497
	10	1.5	0.937	0.241	0.329	0.262	0.337	0.279	0.344	0.351	0.375	0.516	0.450	0.889	0.654
		2.5		0.216	0.286	0.241	0.296	0.262	0.305	0.347	0.345	0.534	0.439	0.908	0.673
		3.5		0.187	0.260	0.220	0.273	0.246	0.284	0.348	0.332	0.565	0.445	0.949	0.713
	15	1.5	1.270	0.335	0.605	0.368	0.606	0.413	0.606	0.506	0.609	0.729	0.618	1.293	0.646
		2.5		0.320	0.539	0.359	0.549	0.389	0.557	0.514	0.592	0.782	0.688	1.365	0.935
		3.5		0.293	0.493	0.340	0.505	0.377	0.515	0.522	0.560	0.824	0.676	1.335	0.963
	20	1.5	1.576	0.464	0.952	0.510	0.960	0.545	0.967	0.695	0.996	1.021	1.074	1.730	1.300
		2.5		0.443	0.864	0.497	0.874	0.538	0.882	0.708	0.918	1.069	1.016	1.842	1.289
		3.5		0.406	0.795	0.472	0.808	0.521	0.818	0.718	0.863	1.122	0.982	1.976	1.304

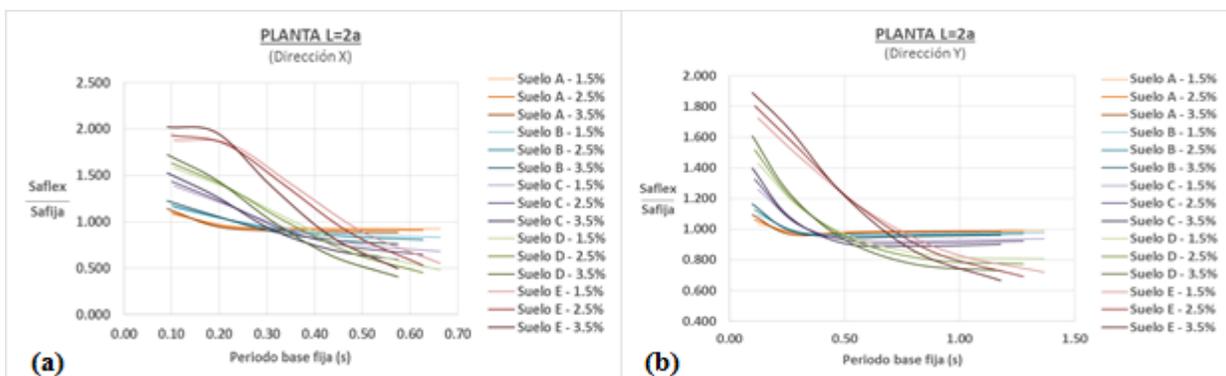
Tabla A1 – Periodos base fija y base flexible

**Anexo B**  
**Pseudoaceleración de calculada por norma**

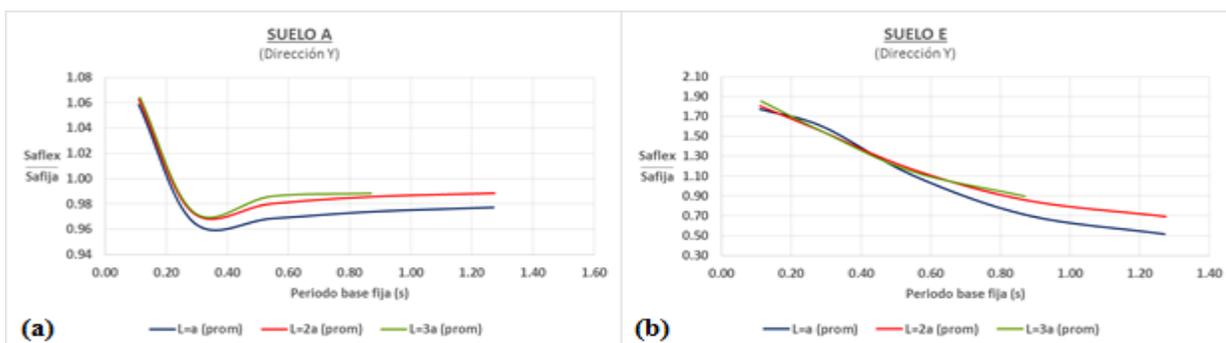
Las gráficas que a continuación son señaladas corresponden a la variación de pseudoaceleración determinada a través de los procedimientos establecidos en la normativa chilena y son los casos no expuestos con anterioridad en el cuerpo de la memoria.



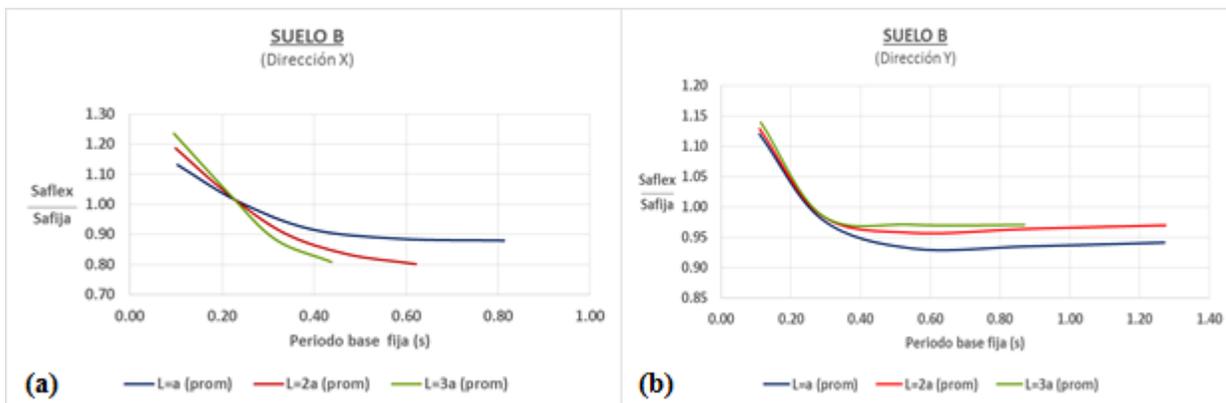
**Figura B1 – Variación pseudoaceleración espectro norma chilena (Dirección Y)**  
 (a)  $L/a=1$  – (b)  $L/a=3$



**Figura B2 – Variación pseudoaceleración espectro norma chilena ( $L/a=2$ )**  
 (a) Dirección X – (b) Dirección Y

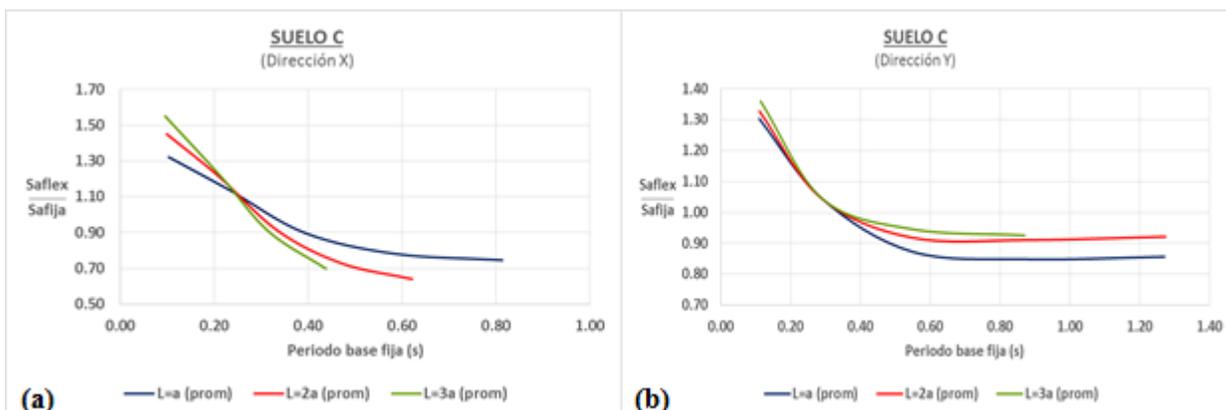


**Figura B3 - Variación pseudoaceleración promedio (Dirección Y)**  
 (a) Suelo A – (b) Suelo E



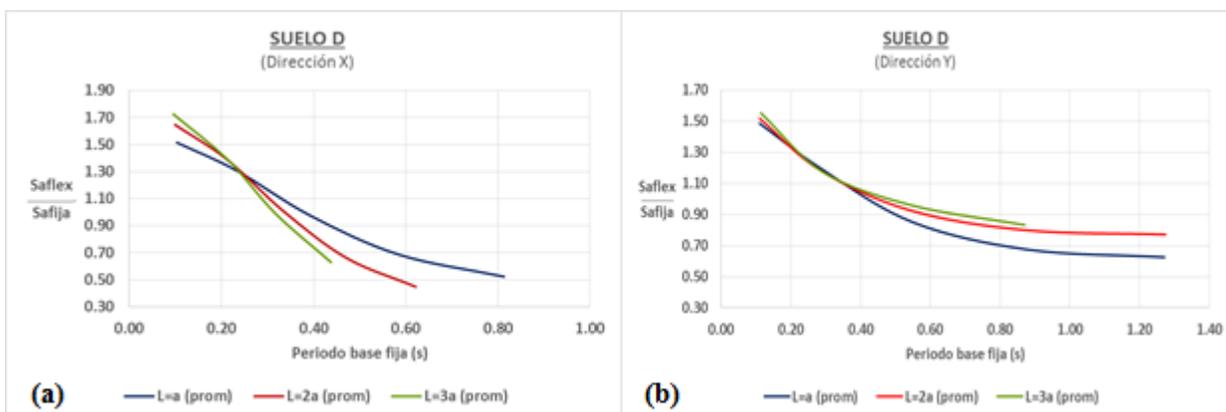
**Figura B4 - Variación pseudoaceleración promedio (Suelo B)**

(a) Dirección X – (b) Dirección Y



**Figura B5 - Variación pseudoaceleración promedio (suelo C)**

(a) Dirección X – (b) Dirección Y

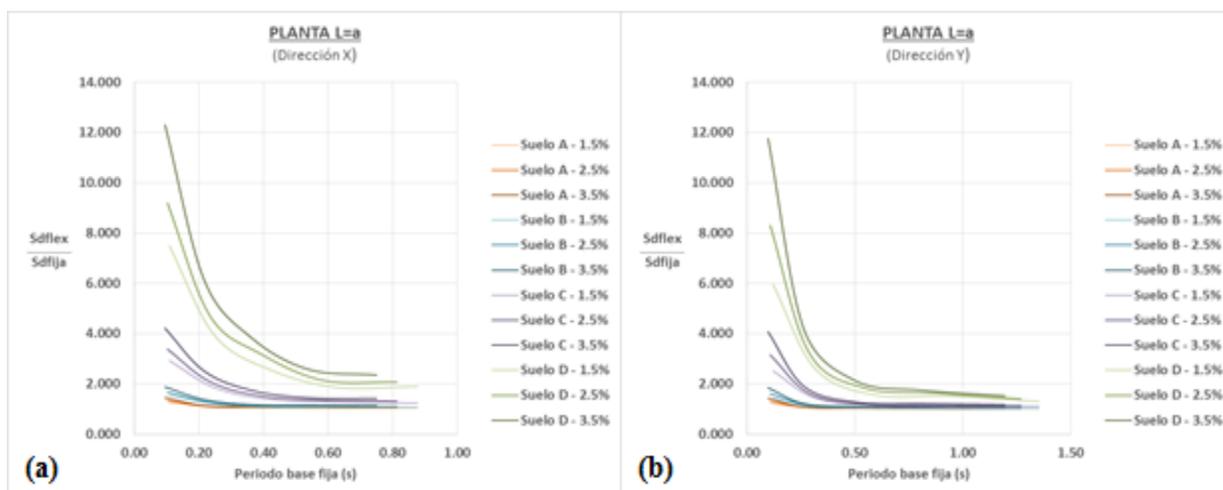


**Figura B6 - Variación pseudoaceleración promedio (suelo D)**

(a) Dirección X – (b) Dirección Y

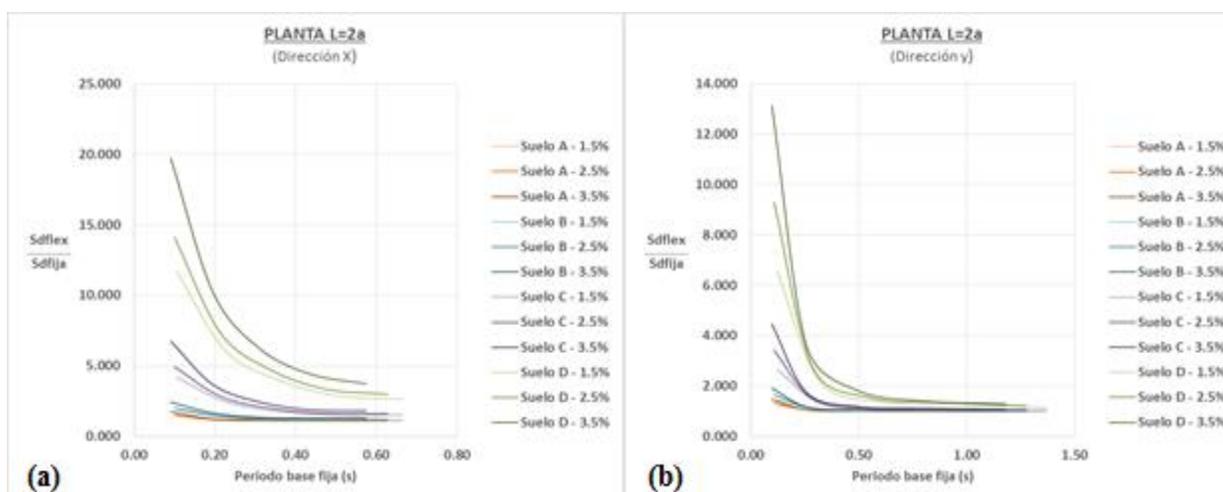
**Anexo C**  
**Pseudoaceleración de calculada por norma**

Las gráficas siguientes corresponden a la variación del desplazamiento estimado mediante los procedimientos establecidos en la normativa chilena y son los casos no expuestos con anterioridad en el cuerpo de la memoria.



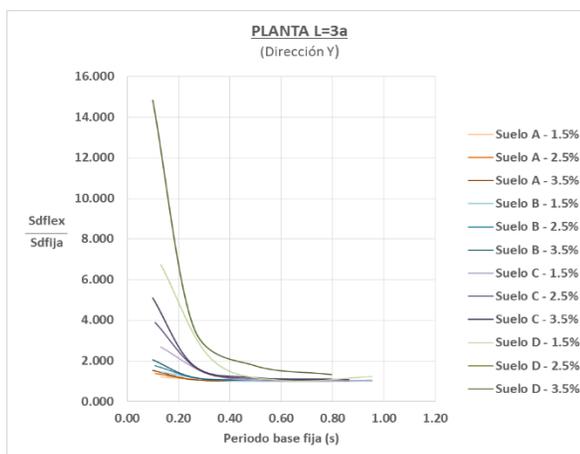
**Figura C1 - Variación desplazamiento espectro norma chilena,  $L/a=1$**

**(a) Dirección X – (b) Dirección Y**

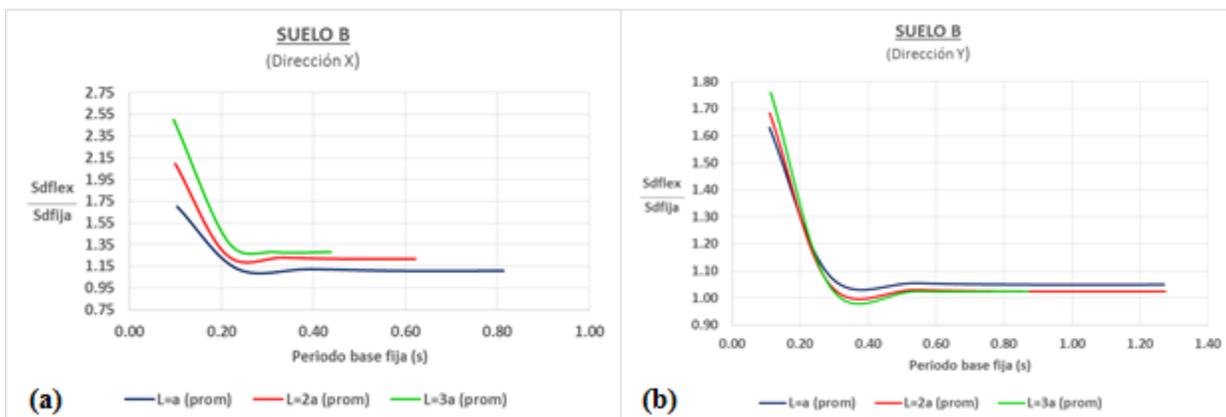


**Figura C2 - Variación desplazamiento espectro norma chilena,  $L/a=2$**

**(a) Dirección X – (b) Dirección Y**

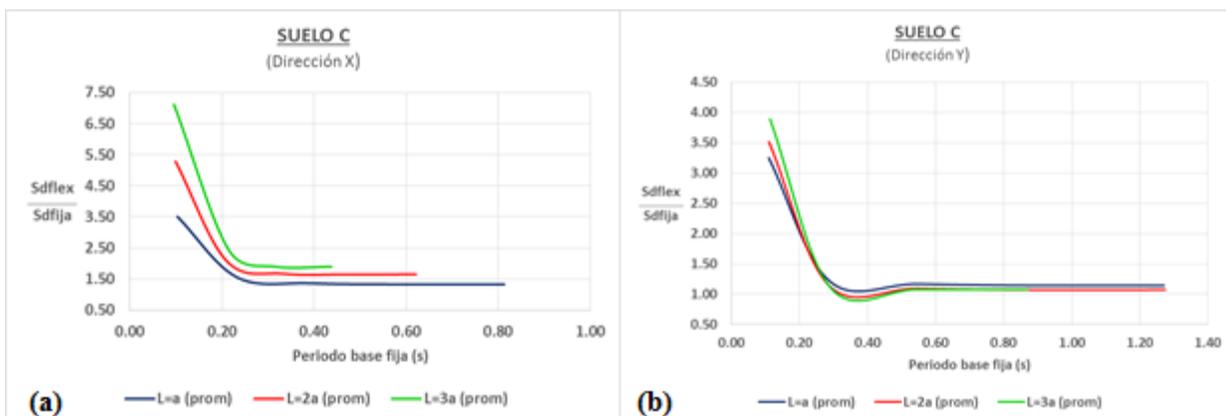


**Figura C3 - Variación desplazamiento espectro norma chilena ( $L/a=3$ )**



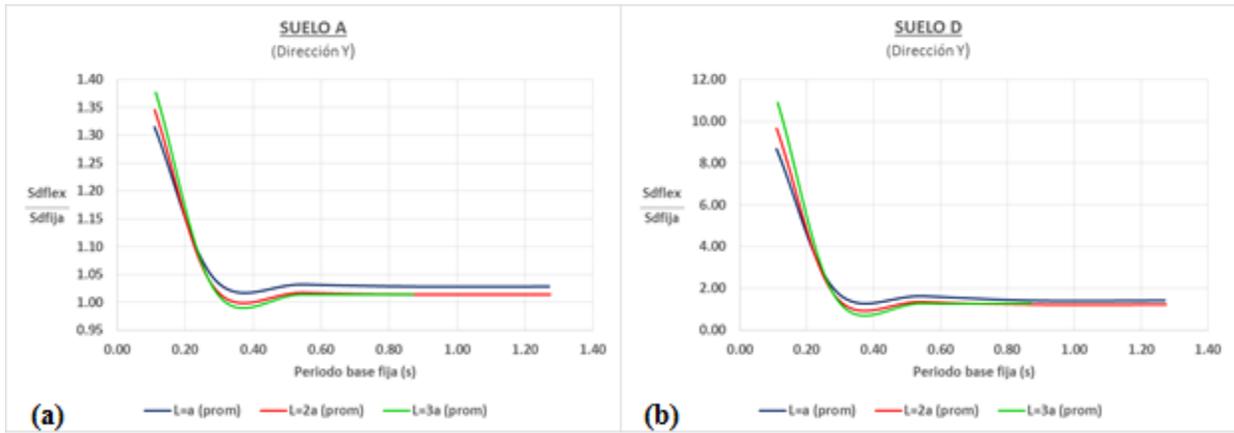
**Figura C4 - Variación desplazamiento promedio espectro norma chilena, Suelo B**

(a) Dirección X – (b) Dirección Y



**Figura C5 - Variación desplazamiento promedio espectro norma chilena, Suelo C**

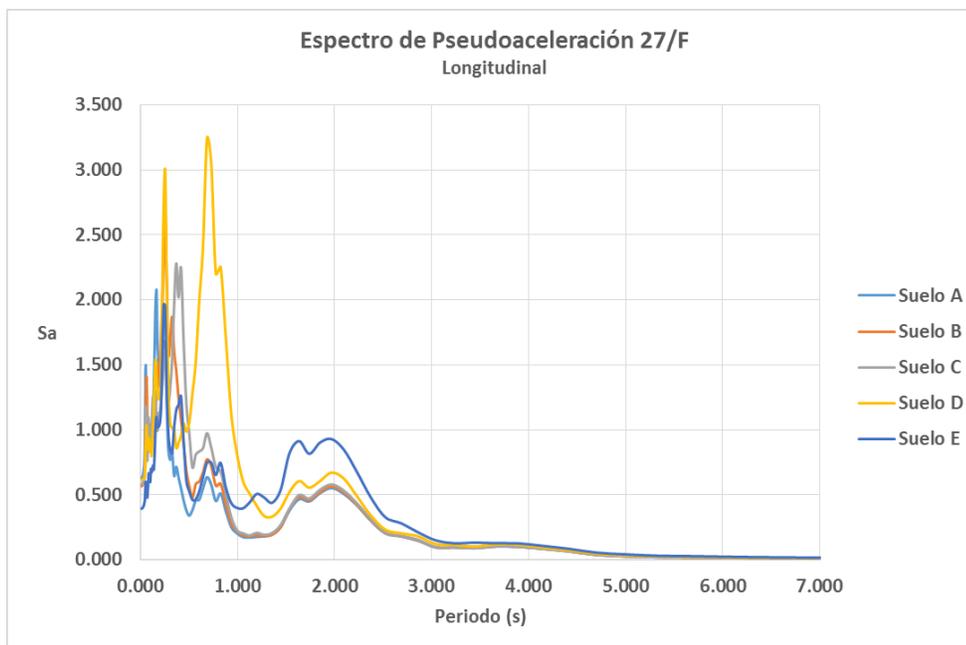
(a) Dirección X – (b) Dirección Y



**Figura C6 - Variación desplazamiento promedio espectro norma chilena, Dirección Y**  
**(a) Suelo A – (b) Suelo D**

**Anexo D**  
**Pseudoaceleración generada por registros del 27/F**

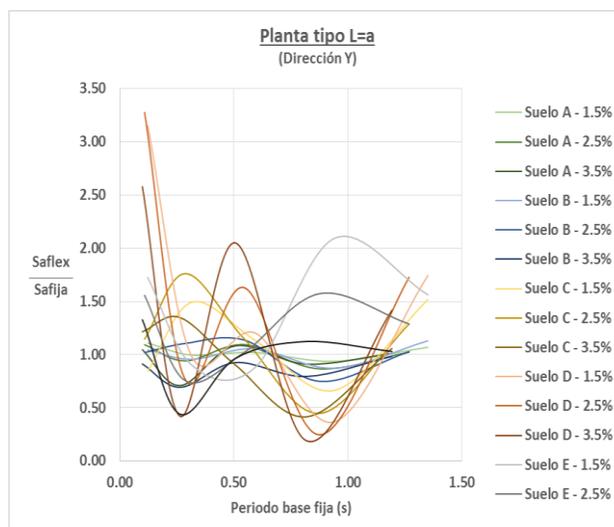
Las gráficas presentadas a continuación dan conocer los espectros y la variación de Sa estimados a partir de los registros longitudinal y transversal del 27, además son los casos no expuestos con anterioridad en el cuerpo de la memoria.



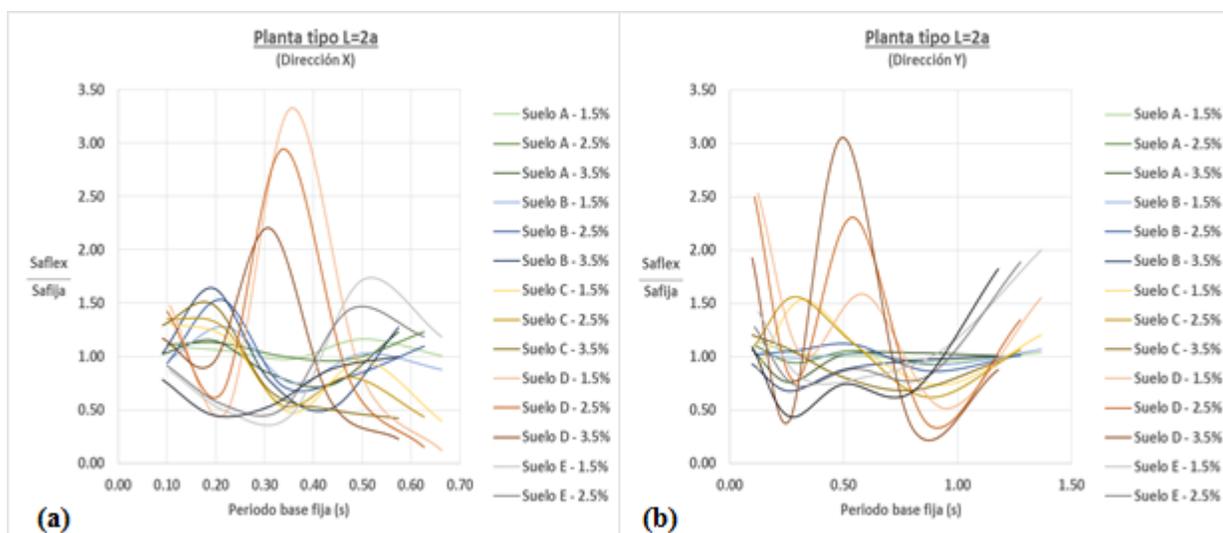
**Figura D1 – Espectros 27/F registro longitudinal**



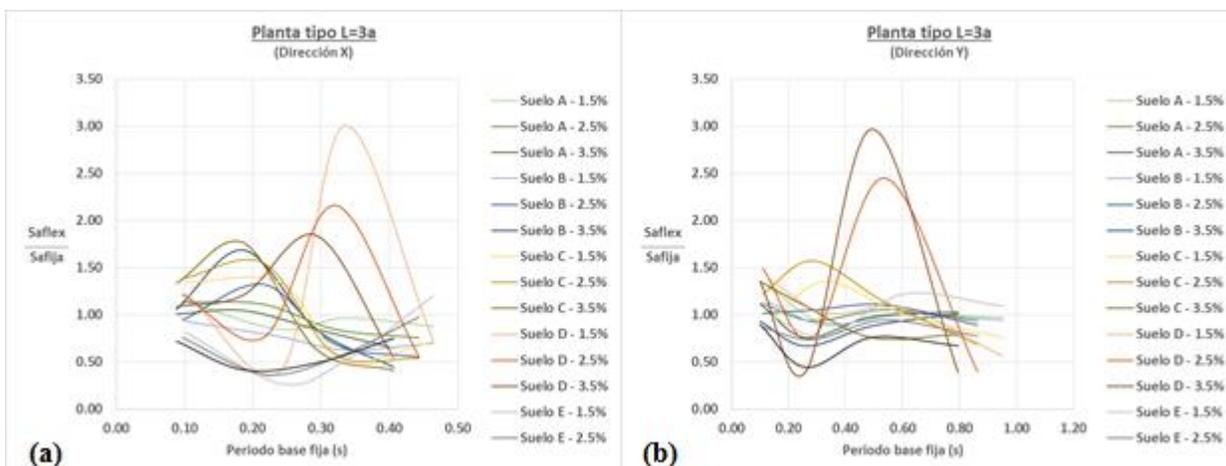
**Figura D2– Espectros 27/F registro transversal**



**Figura D3 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro longitudinal,  $L/a=1$ , Dirección Y**

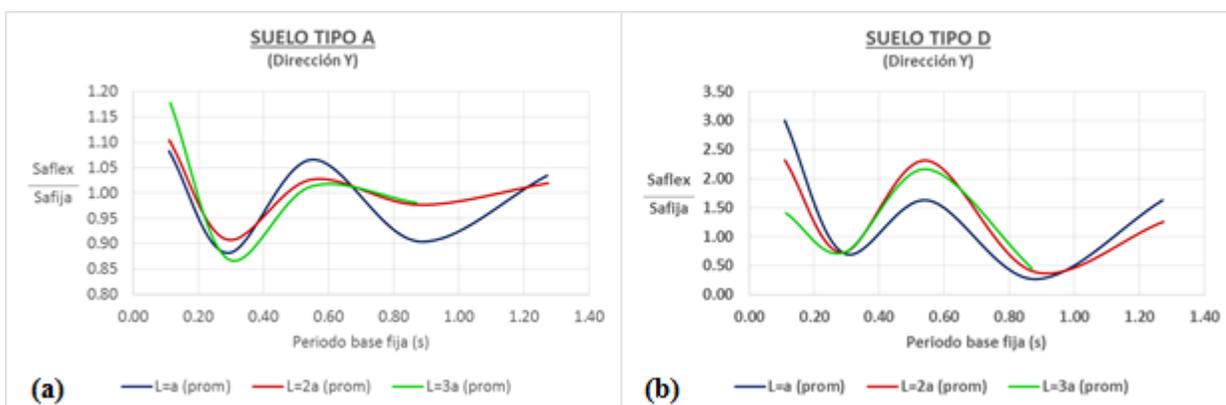


**Figura D4 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro longitudinal,  $L/a=2$   
(a) Dirección X – (b) Dirección Y**

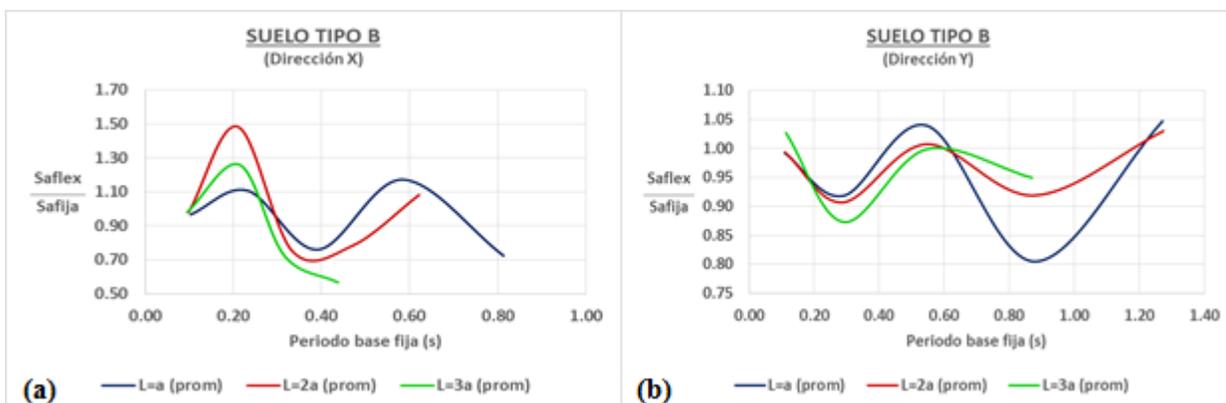


**Figura D5 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro longitudinal, L/a=3**

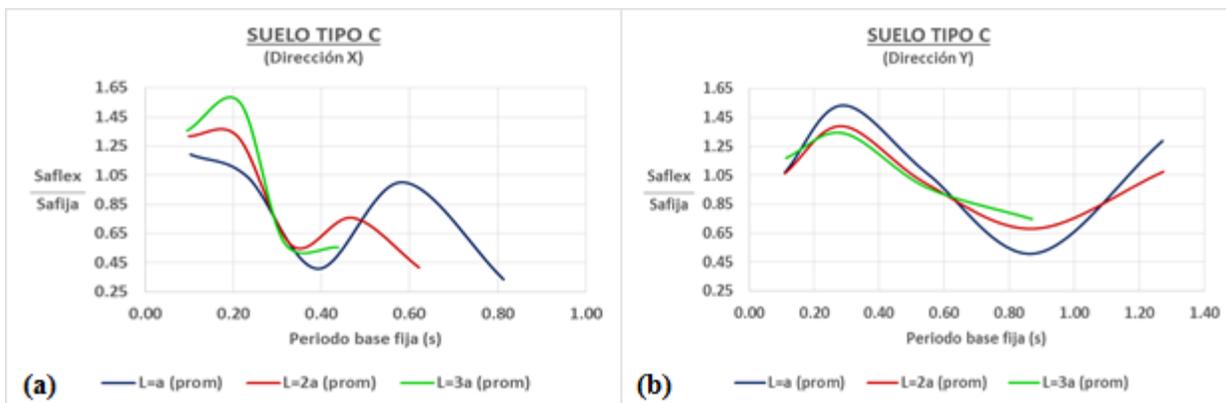
**(a) Dirección X – (b) Dirección Y**



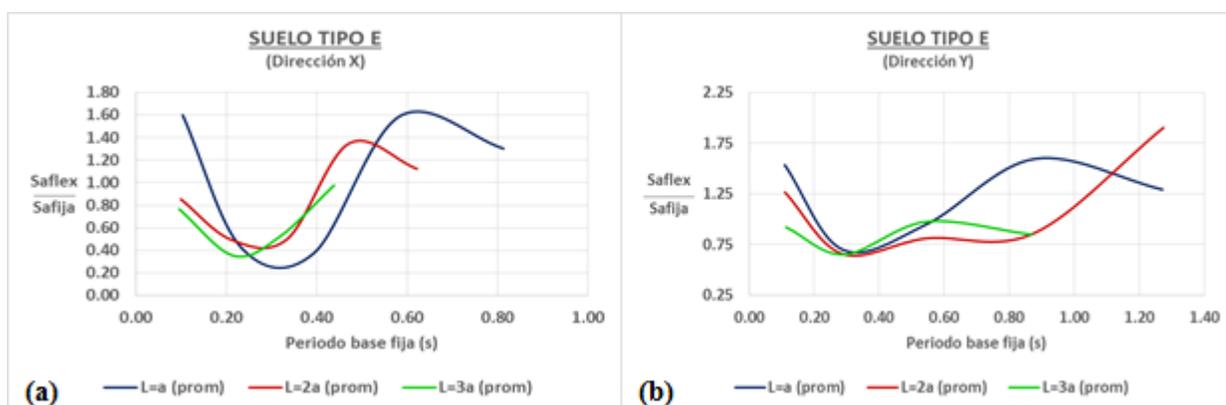
**Figura D6 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Dirección Y (a) Suelo A – (b) Suelo D**



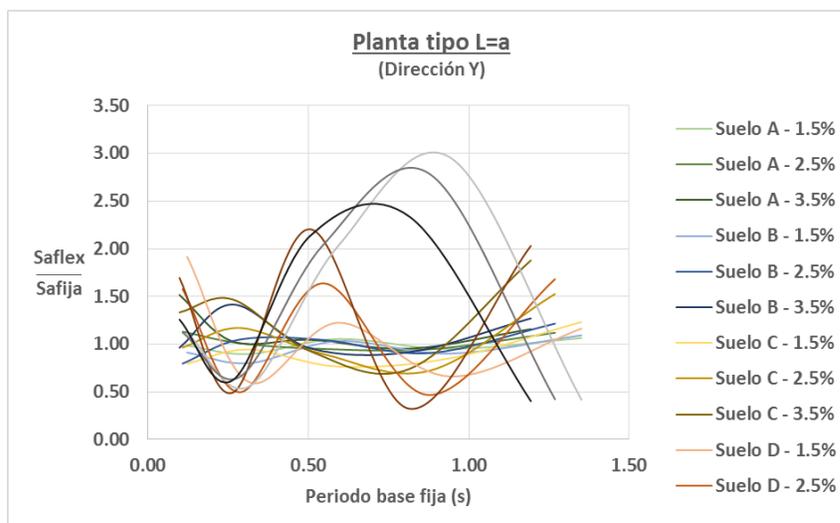
**Figura D7 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo B (a) Dirección X – (b) Dirección Y**



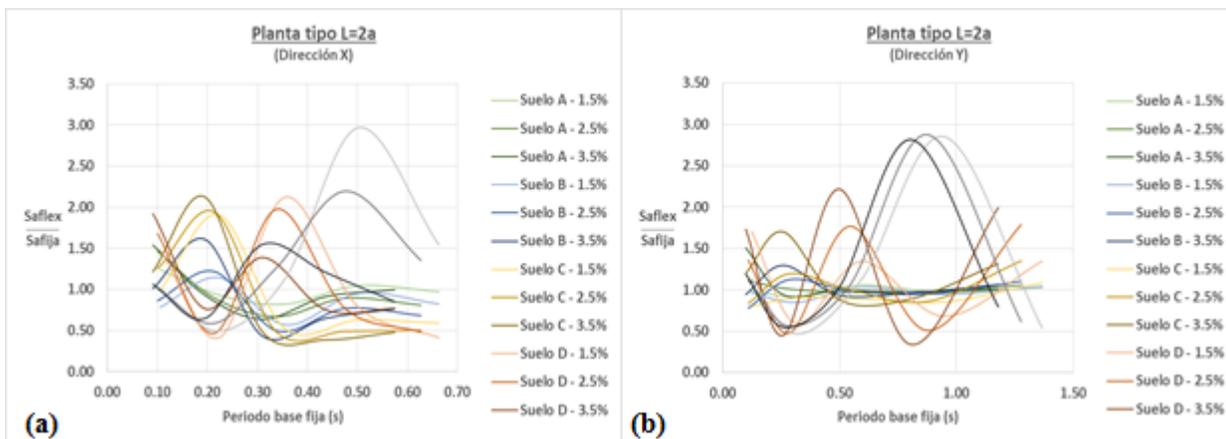
**Figura D8 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo C (a) Dirección X – (b) Dirección Y**



**Figura D9 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo E (a) Dirección X – (b) Dirección Y**

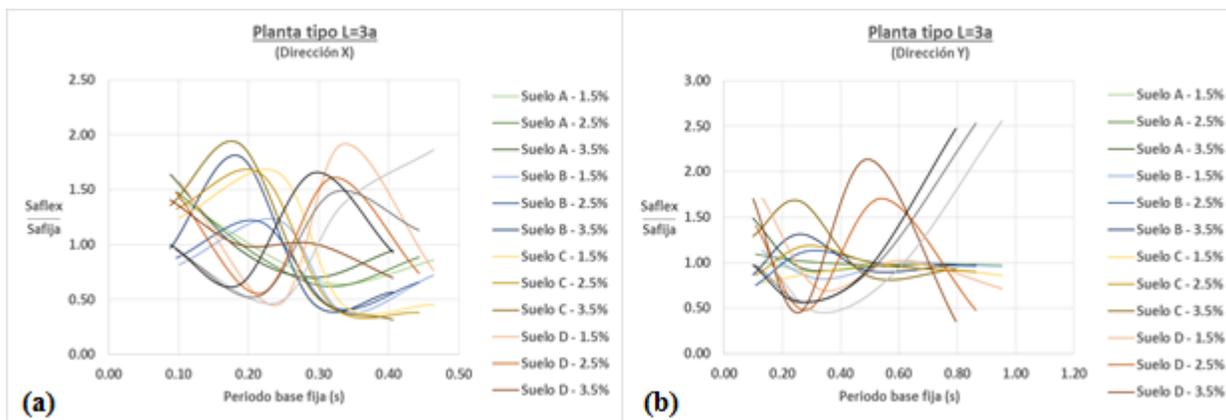


**Figura D10 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro transversal, L/a=1, Dirección Y**



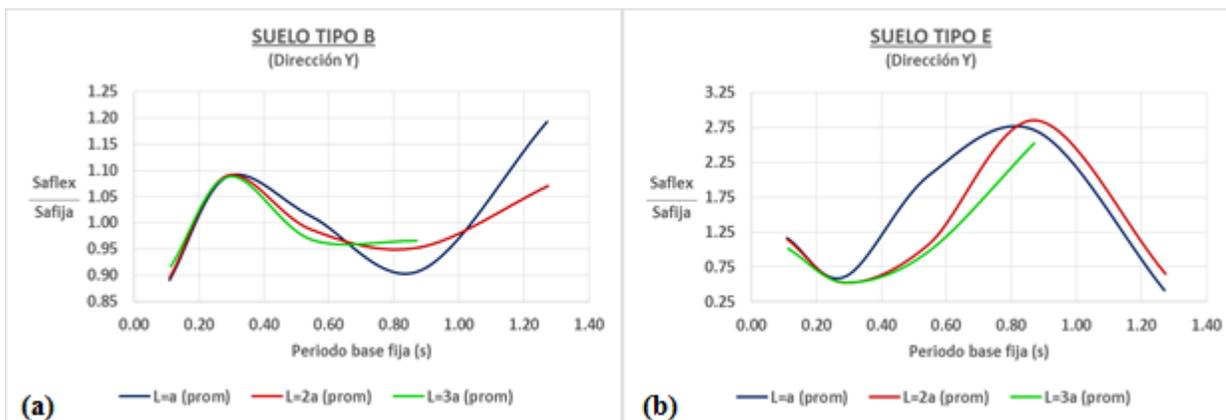
**Figura D11 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro transversal, L/a=2**

(a) Dirección X – (b) Dirección Y



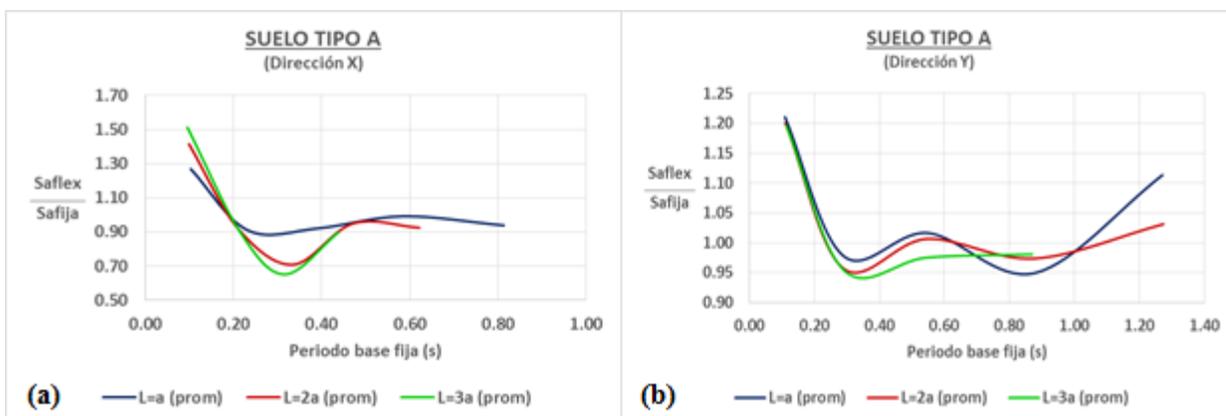
**Figura D12 - Variación pseudoaceleración sismo 27/F registro transversal, L/a=3**

(a) Dirección X – (b) Dirección Y

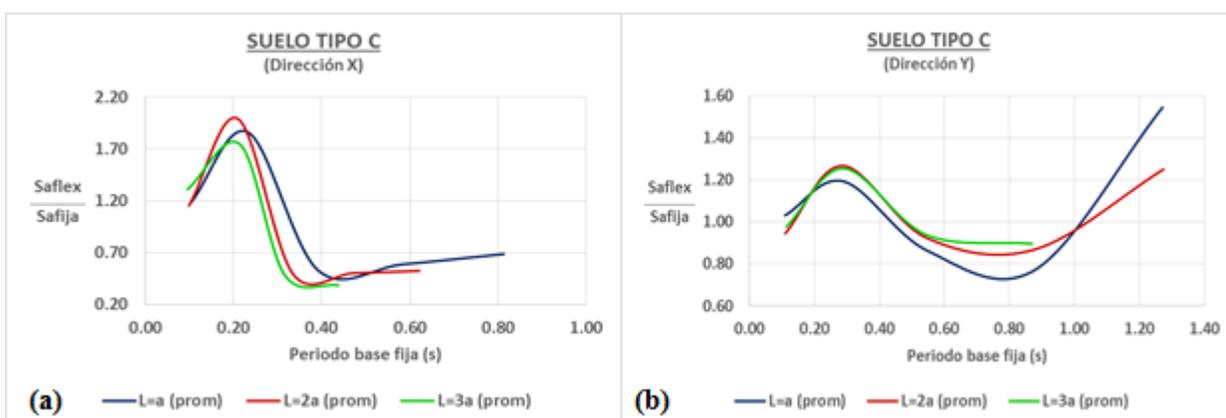


**Figura D13 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal,**

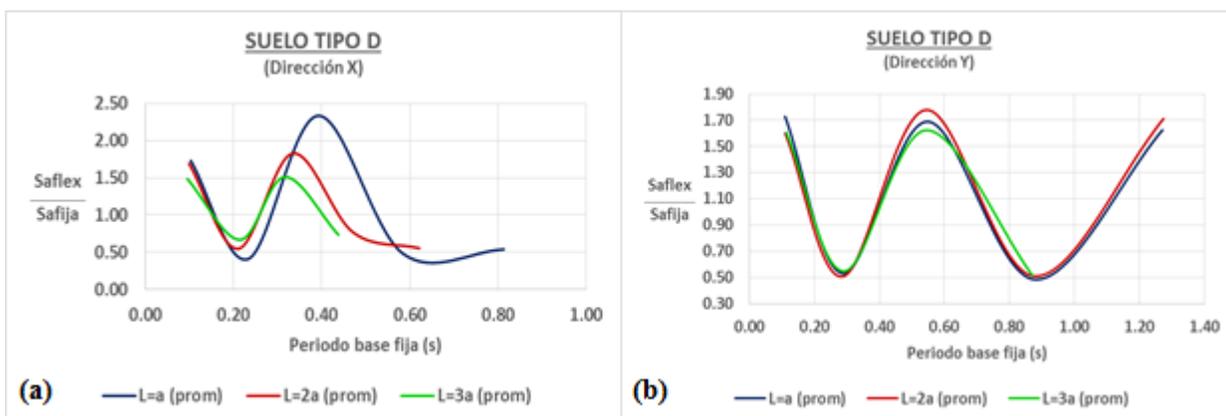
**Dirección Y (a) Suelo B – (b) Suelo E**



**Figura D14 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo A (a) Dirección X – (b) Dirección Y**



**Figura D15 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo C (a) Dirección X – (b) Dirección Y**



**Figura D16 - Variación pseudoaceleración promedio sismo 27/F Registro longitudinal, Suelo D (a) Dirección X – (b) Dirección Y**