

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE Escuela de Ingeniería

# EFECTOS DE LA INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA EN LA RESPUESTA SÍSMICA DE UN EDIFICIO DE MARCOS DE DOS PISOS

# JEAN MITCHELL HUACRE VILA

Informe de Actividad de Graduación para optar al Grado de Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica

Profesor Supervisor:

CHRISTIAN ALFONSO LEDEZMA ARAYA

Santiago de Chile, octubre, 2016.

A mi familia, por su amor y apoyo incondicional.

# AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor guía Christian Alfonso Ledezma Araya, por su tiempo y apoyo en la realización de este trabajo.

Al Programa Nacional de Becas PRONABEC del Estado peruano, por brindarme la oportunidad de realizar este magíster.

A la Coordinación del Programa del Magíster en Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Chile, por su constante apoyo.

A mi novia Lizbeth, por su amor, apoyo y motivación.

# **INDICE GENERAL**

	Pa	ág.
DED	DICATORIA ii	i
AGF	RADECIMIENTOS iii	ĺ
IND	VICE DE TABLAS vii	i
IND	ICE DE FIGURAS ix	-
RES	SUMEN xi	i
ABS	STRACT xii	i
I.	INTRODUCCIÓN1	
II.	CARACTERISTICAS DEL EDIFICIO4	ł
	II.1 Descripción del Edificio4	F
	II.2 Características del Suelo de Fundación	j
	II.2.1 Perfil de Suelo S1: Suelos Rígidos7	,
	II.2.2 Perfil de Suelo S2: Suelos Intermedios7	,
	II.2.3 Perfil de Suelo S3: Suelos Blandos8	,
	II.3 Características de la Cimentación Superficial9	)
III.	SOLICITACIONES SÍSMICAS14	F
	III.1 Espectro de Diseño14	Ļ
	III.2 Registros Sísmicos	)
	III.2.1 Espectro de Respuesta23	,
	III.2.2Espectro de Potencia de Fourier25	, )
IV.	MODELO ESTRUCTURAL DE BASE FIJA	r
	IV.1 Aspectos de la Modelación Estructural27	1
	IV.1.1Modelo Tridimensional en el Programa ETABS27	1
	IV.1.2Masa Sísmica30	)
	IV.1.3Periodos y Modos de Vibrar	

	IV.2 Análisis Modal Espectral	32
	IV.3 Respuesta sísmica para el modelo de base fija	33
	IV.3.1Respuesta sísmica conforme a la Norma E030	34
	IV.3.2Respuesta de la estructura ante un sismo moderado	36
V.	INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA SEGÚN FEMA 440	39
	V.1 Parámetros de Rigidez Equivalente Según FEMA 356	39
	V.1.1 Parámetros de rigidez para el perfil de suelo S1	42
	V.1.2 Parámetros de rigidez para el perfil de suelo S2	43
	V.1.3 Parámetros de rigidez para el perfil de suelo S3	44
	V.2 Periodo y Modo de Vibrar con Base Flexible	45
	V.3 Metodología FEMA 440	47
	V.3.1 Procedimientos para incluir los efectos cinemáticos	48
	V.3.2 Amortiguamiento adicional de la fundación	50
	V.3.3 Espectro de Diseño Corregido de acuerdo a FEMA 440	53
	V.4 Respuesta Sísmica para el Modelo de Base Flexible	56
	V.4.1 Respuesta sísmica conforme a la Norma E030	56
	V.4.2 Respuesta de la estructura ante un sismo moderado	58
VI.	MODELO BIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS FINITOS	60
	VI.1 Introducción al programa PLAXIS 2D	60
	VI.2 Discretización de Elementos finitos	62
	VI.3 Módulo Dinámico del Programa PLAXIS 2D	63
	VI.4 Condiciones de Borde	64
	VI.5 Definición de la carga sísmica	65
	VI.5.1Solicitación Sísmica de acuerdo a la Norma E030	66
	VI.5.2Solicitación sísmica para representar un sismo moderado	68
	VI.6 Amortiguamiento de Rayleigh	70
	VI.7 Modelo Constitutivo de los Materiales	72
	VI.7.1 Modelo Elástico Lineal	72
	VI.7.2El Modelo de Suelo con Endurecimiento (Hardening Soil mode	el)73
	VI.7.3Hardening Soil Model With Small-Strain Stiffness (HS small).	76
	VI.8 Características y Parámetros geotécnicos de los suelos considerados	77
	VI.8.1Perfil de Suelo S1: Suelo Rígido	78
	VI.8.2Perfil de Suelo S2: Suelo Intermedio	79

VI.8.3Per	fil de suelo S3: Suelo blando	31		
VI.9 Modelo de	e la Estructura en el Programa PLAXIS 2D	32		
VI.10 Propied	ades de la interfaz Suelo - Estructura8	37		
VI.11 Resultad	los del análisis Bidimensional mediante Elementos Finitos8	37		
VI.11.1	Respuesta dinámica ante una demanda sísmica intensa8	38		
VI.11.2	Respuesta dinámica ante una demanda sísmica moderada8	39		
VII. ANÁLISIS DE	RESULTADOS	92		
VII.1 Gráficas	s comparativas para una demanda sísmica intensa	<del>)</del> 2		
VII.1.1	Perfil de suelo S1	<del>)</del> 3		
VII.1.2	Perfil de suelo Intermedio S2	<del>)</del> 7		
VII.1.3	Perfil de suelo S310	)1		
VII.2 Gráficas	s comparativas para una demanda sísmica moderada10	)6		
VII.2.1	Perfil de suelo S110	)6		
VII.2.2	Perfil de suelo Intermedio S210	)9		
VII.2.3	Perfil de suelo blando S311	13		
VIII. CONCLUSION	VES11	17		
BIBLIOGRAFIA		20		
A N E X O S		21		
Anexo A: Plano Arqu	itectónico del Edifico12	22		
Anexo B: Procedimiento FEMA 440 para una demanda sísmica moderada124				
Anexo C: Respuesta	en el tiempo del programa PLAXIS 2D para el registro Rapel1	27		

# **INDICE DE TABLAS**

H	Pág.
Tabla II-1: Parámetros de perfil de suelo S1	7
Tabla II-2: Parámetros de perfil de suelo S2	8
Tabla II-3: Parámetros de perfil de suelo S3	8
Tabla III-1: Factores de zona	. 15
Tabla III-2: Clasificación de los perfiles de suelo (RNE, 2016)	. 16
Tabla III-3: Factor de suelo S (RNE, 2016)	. 16
Tabla III-4: Tabla de periodos "TP" y "TL" (RNE, 2016)	. 16
Tabla III-5: Categoría de las edificaciones y factor "U" (RNE, 2016)	. 17
Tabla III-6: Coeficiente básico de reducción de fuerzas sísmicas	. 18
Tabla III-7: Parámetros sísmicos de la zona de proyecto	. 19
Tabla III-8: Registros sísmicos medidos en roca	. 21
Tabla III-9: Registros sísmicos seleccionados	. 22
Tabla IV-1: Propiedades del hormigón f'c=210 kgf/cm2	. 30
Tabla IV-2: Propiedades de albañilería	. 30
Tabla IV-3: Masa sísmica por piso	. 31
Tabla IV-4: Periodo de vibración asociado a cada modo	. 32
Tabla IV-5: Masa efectiva en la dirección de análisis y masa acumulada	. 32
Tabla IV-6: Desplazamiento máximo de piso u(m)	. 34
Tabla IV-7: Deriva de entrepiso	. 35
Tabla IV-8: Fuerza cortante de piso V(tonf)	. 35
Tabla IV-9: Aceleración máxima de piso a(m/s <sup>2</sup> )	. 36
Tabla IV-10: Desplazamiento máximo de piso u(m)	. 37
Tabla IV-11: Deriva de entrepiso	. 37
Tabla IV-12: Fuerza cortante de piso V(tonf)	. 37
Tabla IV-13: Aceleración máxima de piso a(m/s <sup>2</sup> )	. 38
Tabla V-1: Clasificación del perfil de suelo (FEMA 356, 2000)	. 41
Tabla V-2: Factor del módulo de corte efectivo (FEMA 356, 2000)	. 41
Tabla V-3: Constantes de rigidez equivalente para el perfil de suelo tipo S1	. 42
Tabla V-4: Constantes de rigidez equivalentes para el perfil de suelo S2	. 44
Tabla V-5: Parámetros de rigidez equivalente para el perfil de suelo S3	. 45
Tabla V-6: Periodos de vibración de la estructura con base flexible T(s)	. 46
Tabla V-7: Tamaño efectivo de la fundación	. 49
Tabla V-8: Procedimiento de cálculo del amortiguamiento adicional según FEMA 440	. 52
Tabla V-9: Desplazamiento máximo de piso u(m)	. 56
Tabla V-10: Deriva de entrepiso	. 57
Tabla V-11: Fuerza cortante de piso V(tonf)	. 57
Tabla V-12: Aceleración máxima de piso a(m/s <sup>2</sup> )	. 58
Tabla V-13: Desplazamiento máximo de piso u(m)	. 58
Tabla V-14: Deriva de entrepiso	. 59
Tabla V-15: Fuerza cortante de casa piso V(tonf)	. 59
Tabla V-16: Aceleración máxima de piso a(m/s <sup>2</sup> )	. 59
Tabla VI-1: Tamaño medio de los elementos finitos	. 63

Tabla VI-2: Valores de PGA según la Norma E030	67
Tabla VI-3: Coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh	71
Tabla VI-4: Parámetros para el perfil de suelo S1	79
Tabla VI-5: Parámetros para el perfil de suelo S2	80
Tabla VI-6: Parámetros para el perfil de suelo S3	81
Tabla VI-7: Periodos asociado a cada modo de vibración	85
Tabla VI-8: Propiedades de los elementos estructurales	85
Tabla VI-9: Desplazamiento de piso u(m)	88
Tabla VI-10: Deriva de entrepiso	89
Tabla VI-11: Fuerza cortante de piso V(tonf)	89
Tabla VI-12: Aceleración máxima a(m/s2) de piso	89
Tabla VI-13: Desplazamiento de piso u(m)	90
Tabla VI-14: Deriva de entrepiso	90
Tabla VI-15: Fuerza cortante de piso V(tonf)	90
Tabla VI-16: Aceleración máxima a(m/s <sup>2</sup> ) de piso	91
Tabla VII-1: Desplazamiento de piso u(m) en suelo rígido S1	93
Tabla VII-2: Deriva máxima de entrepiso en suelo rígido S1	93
Tabla VII-3: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo rígido S1	94
Tabla VII-4: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo rígido S1	95
Tabla VII-5: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo intermedio S2	97
Tabla VII-6: Deriva máxima de entrepiso en suelo intermedio S2	98
Tabla VII-7: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo intermedio S2	98
Tabla VII-8: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S2	99
Tabla VII-9: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo blando S3	.101
Tabla VII-10: Deriva máxima de entrepiso en suelo blando S3	.102
Tabla VII-11: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo blando S3	.103
Tabla VII-12: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo blando S3	.103
Tabla VII-13: Desplazamiento de entrepiso u(m) en suelo rígido S1	.106
Tabla VII-14: Deriva máximo de entrepiso en suelo rígido S1	.107
Tabla VII-15: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo rígido S1	.107
Tabla VII-16: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo rígido S1	.108
Tabla VII-17: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo intermedio S2	.109
Tabla VII-18: Deriva máximo de entrepiso en suelo intermedio S2	.110
Tabla VII-19: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo intermedio S2	.111
Tabla VII-20: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S2	.112
Tabla VII-21: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo blando S3	.113
Tabla VII-22: Deriva máximo de entrepiso en suelo blando S3	.114
Tabla VII-23: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo blando S3	.114
Tabla VII-24: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S3	.115

# **INDICE DE FIGURAS**

	Pág.
Figura II-1 : Edificios típicos de locales escolares en el Perú (Silva, 2012)	5
Figura II-2: Vista en planta del edificio	6
Figura II-3: Vista en elevación del edificio	6
Figura II-4: Vista en planta de la cimentación superficial - Suelo S1	9
Figura II-5: Esfuerzos generados en el suelo S1 σ(kgf/cm2)- SAFE	10
Figura II-6: Vista en planta de la cimentación superficial - Suelo S2	11
Figura II-7: Esfuerzos en el suelo S2 $\sigma(kgf/cm2)$ -SAFE	12
Figura II-8: Vista en planta de la cimentación superficial - Suelo S3	13
Figura II-9: Esfuerzos en el suelo S3 $\sigma(kgf/cm2)$ -SAFE	13
Figura III-1: Zonificación sísmica (Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, 20	16)
	15
Figura III-2: Espectro de pseudo-aceleraciones elástico - Norma E030	19
Figura III-3:Espectro de pseudo-aceleraciones elástico con PGA=0.4g	20
Figura III-4: Registros sísmicos medidos en roca	22
Figura III-5:Espectros de respuesta de pseudo-aceleración elásticos para un	
amortiguamiento de 5%	23
Figura III-6: Espectros de respuesta de desplazamiento elástico para un amortiguamien	to
de 5%	24
Figura III-7: Espectros de potencia de Fourier	26
Figura IV-1: Modelo tridimensional del edificio en el programa ETABS	29
Figura IV-2: Vista en planta del modelo estructural del edificio	29
Figura V-1: Constantes de rigidez equivalente de los resortes para fundaciones rígidas	
(FEMA 356, 2000)	40
Figura V-2: Modelo estructural con flexibilidad en la base en el programa ETABS	46
Figura V-3: Efectos de incluir la interacción suelo estructura (FEMA 440, 2005)	48
Figura V-4: Espectros de diseño de acuerdo a FEMA 440 en: (a) Suelo rígido S1, (b) S	uelo
Intermedio S2 y (c) Suelo blando S3	54
Figura V-5: Espectros de diseño de acuerdo a FEMA 440 con PGA=0.4g en: (a) Suelo	
rígido S1, (b) Suelo Intermedio S2 y (c) Suelo blando	55
Figura VI-1: Nodos y puntos de tensión, elemento triangular de 15 nodos	61
Figura VI-2: Geometría del dominio del suelo y malla de los elementos finitos	62
Figura VI-3: Respuesta sísmica del suelo sobre roca (Kramer, 1996)	66
Figura VI-4: Descripción de los puntos en la superficie (A) y en el límite inferior (B)	66
Figura VI-5: Espectro de respuesta de los registros escalados en los perfiles de suelo: (a	a)
Suelo Rígido S1, (b) Suelo Intermedio S2 y (c) Suelo blando S3	68
Figura VI-6: Espectro de respuesta de los registros escalados a PGA=0.4g en: (a) Suelo	)
Rigido S1, (b) Suelo Intermedio S2 y (c) Suelo blando S3	69
Figura VI-/: Relación hiperbólica de esfuerzo-deformación en un ensayo triaxial drena	.do
(Plaxis 2D, 2016).	74
Figura VI-8: Comportamiento histerético del suelo en el modelo HS Small (Laera, 201:	5).

Figura VI-9: Curva de degradación de rigidez para gravas (ASCE)	. 78
Figura VI-10: Variación del módulo de corte por deformación de corte para arena (H.	
Bolton Seed y I. M. Idriss, 1970)	. 80
Figura VI-11: Pórtico resistente en la dirección longitudinal	. 84
Figura VI-12: Cargas actuantes P (tonf) en el pórtico en la dirección longitudinal	. 84
Figura VI-13: Modelo de la estructura y el suelo en forma conjunta	. 86
Figura VI-14: Modelación de la interacción dinámica suelo estructura del edificio	. 86
Figura VII-1: Gráfico comparativo de desplazamiento de piso u(m) en suelo rígido S1	. 93
Figura VII-2: Deriva máximo de entrepiso en suelo rígido S1	. 94
Figura VII-3: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo rígido S1	. 95
Figura VII-4: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo rígido S1	. 95
Figura VII-5: Desplazamiento de entrepiso u(m) en suelo intermedio S2	. 97
Figura VII-6: Deriva máximo de entrepiso en suelo intermedio S2	. 98
Figura VII-7: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo intermedio S2	. 99
Figura VII-8: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S2	. 99
Figura VII-9: Gráfico comparativo de desplazamiento de piso u(m) en suelo blando S3.	102
Figura VII-10: Deriva máxima de entrepiso en suelo blando S3	102
Figura VII-11: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo blando S3	103
Figura VII-12: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo blando S3	104
Figura VII-13: Desplazamiento de entrepiso u(m) en suelo rígido S1	106
Figura VII-14: Deriva máximo de entrepiso en suelo rígido S1	107
Figura VII-15: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo rígido S1	108
Figura VII-16: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo rígido S1	108
Figura VII-17: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo intermedio S2	110
Figura VII-18: Deriva máximo de entrepiso en suelo intermedio S2	111
Figura VII-19: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo intermedio S2	111
Figura VII-20: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S2	112
Figura VII-21: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo blando S3	113
Figura VII-22: Deriva máximo de entrepiso en suelo blando S3	114
Figura VII-23: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo blando S3	115
Figura VII-24: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S3	115

#### RESUMEN

El siguiente trabajo pretende mostrar los efectos del suelo en el modelo estructural de una edificación escolar ubicada en el Perú, frente a una solicitación sísmica intensa y moderada de acuerdo a los espectros de diseño de la Norma E030 y a registros sísmicos medidos en Chile.

Para este fin se desarrollaron dos modelos estructurales en el programa ETABS, uno de base fija y otro base flexible, que toma en cuenta la interacción dinámica suelo-estructura conforme a la propuesta de FEMA 440. También se desarrolló un tercer modelo bidimensional de elementos finitos desarrollado en el programa PLAXIS 2D-2015, que considera la estructura y el suelo en forma conjunta, con la capacidad de modelar el comportamiento no lineal del suelo.

Finalmente se presenta la comparación de la respuesta dinámica en los modelos sobre los tres perfiles de suelo seleccionado, que permitirá informar los criterios a considerar en la evaluación de los efectos de la interacción dinámica suelo estructura en el modelo estructural del edificio.

# ABSTRACT

The following work intends to show the effects of the soil in a structural model of a school building situated in Peru and its response against a moderate seismic event according to the design spectrum hazard of the E030 Code and seismic registries measured in Chile.

To accomplish this, two structural models were developed in ETABS software, one with fixed base and one with flexible base, which takes into account the dynamic soul-structure interaction according to FEMA 440 recommendations. A third model was made based on 2D finite elements and carried out in PLAXIS 2D-2015 software, in which the structure and soil is considered as whole. The purpose of this model is to represent the non-linear behavior of the soil.

Finally, a comparison of the dynamic response of the models on the three selected soil profiles is presented, which allows to inform the criteria to be considered in the evaluation of the effects of the Dynamic Interaction of Soil and Structure on the structural model of the building.

# I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la respuesta dinámica de las estructuras involucra un problema de alta complejidad, pues depende de una serie de variables que influirán en la respuesta. Una de estas variables es la Interacción dinámica Suelo Estructura (IDSE), que generalmente no se incluye en el modelo estructural a fin de simplificar su cálculo.

En este trabajo se evalúan los efectos del suelo en la respuesta dinámica de una edificación escolar ubicada en el Perú, considerando la IDSE. Para lo cual se seleccionó tres perfiles de suelos distintos: Suelo Rígido S1, Suelo Intermedio S2 y Suelo Blando S3. Estos perfiles están clasificados de acuerdo a la velocidad de propagación de onda de corte, estipulada en la Norma E030 del Perú.

En el capítulo III, se describe las solicitaciones sísmicas necesarias para el análisis dinámico de la estructura, donde se calcula los espectros de diseño de acuerdo a la norma E030, que considera los factores de zona, suelo e importancia de la edificación. También se describe los registros sísmicos utilizados para el análisis tiempo-historia, los que fueron obtenidos durante el terremoto de Chile ocurrido el 27 de febrero del 2010, que alcanzó una magnitud de 8.8 Mw. Registros que fueron seleccionados por su relevancia desde el punto de vista estructural y por tener como origen la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

En el capítulo IV, se realiza un análisis dinámico modal espectral, considerando espectros de diseño para los tres perfiles de suelo seleccionados, calculados de acuerdo a lo estipulado

en la Norma E030. A fin de obtener una respuesta dinámica que considere una base fija en el modelo estructural, es decir, sin tomar en cuenta los efectos de interacción suelo estructura, se desarrolló un modelo computacional de la estructura en el programa ETABS (*Extended three Dimensional Analysis of Building Systems*).

En el capítulo V, se describe el procedimiento de inserción de los efectos de interacción suelo estructura al modelo estructural, de acuerdo a las disposiciones de FEMA (*Federal Emergency Management Agency*), que considera el efecto de flexibilidad del suelo a través de una rigidez equivalente en la base de la edificación, de acuerdo a expresiones proporcionadas en FEMA 356 "*Prestandard and Comentary for the Seismic Rehabilitation of Building*". Además, se incluye un amortiguamiento adicional al modelo estructural, en atención al comportamiento histerético del suelo y por radiación, según lo dispuesto por FEMA 440 "*Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*", que incluye el efecto cinemático, permitiendo que la percepción del movimiento sísmico en el suelo cambie, por la existencia de la estructura en la superficie.

En el capítulo VI, se describe el procedimiento de análisis bidimensional, que considera el suelo y la estructura en forma conjunta, mediante el método de elementos finitos, utilizando el programa PLAXIS 2D-2015. Este programa tiene la capacidad de incorporar al modelo, el comportamiento no lineal del suelo, tomando en cuenta la degradación de la rigidez e incremento del amortiguamiento del mismo.

En el capítulo VII se realiza un análisis comparativo de las respuestas dinámicas en los tres modelos desarrollados: Modelo estructural de base fija, modelo que considera la IDSE de acuerdo a FEMA 440 y el modelo bidimensional de elementos finitos, que considera al suelo y la estructura en forma conjunta desarrollado mediante el programa PLAXIS.

#### II. CARACTERISTICAS DEL EDIFICIO

En este capítulo se describe el edificio objeto de análisis (arquitectura, estructura y estado de cargas). Este edificio representa una edificación típica de locales escolares en Perú, el cual ha sido diseñado de acuerdo a la Norma E030 "Diseño Sismorresistente" del Reglamento Nacional de Edificaciones, que clasifica a los centros educativos como estructuras de categoría A. Por lo que son considerados edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después de que ocurra un sismo severo (Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú).

#### **II.1 Descripción del Edificio**

La infraestructura educativa en el Perú, se caracteriza por presentar una configuración típica, que consiste en una edificación de 2 pisos, de planta rectangular, con 3 aulas por cada piso, superficie total de aproximadamente 410 m2 (el primer piso de 180 m2 y en el segundo piso de 230 m2).

Las estructuras están conformadas por pórticos de hormigón armado en la dirección longitudinal, muros de albañilería confinada en la dirección transversal y losas unidireccionales con espesor de 20 cm.

En la figura II-1 se puede observar estructuras típicas de locales escolares ubicados en distintas partes del Perú, que se caracterizan por tener techo a dos aguas en zonas de la sierra y losa plana en la costa peruana.



Figura II-1 : Edificios típicos de locales escolares en el Perú (Silva, 2012)

En el Anexo A se presentan los planos en planta y elevación de las características arquitectónicas del edificio.

En la figura II-2 y II-3, se presenta la configuración estructural típica en planta y de elevación respectivamente. El sistema estructural se caracteriza por contener pórticos resistentes en la dirección longitudinal con columnas de sección tipo L en las esquinas, columnas intermedias de sección tipo T y vigas rectangulares de 0.25m x 0.40 m y en la dirección transversal por muros de albañilería confinada.



Figura II-2: Vista en planta del edificio



Figura II-3: Vista en elevación del edificio

# II.2 Características del Suelo de Fundación

De acuerdo a Norma Peruana E030 "Diseño Sismorresistente", los perfiles de suelo se clasifican en función a la velocidad promedio de propagación de ondas de corte (Vs) y son de 05 tipos (tabla III-2). Considerando esta normativa, el presente

trabajo utilizó tres perfiles de suelo sobre el que se cimentó el edificio: Suelo rígido S1, Suelo Intermedio S2 y Suelo blandos S3.

#### II.2.1 Perfil de Suelo S1: Suelos Rígidos

Corresponden a suelos que poseen velocidades de propagación de onda de corte Vs, entre 500m/s y 1500 m/s.

A partir de esta descripción, se optó por considerar un suelo de tipo grava arenosa densa, con una velocidad de propagación de onda de corte Vs=600 m/s que represente este perfil de suelo S1.

Las propiedades del suelo se detallan en la tabla II-1, obtenidas de acuerdo a valores típicos recomendados por Braja M. Das (Fundamentos de ingeniería Geotécnica, 2001) para arenas densas.

Tabla II-1: Parámetros de perfil de suelo S1

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Peso unitario no saturado	$\gamma_{unsat}$	20	KN/m <sup>3</sup>
Peso unitario saturado	$\gamma_{sat}$	20	KN/m <sup>3</sup>
Módulo de Poisson	V	0.2	
Cohesión	<i>c</i> '	0	KN/m <sup>3</sup>
Ángulo de fricción	$\phi$ '	44°	
Densidad relativa	DR	95%	

#### II.2.2 Perfil de Suelo S2: Suelos Intermedios

Corresponden a suelos medianamente rígidos, que poseen velocidades de propagación de onda de corte Vs, entre 180m/s y 500 m/s.

A partir de esta descripción, se optó por considerar un suelo de tipo arena media, con una velocidad de propagación de onda de corte Vs=300 m/s que represente este perfil de suelo S2.

Las propiedades del suelo se detallan en la tabla II-2., fueron obtenidas de acuerdo a valores típicos recomendados por Braja M. Das (Fundamentos de ingeniería Geotécnica, 2001) para arena media.

Tabla II-2: Parámetros de perfil de suelo S2

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Peso unitario no saturado	$\gamma_{unsat}$	18	KN/m <sup>3</sup>
Peso unitario saturado	$\gamma_{sat}$	18	KN/m <sup>3</sup>
Módulo de Poisson	V	0.2	
Cohesión	<i>c</i> '	0	KN/m <sup>3</sup>
Ángulo de fricción	$\phi$ '	35°	
Densidad Relativa	DR	55	

# II.2.3 Perfil de Suelo S3: Suelos Blandos

Corresponden a suelos flexibles, que poseen velocidades de propagación de onda de corte Vs menor o igual que 180m/s.

A partir de esta descripción, se optó por considerar un suelo de tipo arena suelta, con una velocidad de propagación de onda de corte Vs=150 m/s, que represente este perfil de suelo S3.

Las propiedades del suelo se detallan en la tabla II-3, fueron obtenidas de acuerdo a valores típicos recomendados por Braja M. Das (Fundamentos de ingeniería Geotécnica, 2001) para arena suelta.

Tabla II-3: Parámetros de perfil de suelo S3

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Peso unitario no saturado	$\gamma_{unsat}$	17	KN/m <sup>3</sup>
Peso unitario saturado	$\gamma_{sat}$	17	KN/m <sup>3</sup>
Módulo de Poisson	V	0.2	
Cohesión	<i>c</i> '	0	KN/m <sup>3</sup>
Ángulo de fricción	$\phi$ '	30°	
Densidad relativa	DR	35	

#### II.3 Características de la Cimentación Superficial

La cimentación es el elemento estructural que transmite las cargas de las columnas y muros al suelo, como la resistencia del suelo es menor a la del concreto, la cimentación debe poseer un área mayor a su respectiva columna, a fin de reducir los esfuerzos que se transmiten al terreno (Harmsen, 2005).

A continuación, se detallan las características principales de la cimentación de tipo superficial, en los tres distintos perfiles de suelos considerados: las zapatas son cuadradas de hormigón armado y conectadas con vigas de cimentación, a fin de limitar asentamientos diferenciales en la edificación.

#### a) Cimentación sobre Suelo Rígido S1

La edificación fundada sobre el perfil de suelo S1, consta de zapatas cuadradas tipo Z1 y Z2, de dimensiones de 1.20 m y 1.00 m respectivamente; conectadas mediante una viga de cimentación de 0.25m de ancho y 0.50 m de peralte y consta

de una profundidad de cimentación de 1.30m, tal como se detalla en la figura II-4.



Figura II-4: Vista en planta de la cimentación superficial - Suelo S1

En la figura II-5, se muestra el análisis realizado en el programa para el diseño de sistema de cimentación de hormigón armado SAFE v.12, en el que se verifica las dimensiones de las zapatas para el perfil de suelo S1. Este análisis se realizó a partir de las cargas obtenidas del análisis estructural del edificio mediante el programa ETABS (capítulo IV).

El programa SAFE v.12. emplea el método de elementos finitos, con modelamiento en los apoyos tipo resorte, según el módulo de balasto del terreno. Para este caso el diseño está controlado por la capacidad admisible del suelo rígido S1, que toma un valor representativo de  $q_{adm}=2 \text{ kgf/cm}^2$ , recomendado por T.Harmsen (Harmsen, 2005, pág. 319).



Figura II-5: Esfuerzos generados en el suelo S1  $\sigma$ (kgf/cm2)- SAFE

#### b) Cimentación sobre Suelo Intermedio S2

En la edificación fundada sobre el perfil de suelo S2, la cimentación consta de zapatas cuadradas tipo Z1 y Z2 de dimensiones de 2.00 m y 1.80 m respectivamente, conectadas mediante una viga de cimentación de 0.25m de ancho y 0.50 m de peralte y consta de una profundidad de cimentación de 1.30m, tal como se detalla en la figura II-6



Figura II-6: Vista en planta de la cimentación superficial - Suelo S2

En la figura II-7, se muestra el análisis realizado en el programa de diseño de sistemas de cimentación de hormigón armado SAFE v.12, en el que se verifica las dimensiones de las zapatas para el perfil de suelo S2.

Para este caso el diseño está controlado por la capacidad admisible del suelo intermedio S2, que toma un valor representativo de  $q_{adm}=1.5 \text{ kgf/cm}^2$ , recomendado por T.Harmsen (Harmsen, 2005, pág. 319).



Figura II-7: Esfuerzos en el suelo S2  $\sigma$ (kgf/cm2) -SAFE

## c) Cimentación sobre Suelo Intermedio S3

Para la edificación fundada sobre el perfil de suelo del tipo S3, la cimentación consta de zapatas cuadradas tipo Z1 y Z2 de dimensiones de 2.80 m. y 2.60 m. respectivamente, conectadas mediante una viga de cimentación de 0.25m de ancho y 0.50 m de peralte y consta de una profundidad de cimentación de 1.30m, tal como se detalla en la figura II-8.



Figura II-8: Vista en planta de la cimentación superficial - Suelo S3

En la figura II-9, se muestra el análisis realizado en el programa de diseño de sistemas de cimentación de hormigón armado SAFE v.12, en el que se verifica las dimensiones de las zapatas para el perfil de suelo S3. Para este caso el diseño está controlado por la capacidad admisible del suelo intermedio S3, que toma un valor representativo de  $q_{adm}$ =1.0 kgf/cm<sup>2</sup>, recomendado por T.Harmsen (Harmsen, 2005, pág. 319).



Figura II-9: Esfuerzos en el suelo S3  $\sigma$ (kgf/cm2) -SAFE

# III. SOLICITACIONES SÍSMICAS

El Perú se ubica en la zona denominada cinturón de fuego del pacífico, zona del mundo donde se producen la mayor cantidad de sismos. Su actividad sísmica se debe a la subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana.

En el análisis sísmico modal espectral del edificio en el programa ETABS, se consideró espectros de diseño, para los distintos perfiles de suelo estipulados en la Norma peruana E030 "Diseño Sismorresistente", modificada en el año 2016.

Asimismo, para el análisis dinámico tiempo historia en el programa PLAXIS, se tomaron en cuenta tres registros sísmicos medidos en Chile, durante el terremoto de Maule del 2010, pertenecientes a estaciones situadas en roca.

#### **III.1 Espectro de Diseño**

Para el análisis sísmico modal espectral se utiliza los requerimientos de la Norma técnica E.030 "Diseño Sismorresistente (2016), que considera el espectro de diseño inelástico de pseudo-aceleraciones, el cual está definido por la expresión (3.1):

$$S_a = \frac{Z.U.C.S}{R} g \tag{3.1}$$

**El Factor de zona Z**, se puede interpretar como la aceleración máxima horizontal en suelo rígido, con una probabilidad de 10 % de ser excedida en 50 años. Para estos efectos el Perú está dividido en cuatro zonas como se muestra en la figura III-1 y la tabla III-1

Tabla III-1: Factores de zona



Figura III-1: Zonificación sísmica (Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, 2016)

**Perfiles de suelo S,** son cinco y se clasifican considerando la velocidad promedio de propagación de ondas de corte (Vs). La descripción del tipo de suelo y los parámetros de diseño se resumen en la tabla III-2.

Perfil	Descripción	$\mathbf{V}_{\mathbf{s}}$
$\mathbf{S}_0$	Roca Dura	> 1500 m/s
$\mathbf{S}_1$	Suelo Muy Rígido	500 m/s a 1500 m/s
$\mathbf{S}_2$	Suelo Intermedio	180 m/s a 500 m/s
$S_3$	Suelos Blandos	< 180 m/s
$\mathbf{S}_4$	Condiciones	
	Excepcionales	

Tabla III-2: Clasificación de los perfiles de suelo (RNE, 2016)

Asimismo, el factor de suelo depende de la zona donde se ubique el proyecto, tal como se muestra en la tabla III-3 y los periodos se detallan en la tabla III-4, según el tipo de perfil de suelo.

Tabla III-3: Factor de suelo S (RNE, 2016)

Suelo Zona	$S_0$	$\mathbf{S}_1$	$\mathbf{S}_2$	<b>S</b> <sub>3</sub>
$Z_4$	0.80	1.00	1.05	1.10
$Z_3$	0.80	1.00	1.15	1.20
$Z_2$	0.80	1.00	1.20	1.40
$Z_1$	0.80	1.00	1.60	2.00

Tabla III-4: Tabla de periodos "TP" y "TL" (RNE, 2016)

	$S_0$	$S_1$	$\mathbf{S}_2$	$S_3$
TP	0.30	0.40	0.60	1.00
$T_{L}$	3.00	2.50	2.00	1.60

**Factor de Amplificación Sísmica (C):** Dependerá de las características de sitio y se interpreta como el factor de amplificación de la aceleración estructural, respecto a la aceleración del suelo. Se define por la ecuación (3.2)

$$T < T_{p} \qquad C=2.5$$

$$T_{p} < T < T_{L} \qquad C=2.5 \left(\frac{T_{p}}{T}\right) \qquad (3.2)$$

$$T > T_{L} \qquad C=2.5 \left(\frac{T_{p}T_{L}}{T^{2}}\right)$$

Donde T es el periodo fundamental de vibración de la estructura en la dirección de análisis, Tp y  $T_L$  son periodos pertenecientes al suelo de acuerdo a la tabla III-4

**Categoría de la edificación y Factor de Uso (U)**: Cada estructura será clasificada según la categoría y el factor de uso (U) definidos en la tabla III-5

Categoría	Descripción	U
А	A1: Establecimientos de Salud	(*)
Edificaciones	A2: Edificaciones esenciales cuya función no debería	1.5
Esenciales	Interrumpirse inmediatamente después de que ocurra	
	un sismo severo	
В	Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de	1.3
Edificaciones	personas	
Importantes		
С	Edificaciones comunes cuya falla no acarree peligros	1.0
Edificaciones	adicionales	
Comunes		
D	Construcciones provisionales	(**)
Edificaciones		
Temporales		

Tabla III-5: Categoría de las edificaciones y factor "U" (RNE, 2016)

(\*) Las nuevas edificaciones de categoría A1 tendrán aislamiento sísmico en la base, se podrá considerar U=1

(\*\*) Se deberá proveer resistencia y rigidez adecuada para acciones laterales, a criterio del proyectista

**Coeficiente de Reducción de las fuerzas sísmicas (R):** Clasifica las estructuras según los materiales y sistemas estructurales predominantes en cada dirección, la tabla III-6 resume los factores de reducción de la Norma E030

Tabla III-6: Coeficiente básico de reducción de fuerzas sísmicas

Sistema Estructural	Coeficiente Básico de	
	Reducción R <sub>0</sub>	
Concreto Armado:		
Pórticos	8	
Dual	7	
De muros estructurales	6	
Muros de ductibilidad limitada	4	
Albañilería Armada o Confinada	3	

La norma reconoce que las edificaciones irregulares no tendrán un adecuado comportamiento en un evento sísmico. Por lo tanto, se reduce el valor de R multiplicándolo por los factores  $I_a$  y  $I_p$ 

$$R = R_0 I_a I_p \tag{3.3}$$

Donde,  $I_a$  representa un factor de irregularidad en altura y  $I_p$  es un factor de irregularidad en planta, ambos factores son proporcionados por la Norma E030, de acuerdo a las características de irregularidad de la edificación.

Los parámetros sísmicos considerados en el presente trabajo se muestran en la tabla III-7, donde el factor de reducción en la dirección longitudinal corresponde a una estructura de pórticos de concreto armado y la dirección transversal corresponde una estructura de albañilería confinada. Debe tenerse en cuenta que para las edificaciones de categoría A2, no está permitido irregularidades en planta y altura.

Factor de zona (Z)	Zona 4	Z=0.45
Factor de Uso (U)	Categoría A2	U=1.5
Factor de suelo (S)	S <sub>1</sub> – Suelos muy rígidos	$S=1.0$ $T_P=0.4s$
		$T_L = 2.5s$
	S <sub>2</sub> –Suelos intermedios	$S=1.05$ $T_P=0.6s$
		$T_L=2.0s$
	S <sub>3</sub> – Suelos blandos	$S=1.10$ $T_P=1.0s$
		$T_L=1.6s$
Factor de Reducción (R)	R <sub>x</sub> =8 Pórtico H°A°	
	R <sub>y</sub> =3 Albañilería	

Tabla III-7: Parámetros sísmicos de la zona de proyecto

A partir de los parámetros definidos en la tabla III-7, se obtiene los espectros de diseños elástico para los tres perfiles de suelo definidos, mediante la ecuación 3.1, considerando el factor de reducción R=1.

Los espectros de diseño elástico se muestran en la figura III-2, donde se puede observar que el espectro de diseño para el perfil de suelo blando S3, tiene la mayor ordenada de aceleración



Figura III-2: Espectro de pseudo-aceleraciones elástico - Norma E030

Adicionalmente se tiene un espectro de diseño para los tres perfiles de suelo, donde se considera un valor de PGA =0.4g, a fin de representar una intensidad de sismo moderado. El espectro de pseudo-aceleración para un sismo moderado se muestra en la figura III-3



Figura III-3:Espectro de pseudo-aceleraciones elástico con PGA=0.4g

### **III.2 Registros Sísmicos**

Para la evaluación de los efectos de la IDSE en la edificación mediante un modelo bidimensional de elementos finitos en el programa PLAXIS, se utilizaron tres registros acelerográficos medidos en roca, obtenidos durante el terremoto de Chile ocurrido el 27 de febrero del 2010 que alcanzó una magnitud de 8.8 Mw. Estos registros fueron seleccionados por su relevancia desde el punto de vista estructural y por tener como origen la zona de subducción de la placa de Nazca bajo la placa Sudamericana. Los registros sísmicos empleados fueron: Cerro El Roble, Central Rapel y Cerro Santa Lucía, correspondientes a su mayor componente horizontal, cuyas características principales se detalla en la tabla III-8 y en la figura III-3, en las que se puede apreciar el registro de aceleración en función del tiempo, así como la aceleración máxima del suelo.

		<b>F</b> 1	Magnitud	Aceleración máxima (g)	
Estación	Código	Fecha		Componente	
				EO	NS
Cerro El Roble	CER	27/02/2010	8.8 Mw	0.132	0.182
(Maule-Chile)					
Central Rapel	RAP	27/02/2010	8.8 Mw	0.195	-0.197
(Maule-Chile)					
Cerro Santa	CSL	27/02/2010	8.8 Mw	0.223	0.319
Lucia					
(Maule- Chile)					

Tabla III-8: Registros sísmicos medidos en roca





Figura III-4: Registros sísmicos medidos en roca

A continuación, se muestran en la tabla III-9, los parámetros característicos del movimiento de suelo, tales como la aceleración máxima y su velocidad máxima. Asimismo, se muestra la Intensidad de Arias (Ia), que junto a otros valores significativos permite determinar posibles daños en la estructura.

Tabla III-9: Registros sísmicos seleccionados

Estación	Magnitud	Aceleración máxima (g)	Inst. de tiempo t(s)	Velocidad máxima (cm/s)	Inst. de tiempo t(s)	Ia (m/s)
Cerro El	8.8 Mw	0.182	76.07	20.27	75.88	1.54
Roble NS						
Central	8.8 Mw	-0.197	24.96	30.53	29.29	1.88
Rapel NS						
Cerro Santa	8.8 Mw	0.319	65.29	40.77	65.42	2.56
Lucia NS						

Estación	Magnitud	Aceleración máxima (g)	Velocidad máxima (cm/s)	Ia (m/s)
Cerro El	8.8 Mw	0.182	20.27	1.54
Roble NS				
Central	8.8 Mw	-0.197	30.53	1.88
Rapel NS				
Cerro Santa	8.8 Mw	0.319	40.77	2.56
Lucia NS				

#### III.2.1 Espectro de Respuesta

El espectro de respuesta proporciona un medio conveniente para resumir la respuesta máxima de todos los posibles sistemas lineales de 1GDL a un componente particular del movimiento del terreno (Chopra, 2014)

A continuación, se muestra en la figura III-5 y III-6, los espectros de respuesta de pseudo-aceleración y desplazamiento de los registros sísmicos seleccionados, considerando un amortiguamiento de 5%. Para ello se utilizó el programa SeismoSignal v.2016.



Figura III-5:Espectros de respuesta de pseudo-aceleración elásticos para un amortiguamiento de 5%
De la figura III-5 se puede observar que el espectro de respuesta del Cerro Santa Lucía, presenta el mayor peak en el rango de periodo de 0.2 a 0.4 s, además de varios peaks representativos hasta el periodo de 1 s, a partir del cual decae en los valores de aceleración. El espectro de respuesta de Central Rapel se caracteriza por contener los mayores peaks en el rango de periodos de 0.2 hasta 0.6 s. Y el espectro de respuesta del Cerro El Roble, presenta los mayores peaks en el rango de periodos de 0.3 hasta 0.8 s.

Se observa que en l rango de periodos que oscila la estructura (0.2s-0.4 s), no existe diferencia significativa entre los espectros de respuesta de desplazamiento de los tres registros seleccionados (Figura III-6).



Figura III-6: Espectros de respuesta de desplazamiento elástico para un amortiguamiento de 5%

# III.2.2 Espectro de Potencia de Fourier

Se calcula este espectro de frecuencia usando la transformada rápida de Fourier. De esta manera el contenido de frecuencia proporciona información acerca de cómo es la amplitud de un movimiento del suelo distribuido entre diferentes frecuencias. Esta información es necesaria ya que la respuesta dinámica de la estructura, depende tanto de la amplitud de las cargas aplicadas, como del rango de frecuencias en el que se concentra el contenido de energía de la señal sísmica.

A continuación, se muestra en la figura III-6, los espectros de potencia de Fourier para los tres registros seleccionados.





Figura III-7: Espectros de potencia de Fourier

En la figura III-7, se observa el contenido de frecuencia predominante, donde se concentra la energía del movimiento sísmico para los tres registros considerados. Para el registro de Central Rapel se tiene una frecuencia de 2.24 Hz, para Santa Lucía se tiene una frecuencia de 1.59 Hz y para El Roble se tiene una frecuencia de 1.59 Hz.

#### IV. MODELO ESTRUCTURAL DE BASE FIJA

En este capítulo se describe el procedimiento del análisis modal espectral, realizado para verificar el cumplimiento de las exigencias de la Norma E030 en el diseño sismorresistente de la estructura. De esta manera se obtiene la respuesta de la estructura a partir del espectro de diseño, considerando como base fija el modelo estructural, es decir, ignorando los efectos de interacción suelo estructura.

El Análisis Modal espectral consiste en resolver un análisis tiempo-historia en forma aproximada. El método implica el cálculo de los valores máximos de respuesta en cada modo, para luego estimar los máximos probables mediante una combinación Cuadrática completa (CQC).

El modelo computacional fue desarrollado en el programa de ETABS. En la primera fase del procedimiento se calculan las propiedades de vibración de la estructura, periodos y modos naturales; luego se resuelve la ecuación del movimiento en forma modal y finalmente se calcula las respuestas totales, mediante la combinación de la contribución de respuesta de todos los modos.

#### IV.1 Aspectos de la Modelación Estructural

#### IV.1.1 Modelo Tridimensional en el Programa ETABS

Para el modelo computacional desarrollado en el programa de análisis ETABS, se tuvieron las siguientes consideraciones:

- Los elementos estructurales tienen comportamiento lineal elástico.
- Las columnas y vigas fueron modelados mediante elementos tipo "Frame element".

- Las losas y muros fueron modelados mediante elementos finitos rectangulares tipo *"Shell element"*, utilizando como máximo elementos de dimensiones de 50x50 cm para el enmallado.
- Se asignaron propiedades de diafragma rígido en la losa de cada piso, para de esta manera obtener un modelo de masas concentradas y tres grados de libertad por diafragma, asociado a dos componentes ortogonales de traslación y una de rotación.
- Para cada dirección de análisis, la excentricidad accidental en cada nivel se considera como 0,05 veces la dimensión del edificio en la dirección perpendicular a la dirección de análisis.
- El edifico tiene una configuración que no presenta irregularidades en planta.
- Se emplea una razón de amortiguamiento constante para todos los modos de vibración igual a ξ=0.05.
- El nivel basal del edificio se consideró en el sello de fundación
- El edificio está empotrado en su base.

En la figura IV-1 y IV-2, se muestra el modelo tridimensional del edificio, realizado en el programa ETABS.



Figura IV-1: Modelo tridimensional del edificio en el programa ETABS



Figura IV-2: Vista en planta del modelo estructural del edificio

**Propiedades de los Materiales:** el edificio posee elementos de hormigón armado de calidad f<sup>°</sup>c=210 kgf/cm2 con barras de acero de refuerzo A63-42H. Asimismo posee muros de albañilería confinada en la dirección transversal. Las propiedades del hormigón y albañilería considerados en el modelo estructural, se indican en la tabla IV-1 y IV-2 respectivamente.

Tabla IV-1: Propiedades del hormigón f'c=210 kgf/cm2

Resistencia a la compresión Módulo eléstico	$f'c=210 \text{ kgf/cm}^2$ E=218819.78 kgf/cm <sup>2</sup>
Módulo de Poissón	v=0.20
Peso específico	$\gamma$ =2400 kgf/m <sup>3</sup>

Tabla IV-2: Propiedades de albañilería

Resistencia a la compresión promedio Módulo elástico	$\begin{array}{c} fm=45 \text{ kgf/cm}^2\\ E=22500 \text{ kgf/cm}^2 \end{array}$
Módulo de Poissón	v=0.25
Peso específico	$\gamma = 1800 \text{ kgf/m}^3$

# IV.1.2 Masa Sísmica

Las masas sísmicas de cada piso se determinaron a partir del modelo desarrollado en el programa de computo ETABS, que calcula la masa a partir del peso específico unitario de los materiales, adicionalmente se consideró el peso permanente de los elementos no estructurales, como tabiques de 270 kgf/m2, terminaciones de piso de 100 kgf/m2, así como la carga viva de 250 kgf/m2 para el primer nivel y de 100 kgf/m2 para el techo.

El cálculo de la masa sísmica por piso, tuvo en cuenta el 100% de la carga muerta más el 50 % de la carga viva, de acuerdo a lo estipulado en la norma E030 para edificaciones esenciales. Los valores de la masa sísmica determinados en el modelo se muestran en la tabla IV-3.

Tabla IV-3: Masa sísmica por piso

Piso	Masa Traslacional X $(tonf - s^2 / m)$	Masa Traslacional Y $(tonf - s^2 / m)$
Piso 1	21.2240	21.2240
Piso 2	13.3890	13.3890

# IV.1.3 Periodos y Modos de Vibrar

Los periodos y modos de vibrar de la estructura dependen de sus propiedades de rigidez y de masa. Según la norma E030 se debe considerar una cantidad de modos de vibración, de tal manera que la suma sea por lo menos el 90 % de la masa total de la estructura.

En la tabla IV-4, se detallan los periodos de vibración asociado a cada modo y en la tabla IV-5, se especifica la masa efectiva en la dirección de análisis, donde se puede apreciar que el primer modo fundamental de la estructura corresponde a la dirección longitudinal X y el segundo modo corresponde a la dirección transversal Y.

Modo	T(s)	f(cps)	$\omega(rad / s)$
1	0.281	3.553	22.3272
2	0.098	10.205	64.1194
3	0.088	11.381	71.5114
4	0.072	13.906	87.3709
5	0.034	29.501	185.3599
6	0.03	32.962	207.1075

Tabla IV-4: Periodo de vibración asociado a cada modo

Tabla IV-5: Masa efectiva en la dirección de análisis y masa acumulada

Modo	T(s)	$M_{nx}$	M <sub>ny</sub>	$\sum M_{nx}$	$\sum M_{ny}$
1	0.281	92.650%	0.000%	92.65%	0.00%
2	0.098	0.000%	94.360%	92.65%	94.36%
3	0.088	0.001%	0.000%	92.65%	94.36%
4	0.072	0.000%	0.004%	92.65%	94.36%
5	0.034	0.003%	0.000%	92.65%	94.36%
6	0.03	0.000%	0.090%	92.65%	94.45%

#### **IV.2** Análisis Modal Espectral

El cálculo de la respuesta de un sistema de múltiples grados de libertad con amortiguador viscoso, sometido a fuerza externa p(t), se encuentra al resolver la ecuación del movimiento (4.1).

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = p(t) \tag{4.1}$$

Donde M, C y K son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez respectivamente. El análisis modal nos permite resolver este sistema y desacoplar la ecuación 4.1 siempre que se tenga un amortiguamiento del tipo clásico, generándose un conjunto de ecuaciones de un (01) grado de libertad, de esta manera la ecuación 4.2 representa la ecuación de movimiento asociada a cada modo "n".

$$\ddot{q}_n + 2\xi_n \omega_n \dot{q}_n + \omega_n^2 q_n = -\Gamma_n p(t)$$
(4.2)

Donde In es el factor de participación modal.

La respuesta máxima se estima a partir de la combinación de la respuesta máxima de cada modo, para ello se hace uso del criterio de Combinación Cuadrática Completa CQC.

Para el análisis dinámico modal espectral en la dirección longitudinal X, se utiliza el espectro elástico de diseño calculado en la sección III-1 para los tres perfiles de suelo seleccionado.

Adicionalmente se realiza el análisis dinámico modal espectral en la dirección longitudinal X, utilizando un espectro de diseño considerando como valor de PGA de 0.4g, a fin de representar las solicitaciones de un sismo moderado.

# IV.3 Respuesta sísmica para el modelo de base fija

A continuación, se muestran los resultados del análisis modal espectral realizado en el programa ETABS para la edificación, donde se consideraron espectros de diseño de acuerdo a la Norma E030 y un espectro de diseño que represente un sismo moderado con un valor de PGA=0.4g, tal como se detalla en la sección III-1.

## IV.3.1 Respuesta sísmica conforme a la Norma E030

En esta sección se presentan los resultados de la respuesta global del edificio en la dirección longitudinal X, conforme a la solicitación sísmica de la norma E030, considerando como base fija el apoyo del modelo estructural.

Se detallan los resultados para la respuesta elástica de desplazamientos máximos de piso, derivas de entrepiso, fuerza cortante en cada piso y la aceleración máxima absoluta de piso

# a) Desplazamiento máximo de piso

En la tabla IV-6, se resume los desplazamientos laterales máximos en la dirección de análisis longitudinal X para los tres perfiles de suelo considerados, observándose que en el perfil de suelo blando S3, se obtienen los máximos desplazamientos.

Tabla IV-6: Desplazamiento máximo de piso u(m)

Dico	Perfil de Suelo		
FISO	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	0.0418	0.0439	0.0460
1	0.0241	0.0253	0.0265

### b) Deriva máxima de Entrepiso

La deriva o distorsión del entrepiso está dada por la diferencia de los desplazamientos del nivel superior e inferior, divido entre la altura del entrepiso. Esta medida se relaciona con el nivel de daño en los elementos estructurales y no estructurales. La norma E030 establece valores límites para la distorsión de entrepiso, siendo el máximo de 0.007 para estructuras de concreto armado.

En la tabla IV-7, se muestran los resultados de los valores de deriva de entrepiso, donde se puede apreciar que se cumplen con los valores límites estipulados en la norma E030 para los tres perfiles de suelo considerados en el análisis.

Tabla IV-7: Deriva de entrepiso

Diag	Perfil de Suelo		
P ISO	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	0.0059	0.0062	0.0065
1	0.0056	0.0058	0.0061

## c) Fuerza Cortante de Piso V(tonf)

Una de las respuestas de mayor relevancia es la fuerza de corte que toma el edificio en su base y el cortante que solicita cada nivel de piso.

En la tabla IV-8 se muestra el corte total y presenta su mayor valor en el primer piso, el cual coincide con el corte basal, obteniendo mayores valores de fuerza cortante de piso para el análisis del perfil de suelo S3.

Tabla IV-8: Fuerza cortante de piso V(tonf)

Dico	Perfil de Suelo		
F 180	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	282.90	297.05	311.19
1	532.46	559.08	585.71

# d) Aceleración Máxima de Piso (m/s<sup>2</sup>)

Las aceleraciones de piso que experimenta la estructura ante un evento sísmico pueden producir daños en los elementos no estructurales.

En la tabla IV-9, se muestran los resultados de los valores de aceleración máxima de piso, donde se puede apreciar que los valores máximos de aceleración corresponden al perfil de suelo blando S3.

Tabla IV-9: Aceleración máxima de piso  $a(m/s^2)$ 

Dico	Perfil de Suelo		
FISO	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	21.20	22.26	23.32
1	12.83	13.47	14.11
0	6.62	6.95	7.28

#### IV.3.2 Respuesta de la estructura ante un sismo moderado

En esta sección se presentan los resultados de la respuesta global del edificio en la dirección longitudinal X, conforme a la solicitación sísmica (espectro de diseño con un valor de PGA=0.4g), considerando como base fija el apoyo del modelo estructural. Se detallan los resultados para la respuesta elástica de desplazamientos máximos de piso, derivas de entrepiso, fuerza cortante en cada piso y la aceleración máxima absoluta de piso

#### a) Desplazamiento máximo de piso

En la tabla IV-10, se resume los desplazamientos laterales máximos en la dirección de análisis longitudinal X para los tres perfiles de suelo considerados, observándose que en el perfil de suelo blando S3, se obtienen los máximos desplazamientos.

Diag	Per	fil de Suelo	
P180	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	0.024	0.024	0.024
1	0.014	0.014	0.014

Tabla IV-10: Desplazamiento máximo de piso u(m)

# b) Deriva máxima de Entrepiso

En la tabla IV-7 se muestran los resultados de los valores de deriva de entrepiso, donde se puede apreciar que se cumplen con los valores límites estipulados en la norma E030 para los tres perfiles de suelo considerados en el análisis.

Tabla IV-11: Deriva de entrepiso

Diag	Perfil de Suelo		
F180	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	0.0035	0.0035	0.0035
1	0.0033	0.0033	0.0033

#### c) Fuerza Cortante de Piso V(tonf)

En la tabla IV-12 se muestra el corte total de piso, que presenta su mayor valor en el primer piso, el cual coincide con el corte basal, obteniendo mayores valores de fuerza cortante de piso para el análisis del perfil de suelo S3.

Tabla IV-12: Fuerza cortante de piso V(tonf)

Dian	Perfil de Suelo		
FISO	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	282.90	297.05	311.19
1	532.46	559.08	585.71

En la tabla IV-13, se muestran los resultados de los valores de aceleración máxima de piso, donde se puede apreciar que los valores máximos corresponden al perfil de suelo blando S3.

Diag	Perfil de Suelo				
F180	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3		
2	21.201	22.262	23.322		
1	12.831	13.473	14.114		
0	3.924	3.924	3.924		

Tabla IV-13: Aceleración máxima de piso a(m/s<sup>2</sup>)

# V. INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA SEGÚN FEMA 440

En este capítulo se describe el procedimiento en el que se incluye los efectos de la interacción dinámica suelo estructura al modelo estructural, de acuerdo a las disposiciones de FEMA (*Federal Emergency Management Agency*), el cual considera el efecto de flexibilidad del suelo a través de una rigidez equivalente en la base de la edificación, de acuerdo a expresiones proporcionadas en FEMA 356 "*Prestandard and Comentary for the Seismic Rehabilitation of Building*". Además, se incluye en el modelo un amortiguamiento adicional a causa del comportamiento histerético del suelo y por radiación, según lo dispuesto por FEMA 440 "*Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*", que incluye el efecto cinemático permitiendo que la percepción del movimiento sísmico en el suelo se modifique, debido a la existencia de la estructura en la superficie.

### V.1 Parámetros de Rigidez Equivalente Según FEMA 356

En concordancia con FEMA 356, para fundaciones superficiales rígidas se debe calcular los parámetros de rigidez equivalente, mediante formulaciones propuestas por Gazetas (1991) mostradas en la figura V-1, los cuales están en función a las dimensiones de la fundación superficial y el módulo de corte del suelo, que luego son corregidas por un factor de empotramiento. Asimismo, se considera la degradación de rigidez del suelo bajo solicitaciones sísmicas, al multiplicar el módulo de corte inicial del suelo por un factor de reducción.

Con los coeficientes de rigidez equivalente, se calculan los periodos y modos de vibración de la estructura, considerándose así la flexibilidad en la base del modelo.



Figura V-1: Constantes de rigidez equivalente de los resortes para fundaciones

rígidas (FEMA 356, 2000)

FEMA 356 clasifica el suelo en 6 perfiles, tomando en consideración la velocidad de propagación de la onda de corte Vs como se detalla en la tabla V-1

Perfil	Vs (m/s)
Clase A	Vs>1524 m/s
Clase B	762 m/s <vs<1524 m="" s<="" td=""></vs<1524>
Clase C	365 m/s <vs<762 m="" s<="" td=""></vs<762>
Clase D	182 m/s <vs<365 m="" s<="" td=""></vs<365>
Clase E	Vs < 182 m/s
Clase F	Evaluación específica

Tabla V-1: Clasificación del perfil de suelo (FEMA 356, 2000)

El módulo de corte inicial Go, se calcula a partir de la velocidad de propagación de onda de corte del suelo, mediante la ecuación 5.1

$$G_o = \frac{\gamma v_s^2}{g} \tag{5.1}$$

El módulo de corte efectivo se calcula a partir del módulo de corte inicial, considerando la degradación de rigidez del suelo, los cuales están dados por los factores de la tabla V-2, donde el parámetro Sxs representa el valor máximo de aceleración del espectro de diseño.

Tabla V-2: Factor del módulo de corte efectivo (FEMA 356, 2000)

ve Peak Acc S <sub>XS</sub> /2.5 =0.1 1.00 1.00	Sxs/2.5           =0.4           1.00           0.95	$S_{XS}/2.5$ $S_{XS}/2.5$ =0.8 1.00 0.90				
S <sub>XS</sub> /2.5 =0.1 1.00 1.00	S <sub>xs</sub> /2.5 =0.4 1.00 0.95	S <sub>XS</sub> /2.5 =0.8 1.00 0.90				
1.00 1.00	1.00 0.95	1.00 0.90				
1.00	0.95	0.90				
0.95	0.75	0.60				
0.90	0.50	0.10				
0.60	0.05	*				
*	*	*				
D         1.00         0.90         0.50         0.10           E         1.00         0.60         0.05         *           F         *         *         *         *           Note: Use straight-line interpolation for intermediate values of S <sub>XS</sub> /2.5.         *         Site-specific geotechnical investigation and dynamic site response						

# V.1.1 Parámetros de rigidez para el perfil de suelo S1

De acuerdo a la clasificación del perfil del suelo según FEMA 356, el perfil de suelo S1 vendría a representar la clase C, con velocidad de onda de corte comprendida entre 365 m/s<Vs < 762 m/s y de acuerdo al espectro de diseño elástico de la Norma E030 detallada en la figura III-2, para el tipo de suelo S1 corresponde un valor de Sxs=1.68.

Donde:  

$$V_s = 600 \text{ m/s}$$
 Velocidad de onda de corte  
 $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  Peso específicio del suelo  
 $G_0 = \frac{(\gamma V_s^2)}{g} = 734000 \text{ kN/m}^2$  Módulo de Corte inicial

De la Tabla V-2, a partir del cociente de Sxs/2.5 y mediante la interpolación se calcula el Módulo de Corte Efectivo (G) de la relación:

$$\frac{G}{G_0} = 0.647$$
$$G = 475000 \text{ kN/m}^2$$

Б

Las constantes de rigidez equivalente de los resortes traslacionales y rotacionales para fundaciones rígidas, son calculadas de acuerdo a las expresiones proporcionadas por FEMA 356 mostradas en la figura V-1, cuyos resultados en el perfil de suelo S1, se muestran en la tabla V-3.

Tabla V-3: Constantes de rigidez equivalente para el perfil de suelo tipo S1

Zapata	В	L	Kx	Ку	Kz	Kxx	Куу	Kzz
Zapata	(m)	(m)	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m
Z1	1.2	1.2	450181	450181	278817	193998	202544	329563
Z2	1.0	1.0	417404	417404	248819	139266	147756	215747
VC	0.3	3.6	367149	455435	360219	75726	504625	1670852
VC/5	0.3	3.6	61191	75905	60036	12621	84104	278475

## V.1.2 Parámetros de rigidez para el perfil de suelo S2

De acuerdo a la clasificación del perfil del suelo según FEMA 356, el perfil de suelo S2 vendría a representar la clase D con velocidad de propagación de onda de corte comprendida entre 182 m/s<Vs<365 m/s y de acuerdo al espectro de diseño elástico de la Norma E030 detallada en la figura III-2 para suelos de tipo S2, corresponde un valor de Sxs=1.771.

El módulo de corte inicial se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$V_s = 300 \text{ m/s}$$
 Velocidad de onda de corte  
 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$  Peso específicio del suelo  
 $G_0 = \frac{(\gamma V_s^2)}{g} = 165194 \text{ kN/m}^2$  Módulo de Corte inicial

De la Tabla V-2, a partir de la relación Sxs/2.5 y mediante interpolación se calcula el Módulo de Corte efectivo (G):

$$\frac{G}{G_0} = 0.192$$
$$G = 31651 \text{ kN/m}^2$$

Las constantes de rigidez equivalentes de los resortes traslacionales y rotacionales para fundaciones rígidas, son calculados de acuerdo a las expresiones proporcionadas por FEMA 356 mostradas en la figura V-1, cuyos resultados en el perfil de suelo S2, se muestran en la tabla V-4.

Zapata	В	L	Kx	Ку	Kz	Kxx	Куу	Kzz
Zapata	(m)	(m)	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m
Z1	2.0	2.0	38356	38356	26592	36717	39460	74103
Z2	1.8	1.8	36311	36311	24592	29196	31006	57447
VC	0.3	3.6	24644	30570	24513	5697	34563	119498
VC/5	0.3	3.6	4107	5095	4085	949	5760	19916

Tabla V-4: Constantes de rigidez equivalentes para el perfil de suelo S2

## V.1.3 Parámetros de rigidez para el perfil de suelo S3

De acuerdo a la clasificación del perfil del suelo según FEMA 356, el perfil de suelo S3 vendría a representar la clase E, con velocidad de propagación de onda de corte comprendida entre Vs<182 m/s y de acuerdo al espectro de diseño elástico de la Norma E030 detallada en la figura III-2 para suelos de tipo S3, corresponde un valor de Sxs=1.856.

Donde:

 $V_s = 150 \text{ m/s}$  Velocidad de onda de corte  $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$  Peso específicio del suelo  $G_0 = \frac{(\gamma V_s^2)}{g} = 39004 \text{ kN/m}^2$  Módulo de Corte inicial

En la Tabla V-2, a partir de la relación Sxs/2.5 y mediante interpolación se calcula el factor del Módulo de Corte efectivo (G):

$$\frac{G}{G_0} = 0.16$$
$$G = 6420 \text{ kN/m}^2$$

La constante de rigidez equivalente de los resortes traslacionales y rotacionales para fundaciones rígidas, son calculados de acuerdo a las expresiones proporcionadas por FEMA 356 mostradas en la figura V-5, cuyos resultados en el perfil de suelo S3, se muestran en la tabla V-5

Tabla V-5: Parámetros de rigidez equivalente para el perfil de suelo S3

Zonata	В	L	Kx	Ку	Kz	Kxx	Куу	Kzz
Zapata	(m)	(m)	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m
Z1	2.8	2.8	9136	9136	6815	15748	17676	33413
Z2	2.6	2.6	8748	8748	6423	13196	14670	27795
VC	0.3	3.6	4020	4987	3944	829	5526	18296
VC/5	0.3	3.6	804	997	789	166	1105	3659

Nota: Es preciso mencionar que para asignar el valor del módulo de corte efectivo para el perfil de suelo S3, se consideró un valor mínimo, de tal manera que se pueda aplicar la metodología FEMA 440, para evitar resultados con números complejos.

# V.2 Periodo y Modo de Vibrar con Base Flexible

En el modelo estructural tridimensional del edificio desarrollado en el programa ETABS, se le asigna propiedades de rigidez elástica a los apoyos, a través de elementos "Springs". Estos parámetros de rigidez equivalentes fueron calculados mediante la metodología de FEMA 356 descrita en la sección V.1 para los tres perfiles de suelo seleccionado.



Figura V-2: Modelo estructural con flexibilidad en la base en el programa ETABS

En la tabla V-6 se muestran los resultados de los periodos de vibración que considera la flexibilidad de la base para los tres perfiles de suelo seleccionados, observándose mayores periodos de vibración en el perfil de suelo blando S3.

Tabla V-6: Periodos de vibración de la estructura con base flexible T(s)

M. 1.	Tipo de Perfil del Suelo				
NIOdo	SI	S2	<b>S</b> 3		
1	0.288	0.315	0.353		
2	0.104	0.147	0.228		
3	0.093	0.132	0.201		
4	0.073	0.076	0.08		
5	0.034	0.036	0.046		
6	0.031	0.033	0.042		

### V.3 Metodología FEMA 440

FEMA 440 "*Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*", establece mediante el teorema de superposición, que el estudio del efecto de interacción suelo-estructura, se puede dividir en su componente inercial y cinemática.

La interacción cinemática es el resultado del aporte de la rigidez de la fundación, que causa efectos en el movimiento de campo libre, debido principalmente a la dimensión promedio de la cimentación y a los efectos de empotramiento de la misma, razón por la cual el movimiento sísmico es menor a lo que se produciría en un campo libre.

El efecto del amortiguamiento de la fundación, está asociado al amortiguamiento adicional, debido a la energía de radiación y al comportamiento histerético del suelo ante cargas sísmicas. De esta manera el amortiguamiento de la fundación es combinada con el amortiguamiento inicial de la estructura, lo que modifica el movimiento de entrada impartido al modelo como demanda sísmica.

Ambos efectos alteran las características del movimiento del terreno en la base (movimiento de entrada de la fundación FIM), tal como se puede observar en la figura V-3.



Figura V-3: Efectos de incluir la interacción suelo estructura (FEMA 440, 2005)

## V.3.1 Procedimientos para incluir los efectos cinemáticos

Se utiliza con la finalidad de corregir el espectro de diseño, mediante un factor de relación de espectros de respuesta (RRS), que representa la relación de la ordenada espectral del movimiento inicial impuesto en la fundación (FIM) con la ordenada espectral de campo libre (FFM).

El siguiente procedimiento simplificado, adaptado por kim y Stewart (2003), es recomendado para el análisifinas de los efectos de interacción cinemática según FEMA 440, que comprende:

- La evaluación del tamaño efectivo de la fundación mediante la expresión 5.2

$$b_e = \sqrt{ab} \tag{5.2}$$

Donde a y b son las dimensiones que abarca toda la fundación

 La evaluación del RRS<sub>bsa</sub> (base slab averaging), calculada en función del periodo de vibración mediante la expresión 5.3

$$RRS_{bsa} = 1 - \frac{1}{14100} \left(\frac{b_e}{T}\right)^{1.2} \ge \text{the value for T} = 0.2s \quad (5.3)$$

A partir del procedimiento descrito en la tabla V-7 se muestra el tamaño efectivo de la fundación en la edificación para los tres perfiles de suelo seleccionados.

Darámatros	Perfil de Suelo				
Farametros	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3		
a(m)	25.90	26.70	27.50		
b(m)	8.20	9.00	9.80		
be(m)	14.573	15.50	16.416		

Tabla V-7: Tamaño efectivo de la fundación

Con los valores obtenidos del factor de reducción  $RRS_{bsa}$  mediante la ecuación (5.3) se logra obtener los valores del espectro de diseño corregido, considerando los efectos cinemáticos mediante la expresión 5.4, y cuyos resultados se muestran en la figura V-

$$S_{a(FIM)}(T) = RRS_{bsa}(T)S_a(T) \qquad (5.4)$$

Donde  $S_a(T)$  es el espectro de diseño en campo libre, calculado en concordancia a la norma E030 para los tres perfiles de suelo seleccionado mostrado en la figura III-2.

# V.3.2 Amortiguamiento adicional de la fundación

El amortiguamiento de la fundación está relacionado con el comportamiento histerético del suelo y con la energía de radiación en el suelo de la fundación, es decir un amortiguamiento por radiación.

La razón de amortiguamiento inicial  $\beta$ i de la estructura, generalmente se representa con un 5 %, corregido por la atribución del amortiguamiento de la fundación  $\beta_f$ . Los cambios atribuidos de  $\beta_i$  a  $\beta_o$  modifican el espectro de respuesta elástica, por lo tanto, las ordenadas espectrales de diseño son reducidas.

Para el cálculo del amortiguamiento adicional por parte de la fundación  $\beta_0$ , se sigue el siguiente procedimiento:

- Se evalúan los periodos lineales de la estructura, asumiendo un modelo de base fija
   T y base flexible *T*. La flexibilidad en la base, se considera mediante las disposiciones de FEMA 356 calculados en la sección V.2.
- Se calcula la rigidez efectiva para un sistema de 1 GDL considerando base fija

$$K_{fixed}^* = M^* \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2$$

Donde M\* es la masa efectiva del primer modo de vibración

Asimismo, se consideran los siguientes parámetros:

- Radio equivalente r<sub>x:</sub>

$$r_x = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}}$$

Donde Af es el área de la fundación de acuerdo al perfil de suelo seleccionado

- Rigidez traslacional:

$$K_{x} = \frac{8}{2 - \nu} Gr_{x}$$

- Rigidez rotacional:

$$K_{\theta} = \frac{K_{fixed}^{*} \left(h^{*}\right)^{2}}{\left(\frac{\tilde{T}}{T}\right)^{2} - 1 - \frac{K_{fixed}^{*}}{K_{x}}}$$

Donde  $h^* \approx 0.7H$ 

- Radio equivalente por rotación de la fundación:

$$r_{\theta} = \left(\frac{3(1-\nu)K_{\theta}}{8G}\right)^{1/3}$$

 Se determina la razón de extensión del periodo efectivo, incluyendo la ductibilidad de la estructura:

$$\frac{\tilde{T}_{eff}}{T_{eff}} = \left\{ 1 + \frac{1}{\mu} \left[ \left( \frac{\tilde{T}}{T} \right)^2 - 1 \right] \right\}^{0.5}$$

Donde  $\mu$  es la demanda esperada de ductibilidad

- Se considera el amortiguamiento de la fundación:

$$\beta_f = a_1 \left( \frac{\tilde{T}_{eff}}{T_{eff}} - 1 \right) + a_2 \left( \frac{\tilde{T}_{eff}}{T_{eff}} - 1 \right)^2$$

Donde:

$$a_{1} = c_{e} \exp(4.7 - 1.6h / r_{\theta})$$
$$a_{2} = c_{e} \left[ 25 \ln(h/r_{\theta}) - 16 \right]$$
$$c_{e} = 1.5 \left( e / r_{x} \right) + 1$$

- Y finalmente se evalúa el amortiguamiento corregido por DSSI:

$$\beta_o = \beta_f + \frac{\beta_i}{\left(\frac{\tilde{T}_{eff}}{T_{eff}}\right)^3}$$

A continuación, se muestra en la tabla V-8, los resultados del procedimiento seguido de acuerdo a FEMA 440, con el fin de obtener el amortiguamiento adicional de la fundación debido a la IDSE, para los tres perfiles de suelo seleccionado.

Tabla V-8: Procedimiento de cálculo del amortiguamiento adicional según FEMA440

Darámatras		Perfil de Sue	elo
Parametros	<b>S</b> 1	S2	S3
T (s)	0.281	0.281	0.281
$\tilde{T}$ (s)	0.288	0.315	0.353
$M^*(kN-s^2/m)$	365	365	365
$G(kN/m^2)$	474932	31651	8000
$K^{*}_{fixed}\left(kN / m ight)$	182643	182643	182643
$r_x(m)$	8.22	9.26	9.26
$K_x(kN/m)$	17355338	1302896	316141
$K_{\theta}(kN-m/rad)$	119472789	40955010	203021473
$r_{\theta}(m)$	4.226	7.295	19.67
$ ilde{T_{e\!f\!f}}$	1.008	1.042	1.092
$T_{e\!f\!f}$			
$eta_i(\%)$	5	5	5
$eta_{_f}(\%)$	0.132	1.45	8.41
$eta_o(\%)$	5.009	5.87	12.25

### V.3.3 Espectro de Diseño Corregido de acuerdo a FEMA 440

De acuerdo a la ecuación (5.5), FEMA 440 propone corregir el espectro de pseudoaceleración, considerando efectos cinemáticos (Sa)<sub>FIM</sub> calculados de acuerdo a la ecuación 5.4, a fin de incluir los efectos del amortiguamiento adicional por parte de la fundación.

$$\left(S_a\right)_{\beta} = \frac{\left(S_a\right)_{FIM}}{B} \tag{5.5}$$

Donde  $B = \frac{4}{5.6 - \ln \beta_o}$  (5.6)

A continuación, se muestra en la figura V-4, los espectros de diseño elástico, corregidos por el efecto cinemático y el amortiguamiento adicional en la fundación, para los tres perfiles de suelo seleccionado. Se aprecia que el espectro de diseño para el perfil de suelo rígido S1, no varía considerablemente al incluir los efectos del amortiguamiento de la fundación.

Adicionalmente se muestra en la figura V-5, los resultados de los espectros de diseño elástico corregidos que considera los efectos de interacción suelo estructura de acuerdo a FEMA 440, para una solicitación de un sismo moderado con un valor de PGA=0.4g. cálculo que siguió el mismo procedimiento descrito en este capítulo, cuyos resultados numéricos se muestran en el Anexo B.



Figura V-4: Espectros de diseño de acuerdo a FEMA 440 en: (a) Suelo rígido S1,

(b) Suelo Intermedio S2 y (c) Suelo blando S3



Figura V-5: Espectros de diseño de acuerdo a FEMA 440 con PGA=0.4g en: (a) Suelo rígido S1, (b) Suelo Intermedio S2 y (c) Suelo blando

En la gráfica de espectros de respuesta V-4 y V-5, se puede identificar la influencia de considerar los efectos de interacción dinámica suelo estructura, utilizando la metodología propuesta por FEMA 440. Se observa que el espectro de respuesta para el perfil de suelo S3 presenta una mayor influencia debido a una considerable reducción en las ordenadas espectrales.

## V.4 Respuesta Sísmica para el Modelo de Base Flexible

En esta sección se presenta la respuesta global del edificio en la dirección longitudinal X, del análisis modal espectral realizado en el programa ETABS, considerando la flexibilidad en la base según FEMA 356 y el espectro de diseño corregido de acuerdo a FEMA 440.

#### V.4.1 Respuesta sísmica conforme a la Norma E030

#### a) Desplazamiento máximo de piso

En la tabla V-9, se resumen los desplazamientos laterales máximos en la dirección de análisis longitudinal X para los tres perfiles de suelo considerados, observándose que para el perfil de suelo blando S3, se obtienen los máximos desplazamientos.

Tabla V-9: Desplazamiento máximo de piso u(m)

Diso	Perfil de Suelo				
FISO	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3		
2	0.0420	0.0502	0.0536		
1	0.0245	0.0310	0.0348		

## b) Deriva Máxima de Entrepiso

En la tabla V-10, se muestran los resultados de los valores de deriva de entrepiso, donde se puede apreciar que el perfil de suelo S3, no cumple con los valores límites estipulados en la norma E030.

Tabla V-10: Deriva de entrepiso

Dico	Perfil de Suelo			
FISO	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	
2	0.0058	0.0063	0.0059	
1	0.0057	0.0071	0.0079	

# c) Fuerza Cortante de Piso

En la tabla V-11, se muestra la fuerza cortante de piso, observándose que el mayor valor se produce en el primer piso que coincide con el corte basal. Asimismo, para el perfil de suelo S2 se obtienen mayores valores de fuerza cortante de piso.

Tabla V-11: Fuerza cortante de piso V(tonf)

Diag	Perfil de Suelo			
PISO	S1	S2	<b>S</b> 3	
2	271.89	269.70	226.35	
1	516.01	527.85	457.24	

#### d) Aceleración máxima de piso (m/s2)

En la tabla V-12, se muestran los resultados de los valores de aceleración máxima de piso, donde se puede apreciar que los valores máximos se obtienen en el perfil de suelo Rígido S1.

Diag	Perfil de Suelo		
FISO	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	20.37	20.24	17.09
1	15.90	16.66	13.29
0	6.26	6.26	5.30

Tabla V-12: Aceleración máxima de piso a(m/s<sup>2</sup>)

### V.4.2 Respuesta de la estructura ante un sismo moderado

# a) Desplazamiento máximo de piso

En la tabla V-13, se resumen los desplazamientos laterales máximos en la dirección de análisis longitudinal X para los tres perfiles de suelo considerados, observándose que para el perfil de suelo blando S3, se obtienen los máximos desplazamientos.

Tabla V-13: Desplazamiento máximo de piso u(m)

Piso	Perfil de Suelo		
	S1	S2	<b>S</b> 3
2	0.024	0.025	0.028
1	0.014	0.015	0.019

## b) Deriva máxima de Entrepiso

En la tabla V-14, se muestran los resultados de los valores de deriva de entrepiso, donde se puede apreciar que el perfil de suelo S3, no cumple con los valores límites estipulados en la norma E030.

## Tabla V-14: Deriva de entrepiso

Piso	Perfil de Suelo		
	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	0.0034	0.0034	0.003
1	0.0033	0.0035	0.004

# c) Fuerza Cortante de cada piso V(tonf)

En la tabla V-15, se muestra la fuerza cortante de piso, observándose que el mayor valor se produce en el primer piso, el cual coincide con el corte basal. Asimismo, para el perfil de suelo S1 se obtienen mayores valores de fuerza cortante de piso.

Tabla V-15: Fuerza cortante de casa piso V(tonf)

Piso	Perfil de Suelo		
	S1	S2	<b>S</b> 3
2	161.2164	157.2938	121.88
1	305.8198	302.3341	246.1972

#### d) Aceleración máxima de piso (m/s2)

En la tabla V-16, se muestran los resultados de los valores de aceleración máxima de piso, donde se puede apreciar que los valores máximos se obtienen en el perfil de suelo Rígido S1.

Tabla V-16: Aceleración máxima de piso a(m/s<sup>2</sup>)

Piso	Perfil de Suelo		
	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	12.06	11.77	9.16
1	7.36	7.30	6.20
Base	3.71	3.62	2.85
#### VI. MODELO BIDIMENSIONAL DE ELEMENTOS FINITOS

En este capítulo se describe el procedimiento de análisis bidimensional, considerando el suelo y la estructura en forma conjunta, mediante el método de elementos finitos utilizando el programa PLAXIS 2D-2015. Se incorpora en el modelo, el comportamiento no lineal del suelo, toman en cuenta la degradación de la rigidez e incremento del amortiguamiento del mismo. Por otro lado, se considera a la estructura con un comportamiento elástico lineal ante una carga sísmica.

Y a fin de realizar el análisis dinámico, se utilizaron los registros sísmicos detallados en la sección III-2, los cuales fueron escalados a fin considerar dos intensidades de demanda sísmica, el primero con una demanda intensa según lo estipulado en la norma E30, que considera los factores de zona, suelo e importancia de la edificación para calcular el PGA; y el segundo que considera una demanda sísmica moderada con un valor de PGA=0.4g, para los tres perfiles de suelo considerados en el análisis.

#### VI.1 Introducción al programa PLAXIS 2D

El programa PLAXIS ha sido creado en la universidad técnica de Delf (Holanda) en el año 1987, el cual está basado en el método de los elementos finitos para el análisis de deformación y estabilidad, lo que permite abordar una amplia gama de problemas geotécnicos.

En este capítulo se presenta la teoría especifica del módulo dinámico de PLAXIS, el modelo constitutivo empleado para la modelación geotécnica, los elementos estructurales y el interfaz suelo estructura.

El modelo considera elementos finitos bidimensionales de deformaciones planas, por lo cual los desplazamientos y deformaciones en la dirección z se consideran nulos, sin embargo, se tienen en cuenta completamente los esfuerzos en la dirección z. (Plaxis 2D, 2016).

Para la modelación del suelo se utilizó el elemento triangular de 15 nodos, que proporciona una interpolación de cuarto orden para los desplazamientos y la integración numérica que implica 12 puntos de Gauss o puntos de evaluación de tensiones.



Figura VI-1: Nodos y puntos de tensión, elemento triangular de 15 nodos

En cuanto a las dimensiones del dominio Amorisi et.al (2007) recomienda considerar un extendido del ancho de ocho veces la altura, a fin de disminuir los efectos de borde y obtener mejores resultados (Visone, 2007). De acuerdo a esta recomendación, el modelo desarrollado de elementos finitos está constituido por un dominio rectangular de 240 m de ancho y 30 m de alto, tal como se puede apreciar en la figura VI-2. De esta manera se tiene un dominio del suelo extenso para colocar la estructura lo suficientemente lejos de los límites laterales, con la finalidad que los bordes no afecten en la respuesta.



Figura VI-2: Geometría del dominio del suelo y malla de los elementos finitos

### VI.2 Discretización de Elementos finitos

La generación de la malla de los elementos finitos es automático y basado en un procedimiento de triangulación, donde la dimensión máxima de los elementos triangulares necesita ser controlada por la longitud de onda de corte.

Kuhlmeyer & Lysmer (1973) sugieren asumir un tamaño menor o igual a un octavo de la longitud de onda, asociado a la máxima frecuencia con un contenido de energía significativo para el registro de análisis:

 $TamañoMedio \le \frac{\lambda}{8} = \frac{V_{s,\min}}{8f_{\max}} \quad (6.1)$ 

De acuerdo al espectro de potencia de Fourier de los registros sísmicos calculados en la sección III.2.2, se puede observar una máxima frecuencia con un contenido de energía para los registros es  $f_{max} = 10Hz$ .

Al aplicar la ecuación 6.1, se calcula el tamaño medio de los elementos finitos para los tres perfiles de suelo, valores que se muestran en la tabla VI-1.

Perfil de Suelo	$V_s(m/s)$	$f_{\rm max}(Hz)$	Tamaño medio (m)
<b>S</b> 1	600	10	7.5
<b>S</b> 2	300	10	3.75
<b>S</b> 3	150	10	1.88

Tabla VI-1: Tamaño medio de los elementos finitos

#### VI.3 Módulo Dinámico del Programa PLAXIS 2D

El módulo de análisis dinámico del programa PLAXIS puede ser considerado el instrumento disponible más completo para la predicción de la respuesta sísmica de un sistema geotécnico, ya que puede dar una detallada respuesta tanto de la distribución de la tensión del suelo y la deformación. Sin embargo, este requiere un modelo constitutivo del suelo adecuado, una adecuada caracterización del suelo, y una definición adecuada de la entrada sísmica (Visone, 2007).

PLAXIS ofrece la posibilidad de resolver la ecuación básica del movimiento 6.2 que depende del tiempo, bajo la influencia de una carga dinámica:

$$M\ddot{u} + C\dot{u} + Ku = f(t) \tag{6.2}$$

Donde M es la matriz de masa, u es el vector de desplazamiento, C es la matriz de amortiguamiento, K es la matriz de rigidez de la relación tensión deformación del suelo y F el vector de carga.

PLAXIS utiliza el esquema numérico implícito de Newmark, donde el desplazamiento y la velocidad de un punto en el instante t+ $\Delta t$  se expresan respectivamente mediante la expresión 6.3 y 6.4:

$$u^{t+\Delta t} = u^{t} + \dot{u}^{t}\Delta t + \left[\left(\frac{1}{2} - \alpha\right)\dot{u}^{t} + \alpha\ddot{u}^{t+\Delta t}\right]\Delta t^{2} \quad (6.3)$$
$$\dot{u}^{t+\Delta t} = u^{t} + \left[\left(1 - \beta\right)\dot{u}^{t} + \beta\ddot{u}^{t+\Delta t}\right]\Delta t \quad (6.4)$$

En la ecuación  $\Delta t$  es el paso del tiempo, los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  determinan la precisión de la integración numérica en el tiempo. PLAXIS utiliza por defecto  $\alpha$ =0.3025 y  $\beta$ =0.6.

#### VI.4 Condiciones de Borde

A fin de representar un modelo bidimensional de extensión infinita, existe la necesidad de reducir el dominio a una extensión finita, para no tener un costo computacional muy alto, y reducir los efectos de reflexión de las ondas sísmicas en los bordes del modelo, de manera que no influyan significativamente en la respuesta.

En PLAXIS se pueden generar bordes absorbentes, el cual está orientado a absorber los incrementos de tensiones en los límites causados por la carga dinámica que de otra manera se reflejaría en el interior del cuerpo del suelo (Plaxis 2D, 2016). Estos bordes absorbentes corresponden a amortiguadores viscosos que provee una fuerza proporcional a la velocidad de los nodos involucrados.

Lysmer y Kuhlemeyer (1969) plantearon que las tensiones normales y de corte absorbidas por un amortiguador en las direcciones perpendicular y paralela a los bordes del dominio son, respectivamente:

$$\sigma_n = -C_1 \rho V_p \dot{u}_x \qquad (6.5)$$
  
$$\tau = -C_2 \rho V_s \dot{u}_y \qquad (6.6)$$

En la ecuación (6.5) y (6.6),  $\rho$  corresponde a la densidad del material, Vp yVs son la velocidad de propagación de ondas de compresión y de corte respectivamente.

C1 y C2 son los coeficientes de relajación que tienen como objetivo mejorar el efecto de absorción. No existe un criterio general acerca de los valores que deben tomar C1 y C2. Se recomienda emplear C1=1 y C2=0.25 en la presencia de ondas de corte.

Es preciso mencionar que la utilización de los bordes absorbentes no garantiza una completa absorción de ondas incidentes sobre el dominio, motivo por el cual se decidió complementar con dos columnas de suelo de un ancho de 20m con comportamiento lineal situadas en ambos extremos del modelo, tomando en cuenta la recomendación de McGann en su artículo "Dynamic 2D Effective Stress Analysis of Slope", dichas columnas de suelo añadidas al modelo se pueden observar en la figura VI-2.

#### VI.5 Definición de la carga sísmica

La señal de entrada se modela mediante la imposición de un desplazamiento prescrito en el límite inferior del modelo.

Para lo cual se consideraron los registros descritos en el capítulo III.2 que fueron medidos en superficie sobre roca (*outcropping*), por lo que es necesario realizar una deconvolución, a fin de obtener el registro en el límite inferior (*bedrock*).



Figura VI-3: Respuesta sísmica del suelo sobre roca (Kramer, 1996)

De esta manera se analizó la propagación de ondas sísmicas en los tres perfiles de suelo considerados. Cabe indicar que los análisis se realizaron utilizando dos intensidades de demanda sísmica, para considerar la respuesta ante una carga sísmica intensa y moderada.



Figura VI-4: Descripción de los puntos en la superficie (A) y en el límite inferior

(B)

### VI.5.1 Solicitación Sísmica de acuerdo a la Norma E030

A fin de obtener un registro sísmico que sea consistente con el espectro de diseño de la norma E030, que considera un valor de PGA de acuerdo a factores de zona, suelo e importancia de la edificación, se tuvo que escalar los registros de manera que el espectro de respuesta medido en la superficie (Punto A) tenga un valor de PGA consistente a la norma de diseño.

A continuación, se muestran en la figura VI-5 los espectros de respuesta de los registros sísmicos considerados, los cuales fueron medidos en la superficie, luego de escalarlos a valores de PGA mostrados en la tabla VI-2.

Tabla VI-2: Valores de PGA según la Norma E030

Perfil de Suelo	PGA(g)
Suelo Rígido S1	0.68
Suelo Intermedio S2	0.70
Suelo Blando S3	0.74





Figura VI-5: Espectro de respuesta de los registros escalados en los perfiles de suelo: (a) Suelo Rígido S1, (b) Suelo Intermedio S2 y (c) Suelo blando S3

# VI.5.2 Solicitación sísmica para representar un sismo moderado

Se elige un valor de PGA=0.4g para representar un sismo de intensidad moderada, el cual representa un nivel de aceleración con alta probabilidad de ocurrencia durante la vida útil del edificio. Por ello, se escalaron los registros sísmicos descritos en la sección III-2, de manera tal que sus espectros de respuesta en superficie tengan un valor de PGA=0.4g.

A continuación, se muestra en la figura VI-6, los espectros de respuesta de los registros sísmicos escalados.

Espectro de respesta escalada a 0.4g -S1 3 Espectro de diseño 2.5 Central Rapel Santa Lucía El Roble 2 Psa(g) (a) 1.5 1 0.5 0 1.5 **T(s)** 0.5 0 1 2 2.5 3 Espectro de respesta escalada a 0.4g -S2 3 Espectro de diseño 2.5 **Central Rapel** Santa Lucía El Roble 2 (b) Psa(g) 1.5 0.5 0 0.5 2 1.5 2.5 3 1 T(s) Espectro de respesta escalada a 0.4g -S3 3 Espectro de diseño 2.5 Central Rapel Santa Lucía El Roble 2 Psa(g) (c) 1.5 0.5 0 1.5 **T(s)** 0.5 1 2 2.5 0 3



Suelo Rígido S1, (b) Suelo Intermedio S2 y (c) Suelo blando S3

### VI.6 Amortiguamiento de Rayleigh

El modelo constitutivo HS Small descrito en la sección VII-7, no refleja adecuadamente el comportamiento no lineal del suelo ya que, para bajas deformaciones, el amortiguamiento es muy pequeño o casi nulo, razón por la cual (Brinkgreve R., 2007) recomienda combinar HS Small con amortiguamiento de Rayleigh para considerar amortiguamiento para bajas deformaciones del suelo.

El amortiguamiento de Rayleigh es una característica numérica en la cual, la matriz de amortiguamiento C, está compuesta por la adición de una porción de la matriz de masa M de la y una porción de la matriz de rigidez K:

 $\begin{bmatrix} C \end{bmatrix} = \alpha \begin{bmatrix} M \end{bmatrix} + \beta \begin{bmatrix} K \end{bmatrix} \quad (6.7)$ 

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son coeficientes de Raileigh

Para calibrar estos coeficientes es necesario definir los amortiguamientos objetivos y las frecuencias relacionadas. Hudson, Idriss & Beirkae (1994) proponen seleccionar la primera frecuencia igual a la frecuencia fundamental del suelo dada por la expresión (6.8) y la segunda frecuencia de destino, es el número impar más cercano a la relación  $f_p/f_1$ , donde  $f_p$  es la frecuencia predominante de la señal de entrada (determinada mediante el espectro de Fourier).

$$f_1 = \frac{V_s}{4H} \qquad (6.8)$$

Donde Vs representa la velocidad de onda de corte del suelo y H es la altura del estrato del suelo.

Los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  del amortiguamiento de Rayleigh se calculan mediante la expresión (6.9)

$$\alpha = 2\omega_1\omega_2 \frac{\omega_1\xi_2 - \omega_2\xi_1}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad \text{y} \quad \beta = 2\frac{\omega_1\xi_1 - \omega_2\xi_2}{\omega_1^2 - \omega_2^2} \quad (6.9)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia angular en rad/s

En la tabla VI-3, se detalla el cálculo de los coeficientes del amortiguamiento de Rayleigh, considerando los registros sísmicos de entrada seleccionadas.

Tabla VI-3: Coeficientes de amortiguamiento de Rayleigh

Central	Rapel							
Suelo	$V_s(m/s)$	$f_1(Hz)$	$f_p(Hz)$	$f_2(Hz)$	$\omega_1(rad / s)$	$\omega_2(rad/s)$	α	β
<b>S</b> 1	150	1.25	2.24	3	7.854	18.85	0.2218	0.001
<b>S</b> 2	300	2.5	2.24	1	15.70	6.283	0.1795	0.002
<b>S</b> 3	600	5	2.24	1	31.41	6.283	0.2094	0.001
El Robl	e							
Suelo	$V_s(m/s)$	$f_1(Hz)$	$f_p(Hz)$	$f_2(Hz)$	$\omega_1(rad / s)$	$\omega_2(rad/s)$	α	$\beta$
<b>S</b> 1	150	1.25	1.70	3	7.854	18.85	0.2218	0.001
<b>S</b> 2	300	2.5	1.70	1	15.70	6.283	0.1795	0.002
<b>S</b> 3	600	5	1.70	1	31.41	6.283	0.2094	0.001
Santa L	ucía							
Suelo	$V_s(m/s)$	$f_1(Hz)$	$f_p(Hz)$	$f_2(Hz)$	$\omega_1(rad / s)$	$\omega_2(rad/s)$	α	$\beta$
<b>S</b> 1	150	1.25	1.59	3	5.89	18.85	0.2218	0.001
<b>S</b> 2	300	2.5	1.59	1	15.70	6.28	0.1795	0.002
<b>S</b> 3	600	5	1.59	1	31.41	6.28	0.2094	0.001

#### VI.7 Modelo Constitutivo de los Materiales

Los suelos tienen tendencia a comportarse de una forma fuertemente no lineal bajo los efectos de una carga. El programa PLAXIS 2D dispone de varios modelos constitutivos para simular el comportamiento del suelo y de otros medios continuos.

Para el análisis del suelo del presente trabajo se utilizó el modelo constitutivo elástico lineal y *Hardening soil model with small-strain stiffness* (HS Small), que es una variante del modelo *Hardening Soil model*, los cuales se describen a continuación.

#### VI.7.1 Modelo Elástico Lineal

Este modelo representa la ley de Hooke de elasticidad lineal isótropa. El modelo incluye dos parámetros de rigidez elástica a saber: el módulo de Young E y el coeficiente de Poisson v. (Plaxis 2D, 2016).

Desde un punto de vista práctico, conviene medir las velocidades de propagación de onda del suelo Vs y Vp, y a partir de ello se calcula el módulo de corte y de elasticidad del suelo mediante las siguientes expresiones 6.10 y 6.11:

$$V_{s} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad \text{donde} \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{y} \quad \rho = \frac{\gamma_{unsat}}{g} \quad (6.10)$$
$$V_{p} = \sqrt{\frac{E_{oed}}{\rho}} \quad \text{donde} \quad E_{oed} = \frac{(1+\nu)E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad \text{y} \quad \rho = \frac{\gamma_{unsat}}{g} \quad (6.11)$$

En donde  $\gamma_{unsat}$  es el peso unitario seco y "g" es la aceleración de la gravedad.

#### VI.7.2 El Modelo de Suelo con Endurecimiento (Hardening Soil model)

En el caso triaxial drenado, se ha observado una relación entre la deformación axial y el esfuerzo desviador, que puede aproximarse con bastante precisión mediante una hipérbola. Esta relación fue formulada por Koedner (1963) y usada posteriormente en el modelo hiperbólico (Duncan y Chang,1970). A este modelo hiperbólico, el modelo Hardening Soil le suma la idea de plasticidad, la inclusión de dilatancia del suelo e introduce una superficie "yield cap". Además, el modelo Hardening Soil considera la rigidez dependiente del confinamiento que puede expresarse de acuerdo a la ecuación (6.12):

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{\sigma}{p^{ref}}\right)^m \quad (6.12)$$

Donde m, es un parámetro de efecto de confinamiento de la rigidez (m=0.5 en materiales granulares),  $\sigma$  es la tensión asociada a la dirección vertical y p<sup>ref</sup> es la presión de referencia.

En el caso de suelos muy blandos, el valor de *m* tiende a 1 (m=1), por lo que la ecuación queda de la siguiente forma:

$$E_{oed}^{ref} = \frac{p^{ref}}{\lambda^*} \qquad \lambda^* = \frac{\lambda}{\left(1 + e_o\right)} \quad (6.13)$$

$$E_{ur}^{ref} \approx \frac{2p^{ref}}{\kappa^*} \qquad \kappa^* = \frac{\kappa}{\left(1 + e_o\right)} \tag{6.14}$$

Los valores de  $\lambda y \kappa$ , se refieren a valores de un ensayo de consolidación isotrópica de carga y descarga respectivamente.

**Modelo Hiperbólico,** la formulación del modelo *Hardening Soil* se basa en la relación hiperbólica entre la deformación vertical y el esfuerzo desviador q, que se muestra en la figura VI-7. Los ensayos triaxial drenados estándar tienden a dar curvas que pueden ser descritos por medio de la siguiente expresión:

$$-\varepsilon_{\rm l} = \frac{1}{E_i} \frac{q}{1 - q/q_a} \qquad \text{para } q < q_{\rm f} \quad (6.15)$$

Donde qa es el valor asintótico de la resistencia de corte y Ei el módulo elástico inicial,

 $\varepsilon_i$  deformación axial y el desviador de tensiones  $q = |\sigma_1 - \sigma_3|$ .



Figura VI-7: Relación hiperbólica de esfuerzo-deformación en un ensayo triaxial

drenado (Plaxis 2D, 2016).

La relación entre E<sub>50</sub> y Ei, viene dada por la ecuación:

$$E_i = \frac{2E_{50}}{2 - R_f} \quad (6.16)$$

En donde  $R_f = q_f / q_a$ , es el parámetro que relaciona la resistencia máxima con la asintótica del suelo. PLAXIS por defecto utiliza  $R_f = 0.9$ 

Se utiliza el módulo  $E_{50}$  el cual se obtiene para un valor de la tensión correspondiente al 50% del valor de la deformación de rotura de acuerdo a la siguiente ecuación 6.17:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left( \frac{c \cos \phi - \sigma'_{3} \operatorname{sen} \phi}{c \cos \phi + p^{ref} \operatorname{sen} \phi} \right)^{m} \quad (6.17)$$

Donde  $E_{50}^{ref}$  es el módulo secante correspondiente al esfuerzo de confinamiento de referencia  $p^{ref}$ . PLAXIS por defecto toma un valor igual a 100 kPa.

El esfuerzo desviador último  $q_f y q_a$  son definidos mediante la expresión (6.18):

$$q_f = \left(c \cot \phi - \sigma_3\right) \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad \text{y } q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad (6.18)$$

Donde  $q_f$  es derivada del criterio de falla de Mohr Coulomb, que involucra parámetros de resistencia c y  $\phi$ ,

Y el módulo de elasticidad, para condiciones de carga y descarga se relaciona mediante la siguiente expresión (6.19):

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left( \frac{c \cot \phi - \sigma'_3}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (6.19)$$

Para algunos casos prácticos PLAXIS sugiere utilizar la relación (6.20):

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$$
 (6.20)

Además, el Módulo Edométrico tangente  $E_{oed}$ , según la ecuación (6.21):

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left( \frac{c \cot \phi - \sigma'_1}{c \cot \phi + p^{ref}} \right)^m \quad (6.21)$$

#### VI.7.3 Hardening Soil Model With Small-Strain Stiffness (HS small)

Es una modificación del modelo de suelo con endurecimiento (*Hardening soil*), a fin de considerar en el análisis sísmico la degradación de rigidez del suelo con el incremento de las deformaciones angulares, además incorpora el amortiguamiento por histéresis.

HS Small agrega dos parámetros adicionales, el Módulo de Corte tangente inicial  $G_o^{ref}$  y la deformación angular  $\gamma_{0.7}$ , que representa la distorsión angular para 70 % del módulo secante inicial.

Entonces con esta modificación la rigidez a pequeñas deformaciones, se puede expresar de acuerdo al modelo dinámico de Hardin-Drnevich (1972) mediante la siguiente expresión (6.22):

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1 + \left|\frac{\gamma}{\gamma_r}\right|} \quad (6.22)$$

Donde la deformación angular está dada por la relación (6.23):

$$\gamma_r = \frac{\tau_{\max}}{G_o} \quad (6.23)$$

Donde  $\tau_{max}$  es la tensión de corte en rotura.

En el programa PLAXIS, la expresión (6.22) se modifica de acuerdo a lo propuesto por Santos & Correa (2001), que sugieren usar el valor de degradación para el 70 % del módulo de corte  $\gamma_{0.7}$  mediante la expresión (6.24):

$$\frac{G_s}{G_0} = \frac{1}{1+a\left|\frac{\gamma}{\gamma_{0.7}}\right|} \quad (6.24)$$

Dónde: a=0.385 es un coeficiente de forma y  $\gamma_{0.7}$  es la distorsión para G=0.7G<sub>0</sub>.



Figura VI-8: Comportamiento histerético del suelo en el modelo HS Small (Laera, 2015).

### VI.8 Características y Parámetros geotécnicos de los suelos considerados

A continuación, se describen los parámetros geotécnicos utilizados para los diferentes perfiles de suelo considerados, a fin de representar de la mejor manera su comportamiento no lineal frente a una carga sísmica en el programa PLAXIS 2D.

A partir de lo descrito en la sección II (características del suelo de fundación), donde se clasifica los perfiles de suelo en función a la velocidad de propagación de onda de corte.

Además, se estimaron los distintos parámetros necesarios para el modelo constitutivo del suelo HS Small, mediante correlaciones dadas por Jeffries & Been (2006) para arenas, a partir de la densidad relativa (Brinkgreve, E. Engin, & H.K. Engin). Cabe mencionar que los parámetros calculados corresponden a una estimación aproximada a fin de caracterizar los perfiles de suelo seleccionados.

#### VI.8.1 Perfil de Suelo S1: Suelo Rígido

A partir de la descripción del perfil de suelo rígido S1, desarrollado en la sección II.2.1 y caracterizado con una velocidad de propagación de onda de corte Vs=600 m/s, se obtiene los parámetros necesarios para utilizar el modelo constitutivo HS Small. Donde el módulo de corte tangente inicial  $G_o^{ref}$  se calcula a partir de la velocidad de onda de corte y la deformación angular  $\gamma_{0.7}$  se estima a partir de las relaciones experimentales entre el módulo de corte y deformación angular para suelos de tipo grava. Conforme se muestra en la figura VI-9, que fue publicada en el artículo "*Shear Modulus y Damping Relationships for gravels*" del ASCE.



Figura VI-9: Curva de degradación de rigidez para gravas (ASCE)

En la tabla VI-4, se muestra las propiedades del suelo rígido S1 requeridas para el modelo HS Small.

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Peso unitario no saturado	$\gamma_{unsat}$	20	KN/m <sup>3</sup>
Peso unitario saturado	$\gamma_{sat}$	20	KN/m <sup>3</sup>
Rigidez para pequeñas deformaciones	$G_{o}^{ref}$	7.34E+05	KN/m <sup>3</sup>
Deformación en el 0.7Go	$\gamma_{0.7}$	2.0E-04	
Módulo de Poisson	$V_{ur}$	0.2	
Módulo elástico secante al 50% de la tensión máxima	$E_{50}^{\it ref}$	6.0E+04	KN/m <sup>3</sup>
Módulo edométrico	$E_{oed}^{\it ref}$	6.0E+04	KN/m <sup>3</sup>
Módulo elástico a la descarga	$E_{ur}^{ref}$	1.8E+05	KN/m <sup>3</sup>
Presión de referencia	$p^{ref}$	100	KN/m <sup>3</sup>
Dependencia del módulo de elasticidad-nivel de esfuerzo	т	0.5	
Cohesión	<i>c</i> '	0	KN/m <sup>3</sup>
Ángulo de fricción	$\phi$ '	44	
Ángulo de dilatancia	$\psi$	5	
Relación de falla	$R_{f}$	0.9	
Relación de vacios	e	0.40	

Tabla VI-4: Parámetros para el perfil de suelo S1

### VI.8.2 Perfil de Suelo S2: Suelo Intermedio

A partir de la descripción del perfil de suelo intermedio S2, desarrollado en la sección II.2.2 y caracterizado con una velocidad de propagación de onda de corte Vs=300 m/s, se obtiene los parámetros necesarios para utilizar el modelo constitutivo HS Small. Donde el módulo de corte tangente inicial  $G_o^{ref}$  se calcula a partir de la velocidad de onda de corte y la deformación angular  $\gamma_{0.7}$  se estima a partir de las relaciones

experimentales entre el módulo de corte y deformación angular para arena, publicada por Seed & Idriss (1970). Conforme se muestra en la figura VI-10.



Figura VI-10: Variación del módulo de corte por deformación de corte para arena

(H. Bolton Seed y I. M. Idriss, 1970).

En la tabla VI-5 se muestran las propiedades del suelo intermedio S2 requeridas para el modelo HS Small.

Tabla VI-5: Parámetros para el perfil de suelo S2

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Peso unitario no saturado	$\gamma_{unsat}$	18	KN/m <sup>3</sup>
Peso unitario saturado	$\gamma_{sat}$	18	KN/m <sup>3</sup>
Rigidez para pequeñas deformaciones	$G_{o}^{ref}$	1.65E+05	KN/m <sup>3</sup>
Deformación en el 0.7Go	$\gamma_{0.7}$	1.4E-04	
Módulo de Poisson	V <sub>ur</sub>	0.2	
Módulo elástico secante al 50% de la tensión máxima	$E_{50}^{ m ref}$	3.3E+04	KN/m <sup>3</sup>
Módulo edométrico	$E_{oed}^{\it ref}$	3.3E+04	KN/m <sup>3</sup>
Módulo elástico a la descarga	$E_{ur}^{ref}$	9.9E+04	KN/m <sup>3</sup>

Presión de referencia	$p^{ref}$	100	KN/m <sup>3</sup>
Dependencia del módulo de elasticidad-nivel de esfuerzo	m	0.52	
Cohesión	с	0	KN/m <sup>3</sup>
Ángulo de fricción	$\phi$	35	
Ángulo de dilatancia	$\psi$	2	
Relación de falla	$R_{f}$	0.9	
	v		

### VI.8.3 Perfil de suelo S3: Suelo blando

A partir de la descripción del perfil de suelo blando S3, desarrollado en la sección II.2.3 y caracterizado con una velocidad de propagación de onda de corte Vs=150 m/s, se obtiene los parámetros necesarios para utilizar el modelo constitutivo HS Small. Donde el módulo de corte tangente inicial  $G_o^{ref}$  se calcula a partir de la velocidad de onda de corte y la deformación angular  $\gamma_{0.7}$  se estima a partir de las relaciones experimentales entre el módulo de corte y deformación angular para arena, publicada por Seed & Idriss (1970). Conforme se muestra en la figura VI-10.

En la tabla VI-6 se muestran las propiedades del suelo blando S3 requeridas para el modelo HS Small.

Tabla VI-6: Parámetros para el perfil de suelo S3

Parámetros	Símbolo	Valor	Unidad
Peso unitario no saturado	$\gamma_{unsat}$	17	KN/m <sup>3</sup>
Peso unitario saturado	$\gamma_{sat}$	17	KN/m <sup>3</sup>
Rigidez para pequeñas deformaciones	$G_{o}^{ref}$	3.7E+04	KN/m <sup>3</sup>
Deformación en el 0.7Go	$\gamma_{0.7}$	1E-04	
Módulo de Poisson	$V_{ur}$	0.25	

Módulo elástico secante al 50% de la tensión máxima	$E_{50}^{ref}$	2.0E+04	KN/m <sup>3</sup>
Módulo edométrico	$E_{oed}^{ref}$	1.6E+04	KN/m <sup>3</sup>
Módulo elástico a la descarga	$E_{ur}^{ref}$	6.0E+04	KN/m <sup>3</sup>
Presión de referencia	$p^{ref}$	100	KN/m <sup>3</sup>
Dependencia del módulo de elasticidad-nivel de esfuerzo	m	0.59	
Cohesión	С	0	KN/m <sup>3</sup>
Ángulo de fricción	$\phi$	30	
Ángulo de dilatancia	$\psi$	0	
Relación de falla	$R_{f}$	0.9	

### VI.9 Modelo de la Estructura en el Programa PLAXIS 2D

Para el análisis bidimensional de la estructura se realiza el análisis del edificio en la dirección longitudinal X, el cual corresponde a un sistema estructural de pórticos de hormigón armado.

Los elementos estructurales de la edificación (columnas y vigas) del pórtico resistente en la dirección longitudinal, son modeladas mediante elementos placa (*plate*), definidos con un comportamiento elástico lineal, para lo cual es necesario especificar las propiedades de rigidez axial (EA) y rigidez a la flexión (EI). Los valores de EA y de EI, se refieren a una rigidez por unidad de ancho, en dirección perpendicular al plano.

A partir de estos dos parámetros EA y EI, se calcula un espesor de placa equivalente  $d_{eq}$  con la fórmula 6.25:

$$d_{eq} = \sqrt{12\frac{EI}{EA}} \quad (6.25)$$

Las placas del modelo de elementos finitos en 2D están constituidas por elementos viga (elementos unidimensionales) con tres grados de libertad por nodo (dos grados de libertad de traslación "ux,uy" y un grado de libertad de rotación en el plano x-y: $\varphi$ z). Asimismo, los elementos placa poseen: fuerza axial, fuerza de corte y momento flector. Y con la finalidad de tener un modelo bidimensional de la estructura, se considera el pórtico resistente ubicado en el Eje 1-1 y eje 2-2 del edificio en la dirección longitudinal, donde se calcula la masa actuante a través del peso por área tributaria a cada pórtico resistente.

Cabe mencionar, que inicialmente se realiza un análisis bidimensional en el programa ETABS, a fin de verificar que las características dinámicas de la estructura sean consistentes con el modelo tridimensional de la estructura en la dirección de análisis, cumplido ello, se procedió a implementar al modelo estructural en el programa PLAXIS 2D, considerando el amortiguamiento de tipo Rayleigh, cuyos coeficientes son calculados a partir de los periodos asociados a los dos primeros modos de vibración, con razón de amortiguamiento  $\xi$ =0.05.

En la figura VI-11, se detalla los elementos estructurales del pórtico resistente en la dirección longitudinal desarrollado en el programa ETABS, y en la Figura VI-12, se muestra las cargas actuantes para el cálculo de la masa.



Figura VI-11: Pórtico resistente en la dirección longitudinal



Figura VI-12: Cargas actuantes P (tonf) en el pórtico en la dirección longitudinal

En la tabla VI-7 se muestra los periodos asociados a cada modo de vibración del análisis bidimensional de la estructura, que coincide con el periodo en la dirección longitudinal calculado mediante el análisis tridimensional de la estructura descrito en la sección IV.

Modo	T(s)
1	0.29
2	0.07
3	0.05
4	0.04
5	0.03
6	0.02

Tabla VI-7: Periodos asociado a cada modo de vibración

En la tabla VI-8 se muestra las propiedades de los elementos estructurales: rigidez axial (EA), rigidez a la flexión (EI), indicados por unidad de ancho, en dirección perpendicular al plano.

Elemento	Descripción	А	EA	Ι	EI	
estructural	Descripcion	$(m^2)$	(kN)	(m <sup>4</sup> )	(kN-m2)	
Columna	CL70x70	0 2875	6 16E6	0.0111	240 3E3	
exterior	CLIONIO	0.2075	0.1020	0.0111	210.313	
Columna	CT80x50	0.2625	5.63E6	0.0109	253.9E3	
intermedia	Crooneo	0.2020	0.00110	0.0109	2000/20	
Viga	V25x40	0.1	2.14E6	0.0013	28.60E3	
Zapata	71	0.72	1 5F7	0.022	4 6F5	
(suelo S1)		0.72	1.517	0.022	4.025	
Zapata	71	12	25 75E6	0.036	7 72F5	
(suelo S2)	21	1.2	23.73L0	0.050	1.12L3	
Zapata	71	18	3867	0.054	1 1E6	
(suelo S3)	21	1.0	5.017	0.054	1.120	
Viga de	VC	0.125	2 6E6	0.003	5 58E1	
Cimentación	٧C	0.123	2.010	0.005	5.5614	

Tabla VI-8: Propiedades de los elementos estructurales

Finalmente se tiene el modelo de la estructura y el suelo en forma conjunta en el programa PLAXIS 2D, tal como se puede observar en la figura VI-13, y esta sometido a una excitación en el límite inferior del modelo.

Asimismo en la figura VI-14 se puede observar la malla de elementos finitos en el suelo, caracterizandose por ser mas pequeña en el área cercana a la estructura. Y tambien se puede observar los elementos de interfaz entre la zapata y el suelo.



Figura VI-13: Modelo de la estructura y el suelo en forma conjunta



Figura VI-14: Modelación de la interacción dinámica suelo estructura del edificio

#### VI.10 Propiedades de la interfaz Suelo - Estructura

Se utiliza un modelo elástico-plástico para describir el comportamiento de la interfaz dentro del contexto de la modelización de la interacción suelo-estructura. El criterio de Coulomb es utilizado para distinguir entre el comportamiento elástico, en el que pueden producirse pequeños desplazamientos dentro de la interfaz, y el comportamiento plástico de la misma, que puede dar lugar a un deslizamiento permanente (Plaxis 2D, 2016).

Las propiedades resistentes del interfaz están relacionadas con las propiedades resistentes de una capa de suelo. Cada conjunto de datos tiene un factor de reducción de la resistencia asociado a la interfaz (Rinter). Las propiedades de la interfaz se calculan a partir de las propiedades del suelo en el conjunto de datos asociados y del factor de reducción de la resistencia aplicando las reglas siguientes (Plaxis 2D, 2016):

 $c_i = R_{inter} c_{suelo}$  $\tan \phi_i = R_{inter} \tan \phi_{suelo}$ 

Para el modelo de la estructura y el suelo se utilizó un valor de Rinter = 0.8, a fin de representar la interacción entre suelo y el hormigón armado.

### VI.11 Resultados del análisis Bidimensional mediante Elementos Finitos

A continuación, se muestran los resultados de los análisis realizados para los distintos modelos desarrollados en los tres perfiles de suelo seleccionado, mediante el programa PLAXIS 2D, considerando además la solicitación de dos tipos de demanda sísmica intensa y moderada, para los cuales se escalaron los registros sísmicos.

#### VI.11.1 Respuesta dinámica ante una demanda sísmica intensa

A continuación, se muestran los resultados del análisis desarrollado en el programa PLAXIS 2D, considerando una demanda sísmica acorde a la Norma E030.

En la tabla VI-9, se muestra la respuesta de los desplazamientos de piso máximo, para los tres registros sísmicos utilizados, considerando los tres perfiles de suelo. Se puede observar que, en el registro de Santa Lucía y el Roble, se tienen máximos desplazamientos para el perfil de suelo S1; y para el registro de Rapel, el desplazamiento máximo de la estructura ocurre en el perfil de suelo S3; comportamiento similar se observa en la respuesta de la deriva de piso mostrada en la tabla VI-10.

En la tabla VI-11, se muestra la fuerza cortante de cada piso, donde se observa que la máxima fuerza cortante para los tres registros se presenta en el perfil de suelo S1.

Y en la tabla VI-12, se muestran los resultados de la aceleración máxima para cada piso, donde se observa que las mayores aceleraciones se producen en el perfil de suelo S1.

De lo observado se infiere que el el perfil de suelo S1, existe menor disipación de la energía sísmica por el comportamiento histerético del suelo, por lo que presenta respuestas dinámicas mayores respecto a los perfiles de suelo S2 y S3.

Dico	Santa Lucía				El Roble	e	Central Rapel		
PISO	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	S3	<b>S</b> 1	S2	
2	0.038	0.029	0.027	0.04	0.029	0.039	0.032	0.032	0

0.017 0.024 0.017

0.024 0.019

Tabla VI-9: Desplazamiento de piso u(m)

0.018

0.023

1

<u>S3</u> 0.033

0.025

0.0196

Tabla VI-10: Deriva de entrepiso

Piso	Santa Lucía			El Roble			Central Rapel		
P180	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	0.0051	0.0039	0.0035	0.0052	0.0037	0.0051	0.0043	0.0043	0.0043
1	0.0076	0.0052	0.0051	0.0055	0.0042	0.0052	0.0044	0.0046	0.0047

Tabla VI-11: Fuerza cortante de piso V(tonf)

Piso	Santa Lucía			El Roble			Central Rapel		
	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	255.59	142.02	148.62	275.02	112.18	146.37	204.29	153.91	150.84
1	411.67	305.96	285.73	429.80	260.45	298.65	334.47	309.36	295.73

Tabla VI-12: Aceleración máxima a(m/s2) de piso

Piso	Santa Lucía			El Roble			Central Rapel		
	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	24.12	9.48	10.15	24.4	7.61	9.8	17.75	10.65	9.54
1	19.1	6.94	7.14	15.8	6.50	7.43	9.28	7.40	6.78
0	11.03	5.57	5.90	9.97	5.60	5.79	7.44	5.60	5.93

## VI.11.2 Respuesta dinámica ante una demanda sísmica moderada

Los siguientes resultados son producto del análisis dinámico, que considera una solicitación sísmica para un sismo moderado, para los cual los registros seleccionados se escalaron a un valor de PGA=0.4g.

En la tabla VI-13, se muestra la respuesta de los desplazamientos de piso máximo, para los tres registros sísmicos utilizados, considerando los tres perfiles de suelo, donde no se observa un patrón de comportamiento general en las respuestas de los desplazamientos de piso y se tiene un comportamiento similar en la respuesta de la deriva de piso mostrada en la tabla VI-14.

En la tabla VI-15, se muestra la fuerza cortante de cada piso y en la tabla VI-16, se presentan los resultados de la aceleración máxima para cada piso.

De lo observado se infiere que, para una demanda sísmica moderada, existe menor disipación de energía por el comportamiento histerético del suelo.

Tabla VI-13: Desplazamiento de piso u(m)

Piso	Santa Lucía			El Roble			Central Rapel		
	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	0.019	0.0248	0.031	0.028	0.0249	0.02	0.016	0.025	0.016
1	0.011	0.015	0.019	0.016	0.0151	0.012	0.009	0.0155	0.009

Tabla VI-14: Deriva de entrepiso

Piso	Santa Lucía			El Roble			Central Rapel		
	S1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	0.0026	0.0032	0.004	0.0037	0.0032	0.0025	0.0023	0.0031	0.0021
1	0.0025	0.0035	0.004	0.0039	0.0035	0.0041	0.0016	0.0036	0.0023

Tabla VI-15: Fuerza cortante de piso V(tonf)

Piso	Santa Lucía			El Roble			Central Rapel		
	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3
2	128.89	115.50	148.58	180.71	110.14	83.751	108.22	117.005	77.56
1	208.32	258.31	276.10	308.56	244.96	174.65	180.42	268.289	158.77

	Piso	Santa Lucía			El Roble			Central Rapel		
PISO	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	<b>S</b> 1	S2	<b>S</b> 3	
	2	10.57	7.41	10.23	15.43	8.07	4.35	9	7.84	4.52
	1	6.27	5.43	7.13	9.4	6.4	3.42	5.18	5.83	3.56
	0	3.94	3.56	5.9	4.79	5.64	2.96	3.72	4.6	2.9

Tabla VI-16: Aceleración máxima a(m/s<sup>2</sup>) de piso

### VII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación, se muestra mediante tablas y gráficas comparativas las respuestas máximas del análisis dinámico de la estructura en estudio. Para ello se utilizó el programa ETABS, considerando el modelo con base fija y base flexible de acuerdo a las disposiciones de FEMA 440, además se utilizó un tercer modelo bidimensional que considera el suelo y la estructura en forma conjunta mediante el programa PLAXIS. Dichos análisis se realizaron tomando en cuenta que el edificio esta cimentado en tres perfiles de suelo distintos: suelo rígido, intermedio y blando.

Cabe indicar que los análisis realizados se hicieron utilizando dos intensidades de demanda símica, a fin de considerar la respuesta ante una carga sísmica intensa y moderada.

#### VII.1 Gráficas comparativas para una demanda sísmica intensa

Se presentan gráficos comparativos del análisis realizado a los distintos modelos, considerando una demanda sísmica según lo estipulado en la norma E030, que considera los factores de zona, suelo y la importancia de la edificación. Para el análisis tiempo - historia de la estructura y el suelo en el programa PLAXIS, se escalaron los tres registros sísmicos detallados en la sección III, para tener una demanda sísmica que sea consistente con la Norma.

# VII.1.1 Perfil de suelo S1

Se presentan los resultados de la respuesta dinámica del edificio cimentado en el perfil de Suelo rígido S1.

# a) Desplazamiento máximo de piso

Tabla VII-1: Desplazamiento de piso u(m) en suelo rígido S1

Piso	Base Fija	FEMA 440	Variación	PLAXIS -	Variación
				Promedio	
2	0.042	0.042	0.40%	0.037	-12.47%
1	0.024	0.025	2.13%	0.022	-8.57%



Figura VII-1: Gráfico comparativo de desplazamiento de piso u(m) en suelo

rígido S1

# b) Deriva máxima de entrepiso

Tabla VII-2: Deriva máxima de entrepiso en suelo rígido S1

Piso	Base Fija	FEMA	Variación	PLAXIS -	Variación
	_	440		Promedio	
2	0.0059	0.0058	-1.97%	0.0049	-17.96%
1	0.0056	0.0057	1.95%	0.0051	-8.86%



Figura VII-2: Deriva máximo de entrepiso en suelo rígido S1

# c) Fuerza Cortante máxima en cada piso

Tabla VII-3: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo rígido S1

Piso	Base Fija	FEMA 440	Variación	PLAXIS -	Variación
				Promedio	
2	282.91	271.89	-3.89%	244.97	-13.41%
1	532.46	516.01	-3.09%	391.99	-26.38%



Figura VII-3: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo rígido S1

# d) Aceleración máxima de piso

Tabla VII-4: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo rígido S1

Piso	Base Fija	FEMA	Variación	PLAXIS -	Variación
		440		Promedio	
2	21.17	20.34	-3.92%	22.30	5.37%
1	12.81	12.44	-2.89%	15.90	24.12%
0	6.62	6.26	-5.44%	9.46	43.00%



Figura VII-4: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo rígido S1
En la tabla VII-1 y la gráfica VII-1, se presentan resultados de desplazamiento de techo u(m) para el modelo del edificio cimentado en el perfil de Suelo rígido S1, donde se puede observar que los modelos: De base fija, el modelo de la IDSE de acuerdo a FEMA 440 y el modelo bidimensional, desarrollado en el programa PLAXIS, no existen diferencias considerables en la respuesta de desplazamiento máximo de piso. Por lo que se puede deducir que al considerar un modelo de base fija, se asume que el suelo es infinitamente rígido y no influye en la respuesta de la estructura.

En la tabla VII-2 y figura VII-2, se muestran las respuestas de la deriva máxima de entrepiso para la estructura, los cuales tiene un comportamiento similar a los desplazamientos de techo, se puede observar que las respuestas para los tres modelos: De base fija, el modelo de la IDSE de acuerdo a FEMA 440 y el modelo bidimensional desarrollado en el programa PLAXIS, no presentan diferencias considerables en la respuesta de deriva de entrepiso.

En la tabla VII-3 y la figura VII-3, se observan los resultados de la fuerza cortante de cada piso para los tres modelos del edificio cimentado sobre suelo S1, en el que se puede observar que la fuerza cortante de piso calculado mediante el modelo que considera los efectos de IDSE según FEMA 440, no presenta cambios en la respuesta comparada, al considerar el modelo de base fija. En cambio, en el modelo desarrollado en el programa PLAXIS, se observa una ligera reducción en la cantidad de la fuerza cortante de entrepiso, que podría responder principalmente a un ligero incremento en el amortiguamiento del suelo por el comportamiento histerético ante solicitaciones de una demanda sísmica intensa.

En la tabla VII-4 y la figura VII-4, se observan los resultados de la aceleración de cada piso para los tres modelos considerados, y se puede observar que no presentan diferencias considerables en la respuesta de aceleración de cada piso, excepto la respuesta del modelo en PLAXIS que da respuestas ligeramente mayores.

#### VII.1.2 Perfil de suelo Intermedio S2

Se presentan los resultados de la respuesta dinámica del edificio cimentado en el perfil de Suelo intermedio S2.

#### a) Desplazamiento máximo de piso



Piso	Base	IDSE-FEMA	Variación	PLAXIS -	Variación
	Fija	440		Promedio	
2	0.044	0.050	14.28%	0.030	-31.79%
1	0.025	0.031	22.76%	0.018	-27.97%





Tabla VII-6: Deriva máxima de entrepiso en suelo intermedio S2

Piso	Base Fija	IDSE- FEMA 440	Variación	PLAXIS - Promedio	Variación
2	0.0062	0.0063	1.41%	0.0040	-36.32%
1	0.0059	0.0072	22.21%	0.0047	-20.58%



Figura VII-6: Deriva máximo de entrepiso en suelo intermedio S2

# c) Fuerza Cortante máxima en cada piso

Tabla VII-7: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo intermedio S2

Piso	Base Fija	IDSE- FEMA 440	Variación	PLAXIS - Promedio	Variación
2	297.05	269.70	-9.21%	136.04	-54.20%
1	559.09	527.86	-5.59%	291.93	-47.79%



Figura VII-7: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo intermedio S2

#### d) Aceleración máxima de piso

Tabla VII-8: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S2

			1		
Piso	Base Fija	IDSE-	Variación	PLAXIS -	Variación
		FEMA		Promedio	
		440			
2	22.23	20.2488	-8.91%	9.24667	-58.40%
1	13.45	12.95	-3.72%	6.94667	-48.35%
0	6.95	6.26	-9.93%	5.59	-19.57%



Aceleración- S2

Figura VII-8: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S2

En la tabla VII-5 y la gráfica VII-5, se presentan resultados de desplazamiento de techo u(m) para el modelo del edificio cimentado en el perfil de Suelo rígido S2, donde se puede observar un ligero incremento de aproximadamente 20% en los desplazamientos máximos, al considerar los efectos de la IDSE de acuerdo a FEMA 440. Esto se debe principalmente al alargamiento del periodo fundamental de vibración de la estructura, que considera la flexibilidad en la base.

Por otro lado, se observa una reducción de aproximadamente 30% en los desplazamientos máximos en la respuesta del modelo bidimensional desarrollado en PLAXIS.

En la tabla VII-6 y la figura VII-6, se puede observar la respuesta de deriva de piso del edificio cimentado en el S2, donde el modelo que considera los efectos de la IDSE según FEMA 440, desarrolla derivas de piso mayores al modelo de base fija, estando al límite de lo permitido por la Norma E030 ( $\delta$ =0.007). Caso distinto ocurre con la respuesta promedio máxima del modelo en el programa PLAXIS, donde existe una disminución considerable de hasta un 30 % aproximadamente en la respuesta.

En la tabla VII-7 y la figura VII-7, se observan los resultados de la fuerza cortante de entrepiso para los tres modelos del edificio cimentado sobre suelo S2, donde se puede observar que la fuerza cortante de entrepiso máximo calculado mediante el modelo que considera los efectos de IDSE según FEMA 440, presenta una ligera disminución de un 9% en la fuerza cortante máxima de piso, contrastada con la respuesta del modelo de base fija. En cambio, en el modelo desarrollado en el programa PLAXIS, se observa una reducción considerable de hasta un 50% en la cantidad de la fuerza cortante de piso.

En la tabla VII-8 y figura VII-8, se muestra la aceleración de cada piso, donde se observa que la máxima aceleración de piso se obtiene con el modelo que considera una base fija y este se ve reducido ligeramente en la respuesta del modelo que considera los efectos IDSE según FEMA 440. Caso distinto ocurre con la respuesta promedio máxima del modelo en el programa PLAXIS, donde existe una disminución considerable de hasta un 50 % en el valor de la aceleración máxima del segundo piso.

De las comparaciones realizadas, se observa que los resultados obtenidos mediante el programa PLAXIS 2D, muestra menores valores en la respuesta dinámica, esto se debe principalmente a la reducción del movimiento sísmico en la superficie, por el comportamiento histerético del suelo que genera un amortiguamiento adicional ante la demanda de un sismo intenso.

#### VII.1.3 Perfil de suelo S3

Se presentan los resultados de la respuesta dinámica del edificio cimentado en el perfil de Suelo intermedio S3.

#### a) Desplazamiento máximo de piso

Tabla VII-9: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo blando S3

Piso	Base Fija	FEMA	Variación	PLAXIS -	Variación
		440		Promedio	
2	0.046	0.054	16.42%	0.033	-27.88%
1	0.026	0.035	31.56%	0.021	-22.55%



Figura VII-9: Gráfico comparativo de desplazamiento de piso u(m) en suelo

blando S3

# b) Deriva máxima de entrepiso

Tabla VII-10: Deriva máxima de entrepiso en suelo blando S3

Piso	Base Fija	FEMA	Variación	PLAXIS -	Variación
		440		Promedio	
2	0.0065	0.0060	-8.21%	0.0043	-34.11%
1	0.0062	0.0080	29.26%	0.0050	-18.78%



Figura VII-10: Deriva máxima de entrepiso en suelo blando S3

# c) Fuerza Cortante máxima en cada piso V(tonf)

Tabla VII-11: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo blando S3

Piso	Base Fija	FEMA	Variación	PLAXIS -	Variación
		440		Promedio	
2	311.20	226.36	-27.26%	148.62	-52.24%
1	585.71	457.24	-21.93%	293.37	-49.91%



Figura VII-11: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo blando S3

# d) Aceleración máxima de piso

Tabla VII-12: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo blando S3

Piso	Base Fija	FEMA	Variación	PLAXIS -	Variación
		440		Promedio	
2	23.29	17.09	-26.62%	9.83	-57.79%
1	14.09	11.52	-18.24%	7.11	-49.49%
0	7.28	5.3	-27.20%	5.87	-19.32%



Figura VII-12: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo blando S3

En la tabla VII-9 y la gráfica VII-9, se presentan los resultados de desplazamiento de piso, para el modelo del edificio cimentado en el perfil de Suelo blando S3. Donde se puede observar un mayor incremento en el desplazamiento de piso de aproximadamente un 30% en el 1er nivel del modelo, al considerar los efectos de la IDSE de acuerdo a FEMA 440, esto debido principalmente a la flexibilidad en la base. Sin embargo, en el modelo desarrollado en el programa PLAXIS se tiene una reducción considerable de aproximadamente un 25% en la respuesta del desplazamiento máximo, el cual podría responder principalmente al efecto de amortiguamiento adicional del suelo por su comportamiento histerético ante una demanda sísmica intensa.

En la tabla VII-10 y la figura VII-10, se observan los resultados de la deriva de entrepiso para para los tres modelos del edificio cimentado sobre suelo S3, donde se puede observar que la deriva de piso calculado mediante el modelo que considera los efectos de la IDSE según FEMA 440, presenta incrementos importantes en el valor del

primer piso, incluso llegando a superar el valor máximo estipulado en la norma E030. ( $\delta$ =0.007). En cambio, en el modelo desarrollado en el programa PLAXIS, presenta una importante reducción en el valor de la deriva de piso.

En la tabla VII-11 y la figura VII-11, se observan los resultados de la fuerza cortante de entrepiso para los tres modelos del edificio cimentado sobre suelo S3, en el que se puede observar que la fuerza cortante de entrepiso máximo calculado mediante el modelo que considera los efectos de la IDSE según FEMA 440, presenta una disminución aproximada de un 25% contrastada con la respuesta del modelo de base fija. En cambio, en el modelo desarrollado en el programa PLAXIS, se observa una reducción considerable de hasta el 50% en la cantidad de la fuerza cortante de entrepiso, que principalmente podría deberse a un incremento en el amortiguamiento del suelo por el comportamiento histerético ante solicitaciones de una demanda sísmica intensa

En la tabla VII-12 y figura VII-12, se muestra la aceleración de cada piso, donde se observa que la máxima aceleración de piso se obtiene con el modelo que considera una base fija y este se ve reducido aproximadamente en un 20% en la respuesta del modelo que considera los efectos IDSE según FEMA 440, caso distinto ocurre con la respuesta promedio máxima del modelo en el programa PLAXIS, donde existe una disminución considerable de hasta un 50 % en la aceleración del segundo piso.

#### VII.2 Gráficas comparativas para una demanda sísmica moderada

A continuación, se presentan gráficos comparativos del análisis realizado a los distintos modelos, considerando una demanda para un sismo moderado con un valor de PGA =0.4 g. Para el análisis tiempo-historia de la estructura y el suelo en el programa PLAXIS, se escalaron los tres registros sísmicos detallados en la sección III, a fin de tener una demanda sísmica con un valor PGA=0.4g.

#### VII.2.1 Perfil de suelo S1

#### a) Desplazamiento máximo de piso

Tabla VII-13: Desplazamiento de entrepiso u(m) en suelo rígido S1

Piso	Base Fija	FEMA	Variación	PLAXIS -	Variación
		440		Promedio	
2	0.0248	0.0247	-0.22%	0.021	-15.21%
1	0.0143	0.0144	1.26%	0.012	-15.85%





Tabla VII-14: Deriva máximo de entrepiso en suelo rígido S1

Piso	Base Fija	IDSE- FEMA 440	Variación	PLAXIS - Promedio	Variación
2	0.0035	0.0034	-2.25%	0.0028	-18.47%
1	0.0033	0.0033	1.12%	0.0031	-4.50%



Figura VII-14: Deriva máximo de entrepiso en suelo rígido S1

## c) Fuerza cortante máxima en cada piso

Tabla VII-15: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo rígido S1

Piso	Base Fija	IDSE- FEMA 440	Variación	PLAXIS - Promedio	Variación
2	167.64	161.21	-3.84%	139.27	-16.93%
1	315.53	305.81	-3.08%	232.43	-26.34%



Figura VII-15: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo rígido S1

### d) Aceleración máxima de piso



Piso	Base Fija	IDSE-	Variación	PLAXIS -	Variación
		FEMA		Promedio	
		440			
2	12.54	12.06630	-3.78%	11.67	-6.96%
1	7.59	7.36890	-2.91%	6.95	-8.43%
0	3.92	3.71000	-5.45%	4.15	5.76%



Figura VII-16: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo rígido S1

En las respuestas de desplazamiento y deriva de piso de la estructura ante una solicitación sísmica moderada, no se observan diferencias sustanciales en los modelos considerados. En la fuerza cortante calculada mediante el programa PLAXIS 2D, se observa una reducción de los valores en comparación a los modelos de base fija y flexible, desarrollados en el programa ETABS, diferencia que responde al comportamiento histerético del suelo que añade un amortiguamiento adicional. Y finalmente en la aceleración de cada piso se obtienen respuestas similares en los tres modelos considerados.

#### VII.2.2 Perfil de suelo Intermedio S2

#### a) Desplazamiento máximo de piso

Tabla VII-17: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo intermedio S2

Piso	Base Fija	IDSE- FEMA	Variación	PLAXIS - Promedio	Variación
		440		FIOIIIedio	
2	0.0248	0.0254	2.67%	0.025	0.54%
1	0.0143	0.0153	7.00%	0.015	6.59%



Figura VII-17: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo intermedio



# b) Deriva máxima de entrepiso

Tabla VII-18: Deriva máximo de entrepiso en suelo intermedio S2

I	Piso	Base Fija	IDSE-	Variación	PLAXIS -	Variación
			FEMA		Promedio	
			440			
	2	0.0035	0.0034	-1.93%	0.0032	-9.46%
	1	0.0033	0.0035	6.51%	0.0035	6.76%



Figura VII-18: Deriva máximo de entrepiso en suelo intermedio S2

# c) Fuerza Cortante máxima en cada piso

Tabla VII-19: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo intermedio S2

Piso	Base Fija	IDSE-	Variación	PLAXIS	Variación
		FEMA		-	
		440		Promedio	
2	167.64	157.29	-6.18%	114.21	-31.87%
1	315.53	302.33	-4.18%	257.18	-18.49%



Figura VII-19: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo intermedio S2

Tabla VII-20: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio	• S2

Piso	Base Fija	IDSE-	Variación	PLAXIS -	Variación
		FEMA		Promedio	
		440			
2	12.54	11.77	-6.08%	7.77	-38.01%
1	7.59	7.30	-3.75%	5.88	-22.44%
0	3.92	3.62	-7.75%	4.60	17.23%



Figura VII-20: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S2

En las respuestas de desplazamiento y deriva de piso de la estructura ante una solicitación sísmica moderada, no se observan diferencias sustanciales en los modelos considerados. En la fuerza cortante calculada mediante el programa PLAXIS 2D, se observa una reducción de los valores en comparación a los modelos de base fija y flexible, desarrollados en el programa ETABS, diferencia que responde al comportamiento histerético del suelo que añade un amortiguamiento adicional. Y finalmente en la aceleración de cada piso se obtienen respuestas de menor valor en el modelo del programa PLAXIS 2D, respecto a los otros dos modelos considerados.

#### VII.2.3 Perfil de suelo blando S3

#### a) Desplazamiento máximo de piso







Figura VII-21: Desplazamiento máximo de entrepiso u(m) en suelo blando S3



Piso	Base Fija	IDSE- FEMA 440	Variación	PLAXIS - Promedio	Variación
2	0.00352	0.0032	-8.13%	0.0029	-18.47%
1	0.00332	0.0043	29.07%	0.0036	9.57%



Figura VII-22: Deriva máximo de entrepiso en suelo blando S3

# c) Fuerza Cortante máxima en cada piso

Tabla VII-23: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo blando S3

Piso	Base Fija	IDSE-	Variación	PLAXIS -	Variación
		FEMA		Promedio	
		440			
2	167.64	121.88	-27.30%	103.27	-38.39%
1	315.53	246.19	-21.97%	203.17	-35.61%



Figura VII-23: Fuerza cortante máxima V(tonf) en suelo blando S3

#### d) Aceleración máxima de piso



Piso	Base Fija	IDSE-	Variación	PLAXIS -	Variación
	U U	FEMA		Promedio	
		440			
2	12.54	9.16	-26.94%	6.36	-49.23%
1	7.59	6.20	-18.23%	4.70	-38.03%
0	3.92	2.85	-27.37%	3.92	-0.10%



Figura VII-24: Aceleración máxima a(m/s2) en suelo intermedio S3

En las respuestas de desplazamiento y deriva de piso de la estructura ante una solicitación sísmica moderada, se observa un incremento en los valores, al considerar la IDSE mediante un modelo de base flexible y el modelo desarrollado en el programa PLAXIS 2D. En la fuerza cortante calculada mediante el programa PLAXIS 2D, se observa una reducción de los valores en comparación a los modelos de base fija y flexible, desarrollados en el programa ETABS, diferencia que responde principalmente al comportamiento histerético del suelo que añade un amortiguamiento adicional. Y finalmente en la aceleración de cada piso se obtienen respuestas de menor valor en los modelos al considerar la IDSE.

#### VIII. CONCLUSIONES

Luego de la evaluación de los efectos del suelo en el modelo de análisis estructural de una edificación esencial en el Perú, en este caso, los centros educativos, mediante el programa de análisis estructural ETABS y habiéndose considerado el modelo con base fija, base flexible de acuerdo a las disposiciones de FEMA 440 y el modelo bidimensional en el programa PLAXIS, se concluye lo siguiente:

- Respecto al perfil de suelo:
  - Para el perfil de suelo S1:

Al considerar el modelo de base fija en los apoyos del edificio y luego de realizar el análisis modal espectral usando el programa ETABS, se obtuvieron respuestas similares a las respuestas obtenidas mediante el modelo que considera la IDSE según FEMA 440 y el modelo que considera la estructura y el suelo en forma conjunta en el programa PLAXIS 2D. Por lo que se concluye que al considerar un modelo de base fija, se asume que el suelo es infinitamente rígido y no influye en la respuesta de la estructura.

Además, en el modelo de elementos finitos desarrollado en el programa PLAXIS, se observó que el comportamiento del suelo tiene pequeñas deformaciones, por lo que el aporte del amortiguamiento por el comportamiento histerético del suelo, es mínimo. Situación que nos permite concluir que en la edificación cimentada sobre el perfil de suelo S1, no es relevante considerar los efectos de la IDSE.

Para el Perfil de Suelo S2:

Al considerar una demanda sísmica intensa para el edificio cimentado en el perfil S2, las respuestas de desplazamiento son mayores al considerar en el modelo los efectos de la IDSE de acuerdo FEMA 440. Sin embargo, estos difieren de la respuesta obtenida en el análisis dinámico en el programa PLAXIS 2D, pues en este caso disminuyen. Por otra parte, la fuerza cortante y la aceleración de cada piso disminuyen al considerar los efectos de la IDSE. Por lo que se pude concluir, que al considerar el modelo con el apoyo de base fija, se tendría una respuesta de tipo más conservador para la edificación evaluada.

#### Para el perfil de Suelo S3

En el modelo estructural cimentado sobre el perfil de suelo S3, se observaron incrementos en los desplazamientos de piso, al considerar los efectos de la IDSE según FEMA 440. Por otro lado, las respuestas de desplazamiento de piso en el modelo desarrollado por el programa PLAXIS 2D disminuyeron, a causa del amortiguamiento adicional del suelo por su comportamiento histerético a grandes deformaciones. También se pudo notar una reducción en la fuerza de corte de piso y las aceleraciones. Entonces se concluye que, al incluir los efectos de la IDSE, se tienen efectos favorables en la respuesta dinámica de la estructura.

 El método que considera los efectos de la IDSE de acuerdo a FEMA 440, se aproxima de buena manera a los resultados obtenidos en el modelo de elementos finitos desarrollado en el programa PLAXIS 2D, para una solicitación de sismo moderado.

- Para el análisis de una demanda sísmica intensa considerando los efectos de interacción suelo estructura de acuerdo a FEMA 440 y el modelo desarrollado en PLAXIS 2D, se logran obtener un amortiguamiento adicional considerable, debido al comportamiento histerético de suelo; lo que representa un efecto favorable para la respuesta dinámica del edificio.
- Al realizar el modelo estructural del edificio considerando base fija, se logra tener una respuesta dinámica más conservadora, con respecto a los modelos que consideran la interacción suelo estructura, para el edificio evaluado.

#### **BIBLIOGRAFIA**

- Braja M., D. (2001). Fundamentos de ingeniería Geotécnica. California: Thomson International.
- Brinkgreve, R. (2007). Hysteretic damping in a small-strain stiffness model. *Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-0-415-44027-1*.
- Brinkgreve, R., E. Engin, & H.K. Engin. (n.d.). Validation of empirical formulas to derive model parameters for sands. Delft: PLAXIS 2D.
- Chopra, A. K. (2014). Dinámica de Estructuras. PEARSON.
- FEMA 356. (2000). FEMA 356, Prestandard and Commentary for The Seismic Rehabilitation of Buildings. Washington, D.C: ASCE.
- FEMA 440. (2005). Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. Washington, D.C.
- H. Bolton Seed y I. M. Idriss. (1970). *Soil Moduli and damping factors for dynamic response analyses*. California: EERC.
- Harmsen, T. (2005). Diseño de Estructuras de Concreto Armado. Lima Perú: PUCP.
- Kramer, S. L. (1996). Geothechnical Earthquake Engineering. Washington: Prentice Hall.
- Laera, A. (2015). Ground response analysis in PLAXIS 2D. PLAXIS.
- Plaxis 2D. (2016). Manual de Referencia. DELFT: PLAXIS bv.
- Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú. (2016). Norma técnica E030 "Diseño Sismorresistente". Lima, Perú.
- Silva, W. (2012). Comportamiento Sísmico de locales escolares. Lima.
- Visone, C. (2007). Remarks on site response analysis by using. Iss23 Art3.
- Juan Carlos Tiznado Aitken (2010). *Comportamiento sísmico de estructuras rígidas de contención de suelos*. Tesis para optar el grado de magíster en ciencias de la ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile

ANEXOS



# ANEXO A: Plano Arquitectónico del Edifico

Figura 01: Plano en Planta del 1er Piso



Figura 02: Planta del 2do Piso



Figura 03: Fachada Principal



Figura 04: Facha Posterior



Figura 05: Elevación Lateral

#### ANEXO B: Procedimiento FEMA 440 para una demanda sísmica moderada

a) Parámetros de rigidez para suelo tipo S1: Sxs=1.0 Sxs/2.5=0.675  $V_s = 600 \text{ m/s}$  Velocidad de onda de corte  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  Peso específicio del suelo  $G_0 = \frac{(\gamma V_s^2)}{g} = 734195 \text{ kN/m}^2$  Módulo de Corte inicial  $\frac{G}{G_0} = 0.75$  $G = 550646 \text{ kN/m}^2$ 

Parámet	Parámetros de rigidez equivalente para el perfil de suelo S1							
Zapata	Zapata B(m) L(m) Kx Ky Kz Kxx Kyy Kzz						Kzz	
			Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m
Z1	1.2	1.2	521849	521849	323204	224882	234789	382029
Z2	1.0	1.0	483854	483854	288431	161437	171278	250094
VC	0.3	3.6	425599	527939	417565	87782	584960	1936846

# **b) Parámetros de rigidez para suelo tipo S2:** Sxs=1.0

 $V_s = 300 \text{ m/s}$  Velocidad de onda de corte  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$  Peso específicio del suelo  $G_0 = \frac{(\gamma V_s^2)}{g} = 165194 \text{ kN/m}^2$  Módulo de Corte inicial De la Tabla 4.7 del FEMA 356, a partir de la relación Sxs/2.5=0.70

$$\frac{G}{G_0} = 0.5$$

 $G = 82597 \text{ kN/m}^2$ 

	Parámetros de rigidez equivalente para el perfil de suelo S2							
Zapata B(m) L(m) Kx Ky Kz						Kxx	Куу	Kzz
			Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m
Z1	2.0	2.0	100094	100094	69396	95817	102975	193380
Z2	1.8	1.8	94759	94759	64176	76192	80915	149915
VC	0.3	3.6	64312	79777	63969	14868	90197	311843

### c) Parámetros de rigidez para suelo tipo S3:

Sxs=1.856

$$V_s = 150 \text{ m/s}$$
 Velocidad de onda de corte  
 $\gamma = 17 \text{ kN/m}^3$  Peso específicio del suelo  
 $G_0 = \frac{(\gamma V_s^2)}{g} = 39004 \text{ kN/m}^2$  Módulo de Corte inicial

De la Tabla 4.7 del FEMA 356, teniendo la relación Sxs/2.5=0.4, se calcula el Módulo de Corte efectivo mediante interpolación

$$\frac{G}{G_0} = 0.16$$

 $G = 6240 \text{ kN/m}^2$ 

Las constantes de rigidez de los resortes para fundaciones rígidas son calculados de acuerdo a las expresiones proporcionadas por FEMA 356, considerando la corrección por el empotramiento:

	Parámetros de rigidez equivalente para el perfil de suelo S3							
Zapata B(m) L(m) Kx Ky Kz Kxx Kyy						Kzz		
Tonf/m Tonf/m Ton						Tonf/m	Tonf/m	Tonf/m
Z1	2.8	2.8	9136	9136	6815	15748	17676	33413
Z2 2.6 2.6 8748 8748					6423	13196	14670	27795
VC 0.3 3.6 4020 4987 3944 82							5526	18296

Periodos y Modos de vibración

Mada/Daufil		Perfil de Suelo				
Modo/Perin	base rija	<b>S1</b>	S2	<b>S</b> 3		
1	0.28	0.29	0.30	0.35		
2	0.10	0.10	0.12	0.23		
3	0.09	0.09	0.11	0.20		
4	0.07	0.07	0.07	0.08		
5	0.03	0.03	0.04	0.05		
6	0.03	0.03	0.03	0.04		

	S1	S2	S3
T (s)	0.281	0.281	0.281
$\tilde{T}(s)$	0.287	0.295	0.353
$M^*(kN-s^2/m)$	365.30	365.307	365.307
$G(kN/m^2)$	550646	82597	8000
$K_{fixed}^{*}\left(kN / m ight)$	182643	3400043	182643
$r_x(m)$	8.222	9.262	9.262
$K_x(kN/m)$	20122131	3400043	329313
$K_{\theta}(kN - m/rad)$	139926222	98520663	203041272
$r_{\theta}(m)$	4.24	7.1	19.6
$rac{ ilde{T}_{e\!f\!f}}{ au_{e\!f\!f}}$	1.007	1.017	1.09
$\frac{\beta_{eff}}{\beta_i(\%)}$	5	5	5
$eta_f(\%)$	0.11	0.58	6.2
$eta_o(\%)$	5.00	5.33	10.1

(\*) Es preciso mencionar que para el perfil de suelo blando S3, se consideraron valores mínimos, a fin de evitar resultados con números complejos en la respuesta

# ANEXO C: Respuesta en el tiempo del programa PLAXIS 2D para el registro Rapel

• Desplazamiento de Piso

# Perfil de Suelo S1



#### Perfil de Suelo S2

Desplazamiento Piso 2-S2



Perfil de Suelo S3





• Deriva de Piso

# Perfil de Suelo S1





Perfil de Suelo S3





• Aceleración a(m/s2)








Perfil de Suelo S3





## Curva de histéresis deformación de corte $\gamma$ tensión de corte $\tau$ (Punto k)

Registro Sísmico Rapel









