

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

ESCUELA DE POSGRADO



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**RESPUESTA TORSIONAL DE EDIFICIOS SÍSMICAMENTE AISLADOS EN
EL PERÚ.**

COMPARACIÓN DE MÉTODOS ESTÁTICOS Y DINÁMICOS.

Tesis para optar el grado de Magíster en INGENIERÍA CIVIL

AUTOR:

Henry Antonio Aguilar Chuquimia

ASESOR:

Mag. Ing. Alejandro Muñoz Peláez

LIMA – PERÚ

2018

I. DEDICATORIA

A mis padres Manglio y Abelina por su apoyo constante y aliento permanente durante todo el proceso de mi formación profesional.

A mis hermanos por su acompañamiento, alegría y respaldo.

A mis abuelos que ya no nos acompañan pero que siempre están presentes con su ejemplo y fortaleza.

A Fiorella por su comprensión, por ser mi compañera, amiga y más... y por seguir adelante en nuevos proyectos y aventuras.

II. AGRADECIMIENTOS

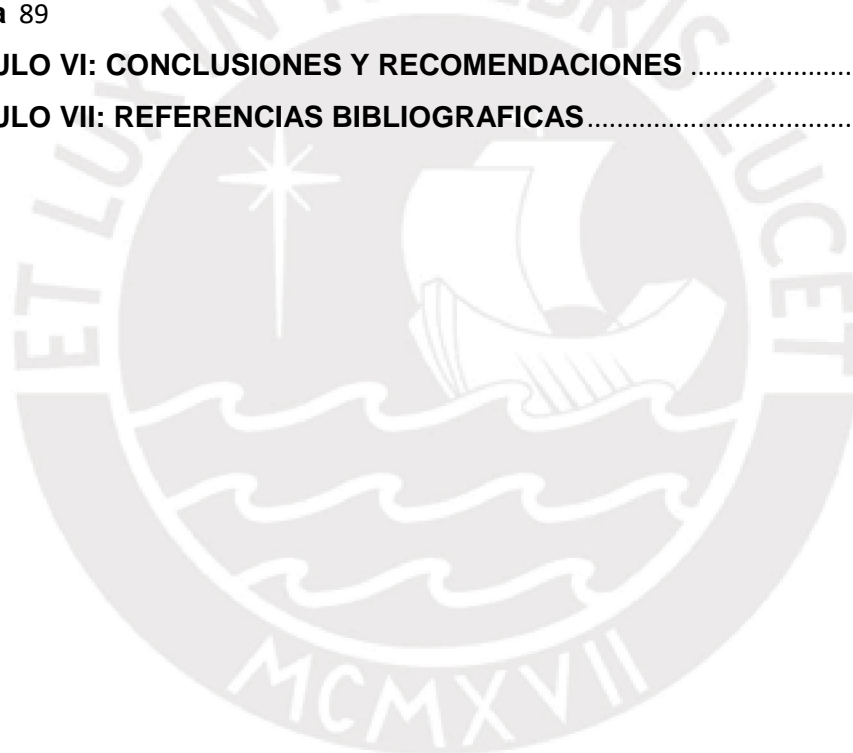
A mis profesores de la Maestría de la PUCP por dar parte de sí en la formación de mi persona. De forma muy especial a mi asesor y maestro Juan Alejandro Muñoz, por ser un ejemplo de dedicación y entrega a la Ingeniería Estructural.

A mis jurados Profesor Antonio Montalbetti y Profesor Víctor Fernández-Dávila, por sus comentarios y observaciones que permitieron enriquecer el presente trabajo.

TABLA DE CONTENIDO

I. DEDICATORIA	2
II. AGRADECIMIENTOS	3
III. ÍNDICE DE TABLAS	6
IV. INDICE DE FIGURAS	7
V. RESUMEN.....	10
VI. LISTA DE SÍMBOLOS	11
CAPÍTULO I: INTRODUCCION Y GENERALIDADES	14
1.1. Introducción	14
1.2. Antecedentes	16
1.3. Justificación	18
1.4. Objetivos	18
1.4.1. Objetivo general	18
1.4.2. Objetivos específicos.....	19
1.5. Alcances	19
1.6. Hipótesis.....	20
CAPITULO II: METODOLOGIA	21
2.1. Variables del proyecto	21
2.2. Códigos de diseño	22
2.3. Métodos de análisis estático y dinámicos	24
2.4. Métodos de escalamiento de registros	30
2.5. Comportamiento mecánico de dispositivos de aislamiento de base	32
CAPITULO III: MODELO EN ESTUDIO	35
3.1. Estructuración de los casos de estudio	35
3.2. Periodos fundamentales de vibración en los casos de edificios de base fija y base aislada.....	38
3.3. Rigideces y amortiguamiento.....	39
CAPITULO IV: ANÁLISIS SÍSMICO	42
4.1. Demanda sísmica	42
4.2. Pares de registros de aceleración para análisis tiempo-historia.....	42
4.3. Acelerogramas espectro compatibles.....	44
4.4. Resultados del análisis estático	44
4.5. Resultados del análisis espectral y tiempo historia	53

CAPITULO V: DISCUSION DE RESULTADOS.....	55
5.1. Discusión de resultados de los procedimientos estáticos.....	55
5.2. Discusión de resultados de los procedimientos dinámicos	56
5.3. Discusión de resultados de los procedimientos estáticos versus procedimientos dinámicos.....	57
5.4. Planteamiento de ecuación para predecir desplazamientos máximos en edificios con aislamiento sísmico.....	60
5.5. Verificación de resultados con señales escaladas en el dominio de la frecuencia.....	78
5.6. Revisión de parámetros de desempeño de estructuras analizadas.....	82
5.7. Verificación de resultados con caso numérico y distribución real de masa	89
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
CAPITULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	100



III. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1: Diseño de la investigación	21
Tabla N° 2: Requerimientos de códigos de Japón, Estados Unidos y Unión Europea, para ELF	23
Tabla N° 3: Factores B_D y B_M	27
Tabla N° 4: Métodos de análisis para estructuras aisladas y sus restricciones según FEMA	29
Tabla N° 5: Resumen de criterios de diseño mínimos para análisis dinámicos.....	30
Tabla N° 6: Dimensiones de elementos de la superestructura y plataforma de aislamiento	37
Tabla N° 7: Pesos unitarios considerados para el modelo	37
Tabla N° 8: Periodos fundamentales en edificios de base fija y aislada	39
Tabla N° 9: Parámetros de caracterización del aislador con propiedades lineales y bilineales	40
Tabla N° 10: Pares de registros de aceleración considerados	43
Tabla N° 11: Datos para la determinación de la respuesta torsional por procedimientos estáticos ASCE 7-10 y ASCE 7-16.....	46
Tabla N° 12: Grupos de registros para respuesta al desplazamiento y determinación del exponente modificador “q”	74
Tabla N° 13: Cálculo de expresiones para mejor ajuste de curvas de regresión	74
Tabla N° 14: Comparación de respuestas según ecuaciones planteadas para sismos de 500 y 2500 años.....	79
Tabla N° 15: Ubicación del centro de masas y rigideces por cada nivel del caso de estudio.....	93
Tabla N° 16: Resumen de resultados del análisis caso de estudio de proyecto real....	95
Tabla N° 17: Parámetros de desempeño en caso de estudio de proyecto real – Dirección “X” e “Y”	96

IV. INDICE DE FIGURAS

Figura N° 1: Esquema de Planta típica para el cálculo del parámetro DT	27
Figura N° 2: Formas esquemáticas típicas de los procedimientos de escalamiento	31
Figura N° 3: Modelo bilineal para representar el comportamiento inelástico de un aislador elastomérico.....	33
Figura N° 4: Plantas típicas consideradas en las estructuras de 4 y 8 niveles con excentricidades bidireccionales de 0%, 5% y 10% de sus longitudes en planta. Horizontal=X, Vertical=Y.....	36
Figura N° 5: Modelo en elevación con 4 y 8 pisos para cada planta típica	37
Figura N° 6: Código de colores y formas para la presentación de resultados según la relación de aspecto y altura considerada.....	41
Figura N° 7: Formas espectrales de los registros escalados.....	44
Figura N° 8: Variación del factor PT según definición del ASCE 7-16 – dirección Y	48
Figura N° 9: Variación del factor PT según definición del ASCE 7-16– dirección X	48
Figura N° 10: Factores de amplificación de desplazamientos en función de PT del ASCE 7-16– dirección Y.....	49
Figura N° 11: Factores de amplificación de desplazamientos en función de PT del ASCE 7-16– dirección X.....	49
Figura N° 12: Factores de amplificación según ASCE 7-10 y según ASCE 7-16 en función de PTd – dirección Y.....	50
Figura N° 13: Factores de amplificación según ASCE 7-10 y según ASCE 7-16 en función de PTe – dirección Y.....	50
Figura N° 14: Desplazamientos calculados en función a PTd y PTe según el ASCE 7-16– dirección Y	51
Figura N° 15: Desplazamientos calculados en función a PTd y PTe según el ASCE 7-16– dirección X.....	51
Figura N° 16: Desplazamientos totales según ELF del ASCE 7-10 y ASCE 7-16 con “PTe”.....	52
Figura N° 17: Desplazamientos totales según ELF del ASCE 7-10 y ASCE 7-16 con “PTd”	52
Figura N° 18: Desplazamientos por el análisis espectral y por el análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades lineales– dirección Y	54
Figura N° 19: Desplazamientos por el análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades lineales y bilineales – dirección Y.....	54
Figura N° 20: Desplazamientos obtenidos por análisis estático según ASCE 7-10 versus desplazamientos obtenidos por análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades bilineales (modelo numérico de 4 pisos) – dirección Y.....	58
Figura N° 21: Desplazamientos obtenidos por análisis estático según ASCE 7-10 versus desplazamientos obtenidos por análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades bilineales (Modelo numérico de 8 pisos) – dirección Y.....	59
Figura N° 22: Desplazamientos obtenidos por análisis estático según ASCE 7-16 con “PTe” versus desplazamientos obtenidos por análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades bilineales – dirección Y	59

Figura N° 23: Desplazamientos obtenidos por análisis estático según ASCE 7-16 con “PTd” versus desplazamientos obtenidos por análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades bilineales – dirección Y	60
Figura N° 24: Plantas consideradas en el análisis de las implicancias del procedimiento estático	61
Figura N° 25: Relación geométrica “b/d” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	62
Figura N° 26: Relación “Nro Aisladores” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	63
Figura N° 27: Relación de densidad “(b x d) / Nro Aisladores” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	64
Figura N° 28: Relación geométrica “b/d” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	65
Figura N° 29: Número de aisladores vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	65
Figura N° 30: Relación de densidad “(b x d) / Nro Aisladores” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	66
Figura N° 31: Relación geométrica “b/d” vs “PTe” del ASCE 7-16. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	66
Figura N° 32: Número de aisladores vs “PTe” del ASCE 7-16. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	67
Figura N° 33: Relación de densidad “(b x d) / Nro Aisladores” vs “PTe” del ASCE 7-16. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	67
Figura N° 34: Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10 vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Comparación entre curvas con énfasis en la excentricidad bidireccional. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	68
Figura N° 35: Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10 vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Comparación entre curvas con énfasis en la forma de las plantas. Dirección Y Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	69
Figura N° 36: Relación “PTe” del ASCE 7-16 vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Comparación entre curvas con énfasis en la excentricidad bidireccional. Dirección Y Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	69
Figura N° 37: Relación “PTe” del ASCE 7-16 vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Comparación entre curvas con énfasis en la forma de las plantas. Dirección Y . Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B	70
Figura N° 38: Esquema para determinar la recta de mejor ajuste	71
Figura N° 39: Planteamiento de ecuación para el ELF del ASCE 7-10– dirección Y....	75

Figura N° 40: Planteamiento de ecuación para el ELF del ASCE 7-16 empleando “PTE”– dirección Y.....	76
Figura N° 41: Planteamiento de ecuación para el ELF del ASCE 7-16 empleando “PTd”– dirección Y.....	77
Figura N° 42: Verificación de la ecuación (20) para valores promedio de sismos de 500 años.....	80
Figura N° 43: Verificación de la ecuación (21) y (22) para valores promedio de sismos de 2500 años.....	81
Figura N° 44: Distorsiones angulares de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=500 años y Tr=2500 años.....	84
Figura N° 45: Máximas distorsiones angulares de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=500 años.....	85
Figura N° 46: Máximas distorsiones angulares de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=2500 años.....	85
Figura N° 47: Aceleraciones de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=500 años y Tr=2500 años.....	87
Figura N° 48: Máximas aceleraciones de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=500 años.....	88
Figura N° 49: Máximas aceleraciones de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=2500 años.....	88
Figura N° 50: Clasificación en planta de los ambientes de un proyecto de infraestructura hospitalaria en función al tipo de uso.....	90
Figura N° 51: Sistema de losas consideradas en proyecto hospitalario.....	91
Figura N° 52: Modelo numérico de un proyecto con distribución real de masas y rigideces.....	92

V. RESUMEN

El creciente desarrollo de proyectos en el Perú, que involucran el uso de aisladores sísmicos, trae consigo la necesidad de investigar en detalle ciertos aspectos que influyen en la respuesta estructural de estas edificaciones, un aspecto relevante y recientemente actualizado en el estándar ASCE 7-16 es el relacionado a la respuesta torsional de sistemas sísmicamente aislados.

En razón de lo indicado, es reconocido que la demanda sísmica característica de una región particular influye sobre la respuesta que posean las estructuras, por ello, el presente trabajo discute sobre la aplicación directa de las expresiones para estimar la máxima respuesta torsional de estructuras sísmicamente aisladas en el Perú, según el código ASCE 7 en sus versiones 2010 y 2016; para tal propósito, múltiples análisis numéricos se realizaron sobre la base de estructuras aporticadas, estableciéndose en las mismas: tres relaciones de aspecto en planta, dos alturas típicas, tres porcentajes diferentes de excentricidad (del orden de 0%, 5% y 10%) y múltiples acciones sísmicas espectro-compatibles, aplicadas de forma bidireccional, tanto para demandas de diseño (con $T_r=500$ años) como para máximas consideradas (con $T_r=2500$ años). Encontrándose finalmente, que para el caso de suelos rígidos y zonificación sísmica 4 del Perú, es posible plantear expresiones de mejor ajuste basadas en los códigos ASCE 7-10 y ASCE 7-16, todo ello establecido como producto del análisis de las relaciones entre métodos estáticos y dinámicos (espectral y tiempo-historia).

VI. LISTA DE SÍMBOLOS

b, d	Dimensiones de un rectángulo representativo de la base aislada en las coordenadas “X” e “Y” respectivamente. Medido en [m].
B_D, B_M	Coefficientes numéricos relacionados al amortiguamiento efectivo β_D y β_M , relacionados al sismo de diseño y al sismo considerado máximo, que se presenta Tabla N° 3
B_{eff}	Amortiguamiento efectivo del sistema de aislamiento.
C.M., c.m.	Centro de masa del sistema de aislamiento. Conocido también como centro de gravedad.
C.R., c.s.	Centro de rigidez del sistema de aislamiento.
D	Máximo desplazamiento en el centro de rigidez del sistema de aislamiento [m] – expresión genérica, definido bajo la ecuación (6)
D_T	Máximo desplazamiento total incluyendo efectos torsionales en un extremo de la planta de lados “b” y “d”, bajo una dirección considerada en [m], definida según las ecuaciones (4), (6), (8) y (11).
D_{Te}, D_{Td}	Máximo desplazamiento total incluyendo efectos torsionales en un extremo de la planta de lados “b” y “d”, bajo el enfoque del ASCE 7-16 para el análisis estático, con el empleo de P_{Te} (definido por la ecuación (9) y P_{Td} (definido por la ecuación (10) respectivamente. En [m]
D_y	Desplazamiento de fluencia del dispositivo [m]
D_{Ty}	Máximo desplazamiento total incluyendo efectos traslacionales y rotacionales en un extremo de la planta de lados “b” y “d”, bajo una dirección coordenada “Y” en [m].
e	Excentricidad del centro de masa en [m], que relaciona la distancia entre el centro de masa respecto del centro de rigidez.
eBi	Excentricidad bidireccional del centro de masa respecto del centro de rigidez.
e_x, e_y	Excentricidad en dirección “X” e “Y”, respectivamente

ELF	Siglas en ingles del Procedimiento estático del ASCE SEI 7: Equivalent Lateral Force Method.
F _y	Fuerza de fluencia del dispositivo de aislamiento [tonf].
f' _c	Resistencia especificada del concreto [kgf/cm ²]
H _r	Espesor del aislador elastómero [m].
K _b	Rigidez efectiva de un aislador elastomérico [tonf/m].
K _{eff}	Rigidez efectiva de un aislador [tonf/m].
K ₁	Rigidez elástica o rigidez tangente [tonf/m].
K ₂	Rigidez post-elástica o rigidez tangente [tonf/m].
L	Longitud entre ejes del modelo planteado para cada caso de análisis.
L _x , L _y	Longitud total en la dirección "X" e "Y", respectivamente
M	Masa de la estructura sobre el nivel de aislamiento.
N	Número de aisladores en el sistema
P _T	Relación de periodos traslacional y rotacional de un sistema de aislamiento sísmico. Definido por las ecuaciones (9) y (10).
P _{Te}	Forma particular de la relación de periodos traslacional y rotacional de un sistema de aislamiento sísmico, definido por ASCE 7-10 según la ecuación (9).
P _{Td}	Forma particular de la relación de periodos traslacional y rotacional de un sistema de aislamiento sísmico, definido por ASCE 7-10 según la ecuación (10).
q	Exponente que modifica las ecuaciones de amplificación para determinar desplazamientos totales máximos, incluidos los efectos de torsión.
Q	Fuerza característica [tonf].
r _I	Radio de giro de un rectángulo representativo de lados "b" y "d" [m].
T	Periodo efectivo de vibración. Definido por la ecuación (3). Representa a su vez el periodo traslacional en un modelo tridimensional [s].

T_{θ}	Periodo de vibración rotacional de un sistema estructural con aislamiento sísmico de base [s].
W_D	Área del ciclo de histéresis correspondiente a la energía liberada por ciclo.
x_i, y_i	Ubicación en coordenadas de los dispositivos de un sistema aislado en planta [m].
X e Y	Símbolos para representar el sistema de coordenadas plano horizontal y vertical respectivamente.
X_{CM}, Y_{CM}	Coordenada del centro de masa en la dirección "X" e "Y", respectivamente [m]
X_{CR}, Y_{CR}	Coordenada del centro de rigidez en la dirección "X" e "Y", respectivamente [m]
y	Distancia perpendicular al aislador analizado, midiéndose de forma perpendicular a la acción sísmica [m].
α	Relación entre desplazamiento total máximo y desplazamiento máximo, definido por las ecuaciones (7) y (12)
α_{m1}	Factor que relaciona el desplazamiento total máximo por efectos de torsión respecto del desplazamiento del centro de rigidez, cuya definición presentada en la ecuación (20) resulta de una modificación de la ecuación del procedimiento estático del ASCE 7-10.
α_{m2}, α_{m3}	Factor que relaciona el desplazamiento total máximo por efectos de torsión respecto del desplazamiento del centro de rigidez, cuya definición presentada en las ecuaciones (21) y (22) resulta de una modificación de la ecuación del procedimiento estático del ASCE 7-16 en sus acepciones relacionadas al uso de PTe y PTd.
α_y	Relación entre desplazamiento total máximo y desplazamiento máximo para la dirección coordenada "Y".
ξ	Razón de amortiguamiento "C/Ccr".
ω	Frecuencia angular natural de vibración [rad/s]
ω_k	Relación de rigideces: rigidez elástica respecto de rigidez post-fluencia (K_1/K_2)

CAPÍTULO I: INTRODUCCION Y GENERALIDADES

1.1. Introducción

Los sistemas con aislamiento sísmico son en esencia una interfaz que permite desacoplar una superestructura del movimiento sísmico, actuando como filtros de movimiento que reducen considerablemente la energía que recibe una estructura. La interfaz de aislamiento permite el desarrollo de grandes desplazamientos relativos y disipación de energía, de tal forma que los periodos de vibración de la estructura aumentan considerablemente, reduciendo así las demandas de fuerzas laterales por la reducción de las aceleraciones sobre la superestructura.

El buen desempeño de estructuras con aislamiento sísmico se demostró tanto analítica como experimentalmente y así mismo evaluada en eventos sísmicos reales, ejemplo de ello fueron el Hospital Universitario del Sur de California (USC) que durante el terremoto de Northridge California en 1994 ($M_s=6.8$) se mantuvo operativo y sin daños estructurales, el mismo buen desempeño de estos sistemas se encontró en las edificaciones japonesas durante el Gran Terremoto del Este de Japón del año 2011. Sin embargo, resultados de estudios cada vez más profundos evidencian que no resulta sencillo tomar en cuenta todas las variables asociadas a la respuesta estructural, por lo que la necesidad de continuar con investigaciones de estos sistemas permanece vigente. (Celebi 1996, Nagarajaiah & Xiaohong 2000, Siringoringo & Fujino 2014)

Uno de los aspectos, todavía, vigente y considerado importante es la respuesta torsional en los edificios debido a los movimientos sísmicos y excentricidad de la masa sísmica, ello resulta importante no solo por las variadas disposiciones que tienen los códigos respecto de este tema sino por los resultados muchas veces contradictorios que existe en la literatura actual. (Anagnostopoulos et al. 2015, Pietra et al. 2015)

Para el estudio de la respuesta torsional que se producen en las estructuras se requiere diferenciar la torsión natural (o inherente) de la torsión accidental, la torsión natural resulta de la no coincidencia del centro de masa y del centro de rigidez, y la torsión

accidental es utilizada para tomar en cuenta de forma indirecta (a) la distribución real de las masas que difieren de las asumidas en el diseño (b) la variación de las propiedades mecánicas del esquema resistente a fuerzas (c) la no uniformidad de las propiedades no lineales de los elementos del sistema sismorresistente (d) la componente torsional del movimiento sísmico (Basu, et al., 2014).

Para analizar la respuesta torsional natural en estructuras sísmicamente aisladas, es aceptable considerar cuatro aspectos fundamentales: (a) el origen del movimiento sísmico, (b) el procedimiento de escalado para el análisis Tiempo Historia, (c) el espectro de respuesta utilizado, (d) La medida de tendencia central para presentar los resultados. (Ozdemir & Constantinou, 2010; Pant, et al., 2013)

Respecto de la respuesta torsional en estructuras sísmicamente aisladas, Wolff et al (2014) modificó la ecuación del método estático (ELF) del código ASCE 7-10 con el propósito de predecir mejor los desplazamientos totales en estas estructuras, dicho estudio fue tomado para el código ASCE 7 en su versión 2016, pero que sin embargo requiere verificación acorde a la sismicidad peruana, ello, reconociendo que fue validado para una realidad sísmica diferente y que la fuente sismo-génica es una de las variables más importantes en la caracterización de la respuesta torsional de estructuras sísmicamente aisladas.

1.2. Antecedentes

A partir de 2012 se inició en Perú el desarrollo de proyectos de edificaciones con sistema de aislamiento sísmico, sin embargo, publicaciones como la de Naeim & Kelly (1999) indican que el primer sistema de aislamiento con dispositivos de goma ocurrió en 1969 en Yugoslavia para una estructura de uso escolar; a partir de ello múltiples proyectos se realizaron en especial en países con alta demanda sísmica. Según Pietra et al (2015), para el año 2010 se estimaba que en Japón unas 6000 edificaciones entre edificios y viviendas poseían esta tecnología.

En la actualidad, la efectividad de los sistemas aislados para reducir los daños estructurales resulta en un hecho concreto, demostrado tanto en estudios experimentales como de desempeño sísmico y reflejado en trabajos como el de (Warn & Ryan, 2012) y (Chimamphant & Kasai, 2015). Del mismo modo, estudios comparativos de respuesta sísmica de diversos dispositivos demostraron analíticamente un buen desempeño (Chen, et al., 2014) y (Pokhrel, et al., 2016). Sin embargo, tal como se presenta en el trabajo de (Alhan & Öncü-Davas, 2016) un aspecto problemático relevante es el orientado a la revisión de situaciones particulares que puedan llevar a estados límite los dispositivos de aislamiento, debido, principalmente a las demandas particulares de desplazamiento de una región sísmica determinada.

Por lo indicado, uno de los problemas vigentes en estructuras con aislamiento sísmico es el relacionado a la fiabilidad de las estimaciones de desplazamiento lateral en estructuras con torsión inherente. Al respecto, múltiples investigadores trataron el asunto tomando en cuenta algunas de las variables importantes para la caracterización de la respuesta torsional máxima. Lee (1980), estudio los efectos de torsión en una estructura asimétrica con un grado de libertad y con la interfaz de aislamiento con comportamiento histerético, demostrando que la respuesta torsional se anula si centro de masa de la superestructura se ubica en la misma proyección del centro de rigideces del sistema de aislamiento.

Trabajos como los de (Tena Colunga, 1997), (Tena Colunga & Gómez, 2002) (Tena Colunga, 2003) Tena Colunga & Escamilla Cruz (2008), (Kilar & Koren, 2009) o (Khante & Wankhade, 2010) discutieron respecto del caso más desfavorable para el origen de la excentricidad en estructuras aisladas, analizaron la variación posicional de los centros de rigideces y centros de masa, tanto de la superestructura como en el sistema de aislamiento, encontrando que el escenario más desfavorable proviene del desplazamiento del centro de masa de la superestructura respecto del centro de rigidez del sistema de aislamiento. Similar conclusión fue dada por (Ryan & Chopra, 2004) que investigaron las máximas respuestas producto de asimetrías extremas en planta de estructuras aisladas.

La respuesta torsional relacionada a la direccionalidad de los movimientos sísmicos sobre estructuras sísmicamente aisladas fue tratada en los trabajos de (Tena Colunga & Gómez, 2002), (Escamilla Cruz & Tena Colunga, 2003) entre otros, indicándose que la respuesta máxima resulta muy compleja de caracterizar no habiéndose establecido una clara direccionalidad crítica (unidireccional o bidireccional). Sin embargo, trabajos como de (Bhagat & Wijeyewickrema, 2017) y (Pant & Maharjan, 2016) aceptan el uso de la regla bidireccional 100%-30% para determinar la máxima respuesta en estructuras aisladas; además, trabajos como el de (Lopez, 2018) respecto del efecto de los ángulos de incidencia de los movimientos sísmicos en estructuras duales convencionales, concluyen que la respuesta obtenida del uso de la norma peruana E.030 proporciona valores aceptablemente conservadores cuando las estructuras poseen periodos largos.

Por otra parte, la búsqueda de formas confiables y sencillas de estimar desplazamientos laterales, tanto para fases de diseño como de verificación, lleva al uso de procedimientos estáticos donde trabajos como el de (Ozdemir & Constantinou, 2010) y (Pant, et al., 2013), demostraron que formulas del procedimiento estático del UBC (similar al ASCE 7-10) para la estimación de desplazamientos del centro de rigidez en estructuras con aislamiento sísmico y sin excentricidad asociada ($CR=CM$), proporcionan resultados satisfactorios y coherentes respecto de la precisión y dispersión de resultados. Sin embargo, (Jangid & Kelly, 2000) y (Ryan & Chopra, 2004) demostraron que la fórmula

del UBC para estimar desplazamientos totales que incluyen efectos torsionales ($CR \neq CM$) carecen de la precisión necesaria.

Finalmente, Wolff, et al. (2014), encontró que una mejora sobre la forma de calcular los desplazamientos máximos totales por efectos de torsión era necesaria con el propósito de predecir apropiadamente la respuesta de desplazamiento de una estructura con aislamiento sísmico, por ello, planteó la incorporación de un factor que relaciona los periodos traslacionales y rotacionales de un sistema aislado en la ecuación del método estático del ASCE 7-10. El mismo que fue posteriormente recogido e incorporado en el Standard ASCE/SEI 7-16 (American Society of Civil Engineers, 2017).

1.3. Justificación

La importancia del proyecto de tesis radica en analizar las ventajas, desventajas y limitaciones de los diferentes métodos de análisis de estructuras sísmicamente aisladas, con el propósito de validar/plantear expresiones simples que permitan estimar los máximos desplazamientos totales incluidos efectos de torsión, ello, a partir de la respuesta obtenida de los procedimientos estáticos y dinámicos del ASCE 7-10 y ASCE 7-16, y en concordancia con la sismicidad del Perú; que por consecuencia logre contribuir al estado del arte respecto del aislamiento sísmico de edificios en el Perú.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Estimar el máximo desplazamiento lateral en estructuras sísmicamente aisladas, incluidos efectos de torsión, a partir del planteamiento de expresiones acordes a la realidad sísmica peruana por medio de relaciones entre procedimientos estáticos y dinámicos y verificando la aplicabilidad de las ecuaciones del procedimiento estático del código ASCE/SEI 7-16.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Desarrollar análisis numéricos de estructuras aisladas sísmicamente con excentricidades bidireccionales del centro de masa en la superestructura.
2. Determinar los máximos desplazamientos laterales por medio de los análisis “Tiempo historia”, “Espectral” y “Estático” del Standard ASCE/SEI 7-10 y del ASCE/SEI 7/16
3. Establecer las relaciones entre las respuestas de desplazamiento lateral según los métodos de análisis estáticos y dinámicos acordes a la realidad sísmica peruana y determinar la idoneidad de la aplicación de formulaciones de códigos del ASCE para el Perú.

1.5. Alcances

Replicar parte del trabajo desarrollado por Wolff et al 2014, que se incorpora en la actualización del código ASCE/SEI 7 en su versión 2016, para la estimación de los desplazamientos laterales máximos por efectos de torsión en estructuras con aislamiento sísmico en la base, considerando aisladores de goma y planteando casos numéricos de estructuras aporricadas con excentricidades bidireccionales del centro de masa respecto del centro de rigidez (con $e=0\%$, 5% y 10%).

Estimar máximos desplazamientos laterales y relación de periodos traslacionales y rotacionales (PT), en base aislada, a partir del procedimientos “Estáticos” (Fuerza lateral equivalente - ELF) utilizando las ecuaciones del ASCE 7-10 y ASCE 7-16, según corresponda.

Determinar los máximos desplazamientos laterales y relación de periodos traslacionales y rotacionales (PT) en la base aislada, a partir del análisis tiempo historia empleando registros sísmicos escalados y espectro-compatibles acordes a la norma técnica peruana de edificaciones E.030, presentando el desplazamiento máximo de respuesta a partir de un modelo de comportamiento bilineal para los aisladores de goma siguiendo la regla 100%-30% para la aplicación del movimiento sísmico en sus componentes ortogonales.

Por último comparar los métodos de análisis estáticos y dinámicos utilizando medidas de tendencia central (media y/o promedio), y en función a ello establecer elementos de aceptación para el uso del procedimiento estático del ASCE 7-16 y/o evaluar relaciones para plantear la(s) expresión(es) que permita(n) estimar los máximos desplazamientos laterales totales, según el procedimiento “estático”, de estructuras con aislamiento sísmico de goma y acorde a la realidad sísmica peruana.

1.6. Hipótesis

Se obtendrá expresiones para estimar desplazamientos laterales máximos de estructuras sísmicamente aisladas que incluyen efectos de torsión, acordes a la sismicidad peruana, para ser aplicados directamente en procedimientos estáticos y que resultaran útiles para delimitar los resultados de procedimientos dinámicos.

En el marco de la hipótesis planteada se asume que:

- Las losas poseen un diafragma rígido.
- La interfaz de aislamiento tomara gran parte de la demanda sísmica con un comportamiento histerético no lineal.
- La superestructura permanecerá en el rango lineal elástico, limitando para dicha consideración, las distorsiones máximas angulares de entrepiso a 0.003 y aceleraciones máximas a 0.2g tanto para demandas sísmicas de diseño como para sismo considerado máximo; para edificios de mediana altura proyectados con buenas prácticas constructivas, basado en Manual HAZUS-MH MR5 (para mantener elementos no estructurales y estructurales por debajo de los límites de daño).
- La respuesta estructural se producirá por excitación sísmica horizontal, no considerando efectos verticales.

Otro aspecto a considerar resulta de enmarcar el análisis a excentricidades naturales o inherentes sin considerar efectos accidentales o relacionados interacción suelo-estructura, incertidumbre de la posición del centro de masa, “rocking” (o balanceo) de la estructura u otro aspecto que pueda generar efectos no controlados.

CAPITULO II: METODOLOGIA

2.1. Variables del proyecto

Basado en la investigación de casos numéricos de estructuras con propiedades lineales y no lineales para estructuras sísmicamente aisladas. La Tabla N° 1 presenta el resumen de las variables dependiente e independientes de la presente investigación.

Tabla N° 1: Diseño de la investigación

Objeto de estudio	Variables independientes	Variables dependientes
Modelo numérico de estructuras aporticadas sísmicamente aisladas	<ul style="list-style-type: none">▪ Espectro de pseudoaceleraciones▪ Registros sísmicos▪ Relaciones de aspecto en planta de los casos numéricos▪ Número de pisos de los casos▪ Métodos de análisis	<ul style="list-style-type: none">▪ Desplazamientos laterales totales▪ Periodos fundamentales de vibración (T_x, T_y, T_θ)▪ Relación de periodos (PT) según caso analizado▪ Aceleraciones y distorsiones angulares de entrepiso.

Los casos representan estructuras aporticadas que tienen una configuración regular y simétrica en ambos ejes perpendiculares (X, Y), mostrados en la Figura N° 4, Figura N° 5 y Figura N° 6; considerándose para el estudio: 3 plantas típicas, 2 alturas típicas y 3 porcentajes de excentricidad bidireccional en planta (0%, 5% y 10%), constituyendo en total 18 casos de análisis.

Los casos fueron analizados conforme procedimientos estáticos indicados en los códigos ASCE 7-10 y ASCE 7-16, así como procedimientos dinámicos (espectrales y tiempo historia). Para los análisis tiempo historia se emplearon las propiedades lineales y no lineales de los dispositivos de aislamiento sísmico (aislador elastomérico).

La fuente sismogénica corresponde a terremotos de subducción con niveles de aceleración compatibles con el espectro de diseño de la norma técnica peruana E.030-2018.

Para determinar la respuesta de los casos de análisis por procedimientos estáticos se emplearon las ecuaciones del ASCE 7-10 y del ASCE 7-16. Por otra parte la respuesta de los análisis dinámicos se obtuvo con la ayuda de la herramienta computacional ETABS (Computer and Structures Inc., 2016).

2.2. Códigos de diseño

En Perú las disposiciones para sistemas aislados son, en esencia, provenientes de códigos norteamericanos. Se describe, a continuación, el marco de normativo sobre el cual se analizó los casos de estudio y se referencia brevemente disposiciones de otros códigos.

2.2.1 NTE E.030: "Diseño Sismorresistente"

Las investigaciones plasmadas en los códigos para las disposiciones normativas consideradas en el Perú básicamente son norteamericanas tal como se presenta en el ítem 3.9 de la norma peruana, en referencia a "Sistemas de Aislamiento Sísmico", que indica tomar en medida de sus aplicabilidad, los lineamientos del documento "Minimum Design Loads for Building and Other Structures", ASCE/SEI 7-10. Sin embargo cabe mencionar que es requerido evaluar las implicancias y/o limitaciones del empleo de códigos referenciales para nuestra norma.

En concordancia a lo indicado, cabe mencionar que países como Japón o la Unión Europea tienen acepciones diferentes a lo planteado por el ASCE en referencia a como considerar los efectos torsionales en estructuras con aislamiento sísmico. La Tabla N° 2 resume las disposiciones respecto de la torsión en procedimientos estáticos "ELF", según lo resumido por Pietra et al. (2015) para los códigos Japonés, Norteamericano y Europeo, lo indicado fue elaborado para tomar en consideración aspectos a estudiar en la elaboración del código Neozelandés de diseño de sistemas aislados.

Tabla N° 2: Requerimientos de códigos de Japón, Estados Unidos y Unión Europea, para ELF

	JP (MRIT)	US (ASCE 7-10)	EU (EC8)
Torsion in ELFM	1.1	Calculated	Calculated
	Max ecc. 3%L	No limit	Max ecc. 2.5%L
	(+ 0% accidental ecc.)	(+ 5% accidental ecc.)	(+ 5% accidental ecc.)

Fuente : Pietra et al. (2015)

2.2.2 Propuesta de norma NTE E.031: Aislamiento sísmico

La propuesta de la norma peruana de edificaciones E.031 respecto del análisis y diseño de sistemas aislados, en específico respecto de la respuesta torsional, contempla tomar aspectos del código ASCE 7 en su versión 2016, es decir con consideraciones similares a lo establecido en la ecuación (8) del presente documento. Cabe mencionar que el presente trabajo podría resultar útil para destacar aspectos referidos a las limitaciones y/o recomendaciones que pudieran generarse en referencia al aislamiento sísmico de edificios.

2.2.3 FEMA P-1050-1/2015, ASCE/SEI 7/10 y 7/16

La Agencia Federal para Administración de Emergencias (FEMA) de los Estados Unidos de Norteamérica acepta el uso de procedimientos estáticos y dinámicos para el diseño de sistemas aislados sísmicamente, con requisitos y limitaciones en cada caso, cuyas disposiciones son similares a los lineamientos del ASCE/SEI 7/10 y ASCE/SEI 7/16.

En el ASCE 7-16 y FEMA 2015, se ha planteado una “mejora” en la formulación del método estático para la determinación de los desplazamientos máximos por efectos de torsión en sistemas aislados (cuyo detalle se presenta en el ítem: 2.3).

2.3. Métodos de análisis estático y dinámicos

Los procedimientos estáticos permiten verificar de forma muy rápida y sencilla valores de desplazamientos aproximados sin embargo carecen de la precisión necesaria que proporcionan los métodos dinámicos. En general, cada método cuenta con restricciones de uso tal como se muestra en la Tabla N° 4. A continuación se detalla los métodos que se emplean para el presente trabajo.

Método estático equivalente (ELF)

El método estático (equivalent lateral force - ELF) emplea ecuaciones sencillas para determinar la respuesta de la estructura, es un método basado en desplazamientos. Aunque el procedimiento ELF es considerado un método lineal de análisis, las ecuaciones incorporan valores dependientes a la rigidez y amortiguamiento, tomando en cuenta en las propiedades no lineales del sistema de aislamiento asumiendo que la superestructura es rígida y que los desplazamientos laterales ocurren sobre todo en la interfaz de aislamiento. (Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015)

Las ecuaciones para determinar desplazamientos en la interfaz de aislamiento de la estructura, para el sismo de diseño y para el sismo máximo considerado, vienen dadas por:

$$D_D = \frac{S_a}{\omega^2 B_D} = \frac{S_a}{4\pi^2 B_D} \quad (1)$$

$$D_M = \frac{S_a}{\omega^2 B_M} = \frac{S_a}{4\pi^2 B_M} \quad (2)$$

La Tabla N° 3 presenta un resumen de los trabajos de tesis de Mendo (2015) y Villagómez (2015) para los factores de B_D y B_M , los cuales fueron presentados y propuestos para su aplicación en el Perú. En la misma tabla, de forma referencial, se muestra los valores B_D y B_M que son considerados por los códigos ASCE SEI 7 y NCh2745.

A continuación se presenta la expresión para calcular el periodo efectivo de un sistema aislado en función del peso de la estructura y la rigidez efectiva:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{K \cdot g}} \quad (3)$$

Con el propósito de contemplar los efectos torsionales en el desplazamiento de la interfaz con aislamiento, los códigos ASCE/SEI 7 en sus versiones 2010 y 2016, consideran amplificar el desplazamiento que se produce en el centro de rigidez del sistema multiplicando el desplazamiento “D” por una expresión de amplificación y obteniendo el denominado desplazamiento máximo total “D_T”. Cabe resaltar que para considerar la demanda sísmica de diseño y máxima considerada la expresión “D”, presentada en las ecuaciones (4) y (8) sólo cambia de nomenclatura a “D_D” y “D_M” respectivamente, y de la misma forma “D_T” a “D_{TD}” y “D_{TM}”.

Según ASCE 7-10

Los desplazamientos máximos totales incluidos los efectos de torsión según ASCE 7-10 se presentan:

$$D_T = D \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (4)$$

Se sabe que el radio de giro es:

$$r_I = \sqrt{\frac{b^2 + d^2}{12}} \quad (5)$$

Se puede reescribir la (4) como:

$$D_T = D \left[1 + \frac{ye}{r_I^2} \right] \quad (6)$$

Para efectos de análisis se plantea el factor “α” de amplificación de desplazamientos, el mismo que relaciona para todos los casos el desplazamiento máximo en un punto de interés (D_T) respecto del desplazamiento en el centro de rigidez del sistema aislado (D). (Los parámetros presentados se ilustran en la Figura N° 1).

$$\alpha = \frac{D_T}{D} = \left(1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) = \left(1 + \frac{ye}{r_I^2} \right) \quad (7)$$

Según ASCE 7-16

Los desplazamientos máximos totales incluidos los efectos de torsión según ASCE 7-16 se presentan:

$$D_T = D \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right] \quad (8)$$

$$P_{Te} = \frac{1}{r_I} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}} \quad (9)$$

$$P_{Td} = \frac{T}{T_\theta} \quad (10)$$

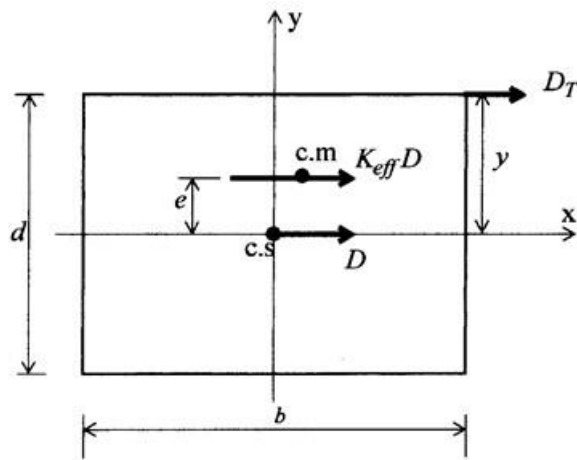
La versión 2016 del ASCE, para determinación de “D_T” por procedimientos estáticos, plantea la incorporación del parámetro “P_T” según lo presentado en las ecuaciones (9) y (10), dicha incorporación basada en la investigación de Wolff et al. (2014), presenta en estricto dos acepciones. La primera: ecuación (9) relaciona directamente la forma geométrica y la distribución de los aisladores en la planta; y la segunda: ecuación (10) relaciona el periodo de traslación respecto del periodo de rotación de un sistema tridimensional.

De la ecuación (8) y (9), podemos expresar D_T como:

$$D_T = D \left[1 + \frac{eyN}{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)} \right] \quad (11)$$

De forma similar a lo presentado en la ecuación (7), el factor “α” según ASCE 7-16, se puede escribir como:

$$\alpha = \frac{D_T}{D} = \left(1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right) = \left(1 + \frac{1}{P_T^2} \cdot \frac{ye}{r_I^2} \right) \quad (12)$$



Fuente: Naeim & Kelly, 1999

Figura N° 1: Esquema de Planta típica para el cálculo del parámetro DT

Tabla N° 3: Factores B_D y B_M

Amortiguamiento efectivo	Factor B_D ó B_M			
	A.Mendo	Villagómez	ASCE 7	NCh2745
2%	0.8	0.8	0.8	0.65
5%	1	1	1	1
10%	1.25	1.25	1.2	1.37
15%	1.5	1.48	1.35	1.66
20%	1.7	1.7	1.5	1.94
30%	2.05	2.1	1.7	2.38
40%	2.35	2.45	1.9	-
50%	2.65	2.75	2	3.02

Fuente: Adaptado de Villagómez (2015) & Mendo (2015)

Método dinámico espectral y tiempo-historia

El análisis dinámico puede realizarse mediante dos métodos aceptados por las normas en estudio: el análisis de respuesta modal espectral y el análisis de respuesta Tiempo-Historia.

Para el análisis espectral, el desplazamiento total de diseño y el desplazamiento total máximo se calculan considerando el 100% de los efectos de la dirección de análisis más el 30% de la dirección perpendicular, justificada en la discusión presentada en la sección 1.2. Para el análisis espectral, se emplea un valor de amortiguamiento modal para el modo fundamental en la dirección de interés. (Villagómez Molero, 2015)

Para el análisis Tiempo – Historia, se usa pares de registros sísmicos, cuya respuesta en referencia al desplazamiento, aceleración y distorsión angular de entrepiso se toma como el promedio de los valores máximos obtenidos de la aplicación de cada par de registros de aceleración escalados sobre los casos analizados. Adicionalmente, cada par de componentes del movimiento de terreno se aplica simultáneamente al modelo de la estructura. El desplazamiento máximo del sistema de aislamiento se calcula mediante la suma vectorial de los desplazamientos ortogonales con el apoyo de la herramienta computacional ETABS (Computer and Structures Inc., 2016).

La cantidad de registros para brindar una respuesta adecuada en estructuras con aislamiento sísmico sugiere usar 11 o más pares cuando el ajuste es pobre según el trabajo de Pant & Maharjan (2016). Por lo que para efectos de superar cualquier limitación en referencia a la cantidad de registros se empleó una mayor cantidad (23 pares de acelerogramas con ajuste espectral en el dominio del tiempo y 20 pares de acelerogramas con ajuste espectral en el dominio de la frecuencia)

Tabla N° 4: Métodos de análisis para estructuras aisladas y sus restricciones según FEMA

Site Condition or Structure Configuration Criteria	ELF Procedure	Modal Response Spectrum Analysis	Seismic Response History Analysis
Site Conditions			
Near-source ($S_I \geq 0.6$)	NP	P	P
Soft soil (Site Class E or F)	NP	NP	P
Superstructure Configuration			
Flexible or irregular superstructure (height > 4 stories, height > 65 ft, or $T_M > 3.0$ sec., or $T_D \leq 3T$)**	NP	P	P
Nonlinear superstructure (requiring explicit modeling of nonlinear elements; <i>Standard</i> Sec. 17.6.2.2.1)	NP	NP	P
Isolation System Configuration			
Highly nonlinear isolation system or system that otherwise does not meet the criteria of <i>Standard</i> Sec. 17.4.1, Item 7	NP	NP	P

* P indicates permitted and NP indicates not permitted by the *Standard*.

** T is the elastic, fixed-base period of the structure above the isolation system.

Fuente: FEMA P-751 (2015)

Criterio mínimo de diseño

Los procedimientos estáticos son importantes para contrastar la respuesta de análisis más rigurosos, tales como el análisis espectral o tiempo-historia, los mismos que al ser más complejos podrían ser susceptibles de errores durante el proceso de análisis. Para reducir la implicancia de posibles errores es aceptable limitar a un determinado porcentaje los resultados provenientes de análisis dinámicos respecto de procedimientos estáticos.

La Tabla N° 5, presenta los criterios mínimos de diseño, la misma presenta la relación que se debe verificar entre procedimientos estáticos y dinámicos.

Tabla N° 5: Resumen de criterios de diseño mínimos para análisis dinámicos

Design Parameter	Response Spectrum Procedure	Response History Procedure
Total design displacement, D_{TD}	90% D_{TD}	90% D_{TD}
Total maximum displacement, D_{TM}	80% D_{TM}	80% D_{TM}
Design force on isolation system, V_b	90% V_b	90% V_b
Design force on irregular superstructure, V_s	100% V_s	80% V_s
Design force on regular superstructure, V_s	80% V_s	60% V_s

(Notación= D_{TD} , D_{TM} : desplazamientos totales máximos de diseño y máximo considerado del análisis estático; V_b , V_s : fuerzas cortantes en la interfaz de aislamiento y superestructura calculado del análisis estático)

Fuente: FEMA P-751 (2015)

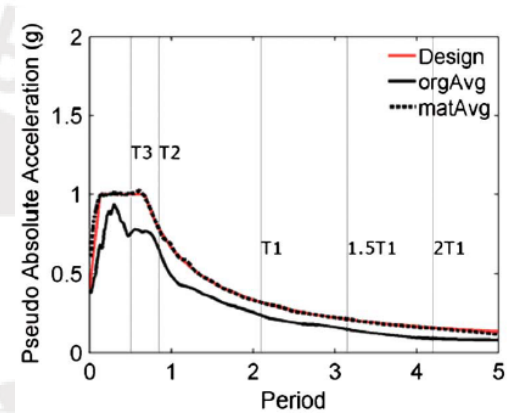
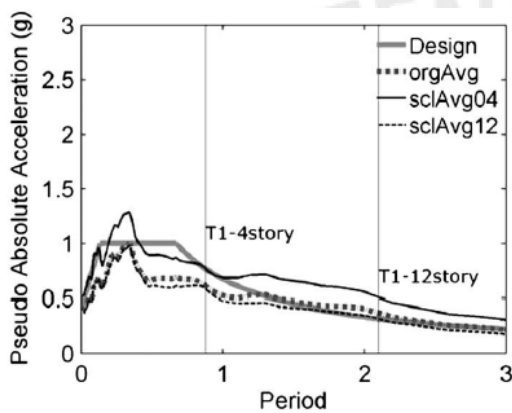
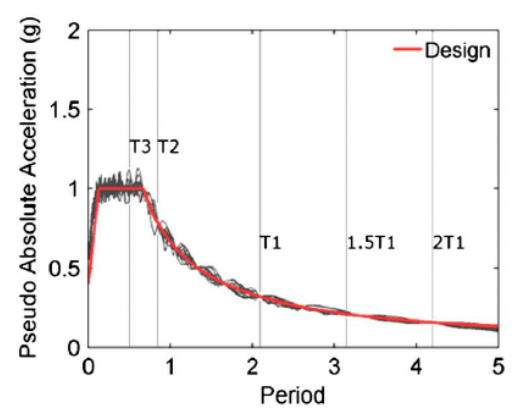
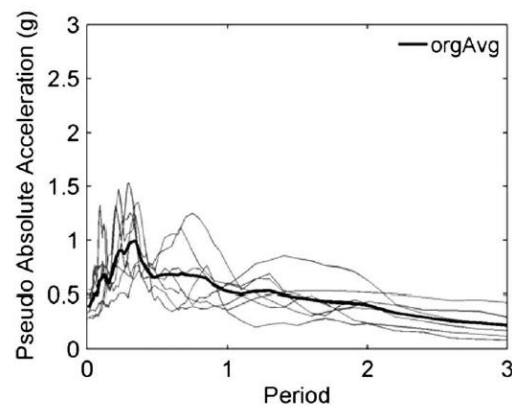
2.4. Métodos de escalamiento de registros

La forma más confiable de modelar el comportamiento de una estructura es por medio de un análisis dinámico no lineal de la respuesta en el tiempo. Para el empleo de estos datos discretos es necesario compatibilizarlos (escalarlos) a un espectro sísmico elástico que represente las acciones sísmicas de diseño del lugar de estudio.

Existen varias investigaciones respecto del método más apropiado para escalar señales sísmicas, sin embargo son aceptados por el ASCE/SEI 7/16, dos métodos para el escalamiento de señales sísmicas:

- Método de ajuste espectral (spectral matching)
- Método de escalamiento por amplitudes o escalamiento lineal (weighted scaling)

La Figura N° 2 presenta, de forma referencial, las formas esquemáticas de los procedimientos de escalamiento.



Escalamiento por amplitudes

Escalamiento por ajuste espectral

(Notación = Design: espectro de diseño, orgAvg: espectro promedio de registros sin escalar, sclAvg04 y sclAvg12 : espectro promedio de un grupo de registros para estructura aporticada de 4 y 12 niveles respectivamente, matAvg: espectro promedio de un grupo de 7 registros).

Figura N° 2: Formas esquemáticas típicas de los procedimientos de escalamiento

Fuente: Heo, et al. (2011)

Ambas metodologías requieren seleccionar un rango de periodos apropiado, aunque el escalamiento solo podría ser llevado para el periodo fundamental de vibración es importante seleccionar un rango de periodos para tomar en cuenta los efectos de los modos más altos. (Pant & Maharjan, 2016)

El presente trabajo toma en cuenta el procedimiento de ajuste espectral. Además, respecto del procedimiento de ajuste espectral, existen 2 técnicas; una de ellas es el ajuste en el dominio de la frecuencia (empleando espectros de Fourier) y el otro el ajuste en el dominio del tiempo (empleando wavelets u ondículas, conforme trabajos de Abrahamson (1992), Hancock et al., (2006), Heo, et al. (2011)).

Ajuste espectral en el dominio de la frecuencia

Es un procedimiento iterativo basado en la corrección de amplitudes del espectro de Fourier para un grupo de acelerogramas de tal forma que sus amplitudes espectrales sean compatibles con los espectros de diseño, manteniendo inalteradas la fase y duración de las señales originales. (CISMID - UNI, 2013)

Ajuste espectral en el dominio del tiempo

El ajuste en el dominio del tiempo realiza una modificación del registro de aceleraciones para hacerlo compatible con espectro de respuesta especificado, adicionando para ello fragmentos de ondas (wavelets). Está basado en el algoritmo de Abrahamson (1992) y Hancock et al. (2006); múltiples optimizaciones posteriores se han realizado y se plasmaron en diferentes herramientas computacionales tal como SeismoMatch de SeismoSoft. El procedimiento busca mantener las características no estacionarias de los movimientos reales del registro original bajo una tolerancia definida.

2.5. Comportamiento mecánico de dispositivos de aislamiento de base

El comportamiento no lineal de los dispositivos de aislamiento puede ser representado a través del modelo bilineal como el mostrado en la Figura N° 3. En donde se observa una primera etapa elástica determinada por la rigidez inicial K_1 y el desplazamiento y fuerza de fluencia, D_y y F_y respectivamente. La etapa plástica definida por la rigidez post-fluencia K_2 y el desplazamiento y fuerza máximos, D y F_{max} respectivamente. Además, la intersección del lazo con el eje vertical se denomina resistencia característica (Q).

Del modelo inelástico del dispositivo de aislamiento es posible extraer los parámetros: rigidez efectiva (K_{eff}) y amortiguamiento efectivo (β_{eff}), ello con el propósito de realizar un modelo lineal equivalente que es útil durante la etapa de diseño y que permite representar un sistema aislado de forma simplificada.

El modelo no considera deterioro de propiedades entre ciclo y ciclo además solo tres parámetros de los indicados son necesarios para describir el modelo. Por otra parte es necesario indicar que entre los parámetros de cálculo está el desplazamiento de fluencia D_y , sin embargo algunos investigadores indican que este parámetro no tiene mayor importancia en el cálculo de desplazamientos de una estructura aislada y consecuentemente en la fuerza cortante sobre la interfaz de aislamiento. (Ozdemir & Constantinou, 2010).

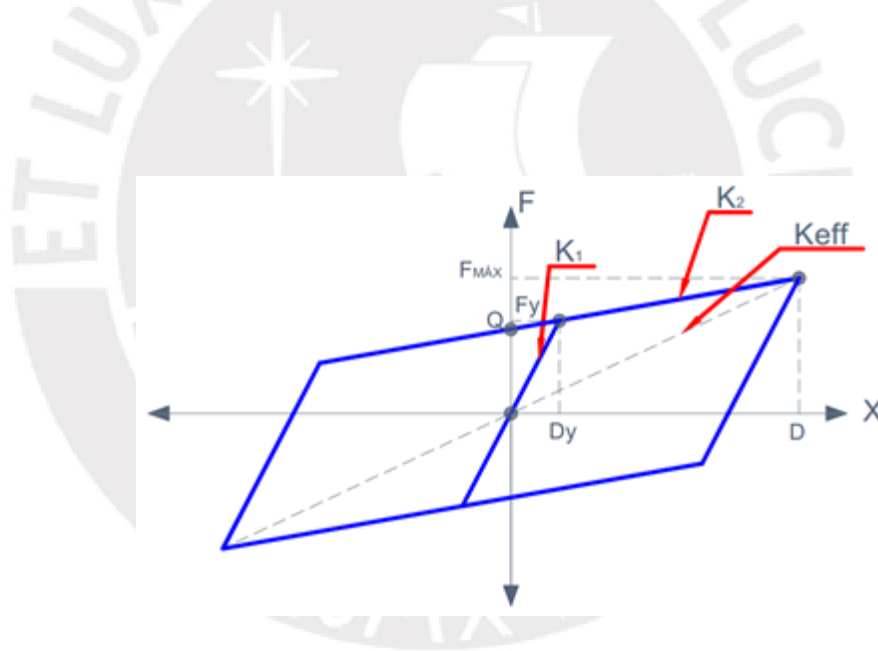


Figura N° 3: Modelo bilineal para representar el comportamiento inelástico de un aislador elastomérico

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento del modelo no lineal del aislador son:

$$K_{eff} = K_2 + \frac{Q}{D} \quad (13)$$

$$D_y = \frac{Q}{K_1 - K_2} \quad (14)$$

$$F_y = Q + K_2 \cdot D_y \quad (15)$$

$$W_D = 4Q(D - D_y) \quad (16)$$

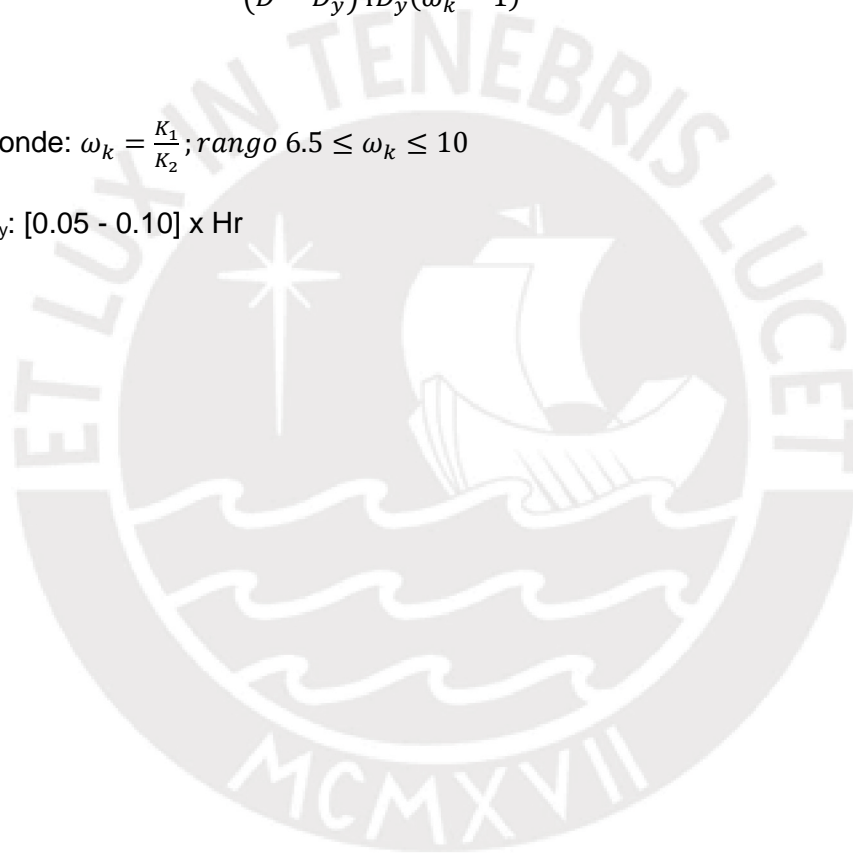
$$\beta_{eff} = \frac{W_D}{2\pi K_{eff} \cdot D^2} \quad (17)$$

Usando W_D de (17) y Q de (14) en (16), se obtiene para K_2 :

$$K_2 = \frac{2\pi \cdot \xi \cdot K_{eff} D^2}{(D - D_y) 4D_y (\omega_k - 1)} \quad (18)$$

Donde: $\omega_k = \frac{K_1}{K_2}$; rango $6.5 \leq \omega_k \leq 10$

D_y : [0.05 - 0.10] x Hr



CAPITULO III: MODELO EN ESTUDIO

3.1. Estructuración de los casos de estudio

El modelo para el presente estudio es representado por una estructura conformada por pórticos de concreto armado con aisladores elastoméricos ubicados debajo de cada columna. Los edificios de los casos analizados no poseen una asignación de uso en particular, sin embargo las cargas del modelo se basaron en edificios del tipo hospitalario.

Las estructuras tienen una configuración regular y simétrica en ambos ejes coordenados (X, Y), considerándose para el estudio: 3 plantas típicas, 2 alturas típicas y 3 niveles de excentricidad bidireccional de su correspondiente longitud en planta (0%, 5% y 10%), constituyendo en total 18 configuraciones de análisis. Cabe resaltar que de acuerdo a diversas investigaciones, presentadas en la sección 1.2, la excentricidad del centro de masas de cada entrepiso (C.M.) respecto del centro de rigidez (C.R.) de la interfaz de aislamiento representa teóricamente la situación más crítica respecto de la respuesta estructural de desplazamiento. Se ilustra lo indicado en la Figura N° 4.

Los entrepisos y plataforma de aislamiento están planteadas como losas macizas, las vigas y columnas poseen dimensiones constantes en toda su altura. Las dimensiones de los elementos se presentan en la Tabla N° 6. La resistencia del concreto especificada para el modelo numérico en sus diferentes configuraciones es $f'c=280 \text{ kgf/cm}^2$.

Se ignoran efectos verticales, se toma como valido la hipótesis del diafragma rígido, no se considera efectos a nivel del suelo u otro aspecto mencionado en la sección 1.6.

Las plantas típicas y sus correspondientes porcentajes de excentricidad se pueden visualizar en la Figura N° 4, así mismo las 02 elevaciones típicas (4 y 8 pisos) se ilustran en la Figura N° 5 donde el primer nivel es de 3.50m de alto y 3.00m es la altura típica.

Las distancias entre ejes se presentan en términos de L cuyo valor para los casos desarrollados es de 7.00 m, el número de claros en cada dirección viene representado por la cantidad de veces que se repite “L” cuyo valor no es trivial debido a que influye en la determinación del parámetro “P_{Te}”. En general las relaciones de aspecto de sus dimensiones en planta son 1:1, 1:2 y 1:3 siendo la dirección “X” la dimensión sobre la cual se alargan las plantas de cada caso.

Para el cálculo de la masa sísmica se han seguido los lineamientos de la norma técnica de edificaciones E.020 y E.030, las cargas distribuidas se detalla en *Tabla N° 7*.

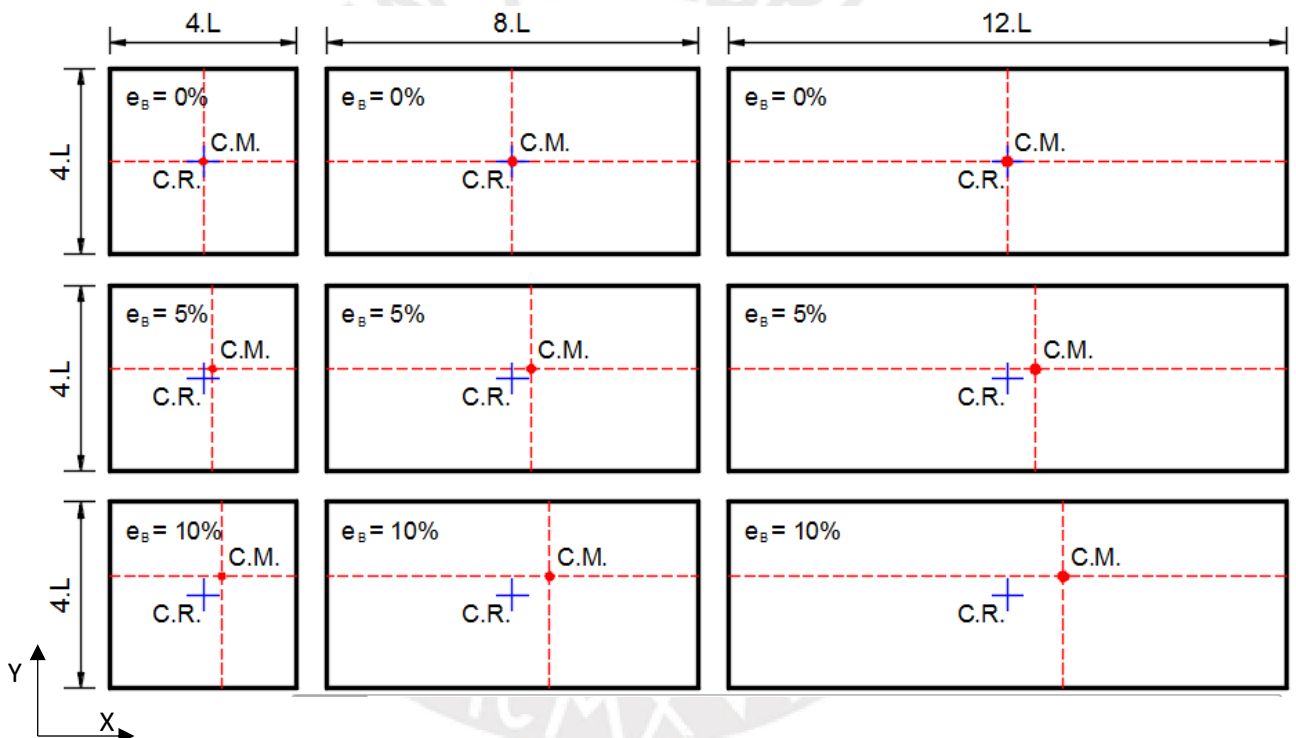


Figura N° 4: Plantas típicas consideradas en las estructuras de 4 y 8 niveles con excentricidades bidireccionales de 0%, 5% y 10% de sus longitudes en planta.

Horizontal=X, Vertical=Y.

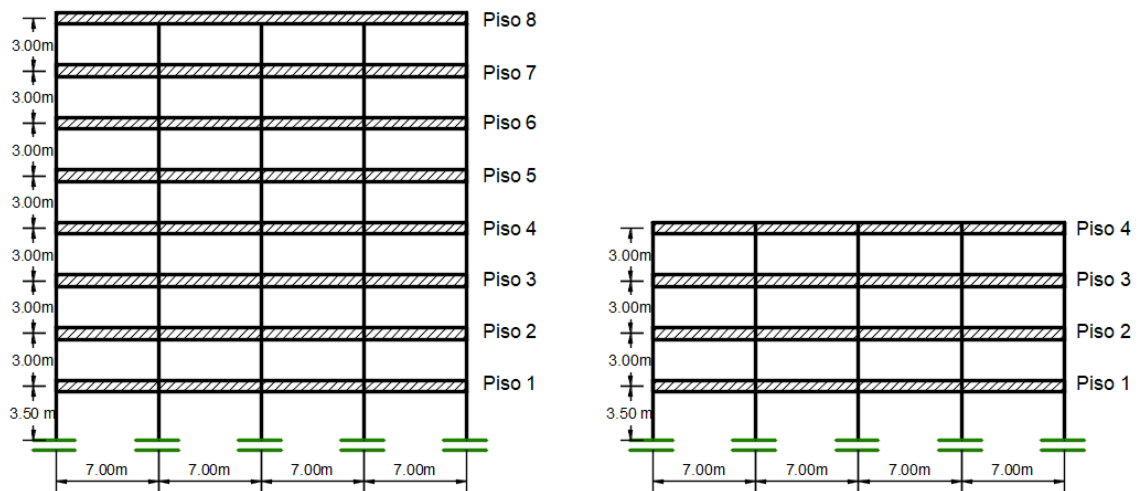


Figura N° 5: Modelo en elevación con 4 y 8 pisos para cada planta típica

Tabla N° 6: Dimensiones de elementos de la superestructura y plataforma de aislamiento

Superestructura

Descripción	Unidad	Nro de Pisos	
		4	8
Columnas	m	0.40x0.40	0.75x0.75
Vigas	m	0.25x0.50	0.30x0.50

Plataforma de Aislamiento

Descripción	Unidad	Dimensiones
Dados de C°	m	1.00 x 1.00
Vigas de plataforma	m	1.00x0.50

Tabla N° 7: Pesos unitarios considerados para el modelo

Pesos

Descripción	Unidad	Cantidad
Losa Maciza 15cm	Kgf/m ²	360
Piso Terminado	Kgf/m ²	100
Tabiquería	Kgf/m ²	200
S/C - (Viva)	Kgf/m ²	300
S/C - (Azotea)	Kgf/m ²	100

Identificación de los casos analizados

Los casos en análisis se identificaron por el número de luces entre columnas y su altura correspondiente, considerando 4 aspectos y secuencias de codificación: *1ro*: se toma el número de segmentos en la dirección "X", *2do*: se toma el número de segmentos en la dirección "Y", *3ero*: se nombra el número de pisos y *4to*: se indica la excentricidad asociada de cada caso. (Por ejemplo la estructura 8x4.p4(0) : representa a un edificio con planta cuadrada de 8 paños en la dirección "X", 4 paños en la dirección "Y", 4 pisos y 0% de excentricidad bidireccional asignada).

3.2. Periodos fundamentales de vibración en los casos de edificios de base fija y base aislada

La Tabla N° 8 presenta los periodos fundamentales en base fija y en base aislada para los 18 casos planteados con las dimensiones, cargas y resistencia especificada.

Los periodos de estructuras en base aislada son del orden de 3 a 3.5 veces los periodos de base fija. El rango de periodos para el modo fundamental 1 está entre los 3.06 segundos a 5.42 segundos, que se obtuvieron luego de fases iterativas.

Tabla N° 8: Periodos fundamentales en edificios de base fija y aislada

Nro	Modelo	Periodos base fija (segundos)			Periodos base aislada (segundos)		
		Modo 1	Modo 2	Modo 3	Modo 1	Modo 2	Modo 3
1	4x4.p4(0)	1.00	1.00	0.85	3.06	3.06	2.60
2	4x4.p4(5)	1.03	1.00	0.83	3.25	3.15	2.60
3	4x4.p4(10)	1.10	1.00	0.78	3.67	3.35	2.60
4	8x4.p4(0)	1.04	1.02	0.93	3.18	3.18	2.85
5	8x4.p4(5)	1.08	1.02	0.89	3.45	3.31	2.85
6	8x4.p4(10)	1.16	1.02	0.83	3.97	3.55	2.84
7	12x4.p4(0)	1.05	1.03	0.98	3.23	3.22	2.99
8	12x4.p4(5)	1.11	1.03	0.93	3.57	3.39	2.98
9	12x4.p4(10)	1.20	1.03	0.86	4.16	3.66	2.98
10	4x4.p8(0)	1.30	1.30	1.12	4.01	4.01	3.42
11	4x4.p8(5)	1.34	1.30	1.09	4.27	4.14	3.43
12	4x4.p8(10)	1.43	1.30	1.02	4.83	4.40	3.43
13	8x4.p8(0)	1.34	1.30	1.21	4.15	4.14	3.73
14	8x4.p8(5)	1.40	1.31	1.16	4.50	4.31	3.72
15	8x4.p8(10)	1.50	1.31	1.07	5.18	4.62	3.71
16	12x4.p8(0)	1.36	1.30	1.27	4.20	4.19	3.89
17	12x4.p8(5)	1.43	1.31	1.20	4.65	4.41	3.89
18	12x4.p8(10)	1.55	1.31	1.11	5.42	4.75	3.88

3.3. Rigideces y amortiguamiento

La rigidez lineal efectiva para cada estructura se determina directamente despejando “K” de la ecuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}} \quad (19)$$

La razón de amortiguamiento crítico objetivo es del 15%. Los parámetros de ingreso para establecer las propiedades bilineales de los dispositivos considera la relación de rigidez inicial (K_1) respecto de la rigidez post-fluencia (K_2) igual a 10 y desplazamientos de fluencia (D_y) igual a 0.01 m para todos los dispositivos elastoméricos.

La Tabla N° 9 presenta el resumen de parámetros bilineales para el ingreso en el software ETABS, los mismos que fueron obtenidos luego de una secuencia iterativa.

Tabla N° 9: Parámetros de caracterización del aislador con propiedades lineales y bilineales

Nro	Modelo	Cantidad Aisladores	Parametros modelo Lineal		Parametros modelo Bi-Lineal		
			Kb(aisl)	ξ	Stiffness (K1)	Yield Stregth (F _y)	Post Yield
		[und]	[tonf/m]	%	tonf/m	tonf	Stiffness Ratio
1	4x4.p4(0)	25	98	15%	865	4.55	0.10
2	4x4.p4(5)	25	92	15%	812	4.28	0.10
3	4x4.p4(10)	25	81	15%	717	3.74	0.10
4	8x4.p4(0)	45	99	15%	873	4.65	0.10
5	8x4.p4(5)	45	91	15%	804	4.32	0.10
6	8x4.p4(10)	45	79	15%	699	3.65	0.10
7	12x4.p4(0)	65	99	15%	879	4.62	0.10
8	12x4.p4(5)	65	90	15%	790	4.22	0.10
9	12x4.p4(10)	65	77	15%	681	3.47	0.10
10	4x4.p8(0)	25	109	15%	958	5.20	0.10
11	4x4.p8(5)	25	102	15%	901	4.73	0.10
12	4x4.p8(10)	25	89	15%	794	4.09	0.10
13	8x4.p8(0)	45	111	15%	983	5.24	0.10
14	8x4.p8(5)	45	102	15%	909	4.71	0.10
15	8x4.p8(10)	45	89	15%	790	3.94	0.10
16	12x4.p8(0)	65	112	15%	993	5.22	0.10
17	12x4.p8(5)	65	101	15%	895	4.64	0.10
18	12x4.p8(10)	65	86	15%	770	3.82	0.10

Por último, la Figura N° 6 muestra los códigos de colores y formas para la presentación de los resultados, siendo el color rojo para el caso de edificios con plantas cuya relación de aspecto es 1:1, amarillo para representar edificios con plantas cuya relación de aspecto es 1:2 y azul para representar edificios con plantas cuya relación de aspecto es 1:3. Cada color posee una forma adicional que varía según el número de pisos de cada caso, así mismo sobre cada configuración estructural se asigna las tres excentricidades indicadas previamente.

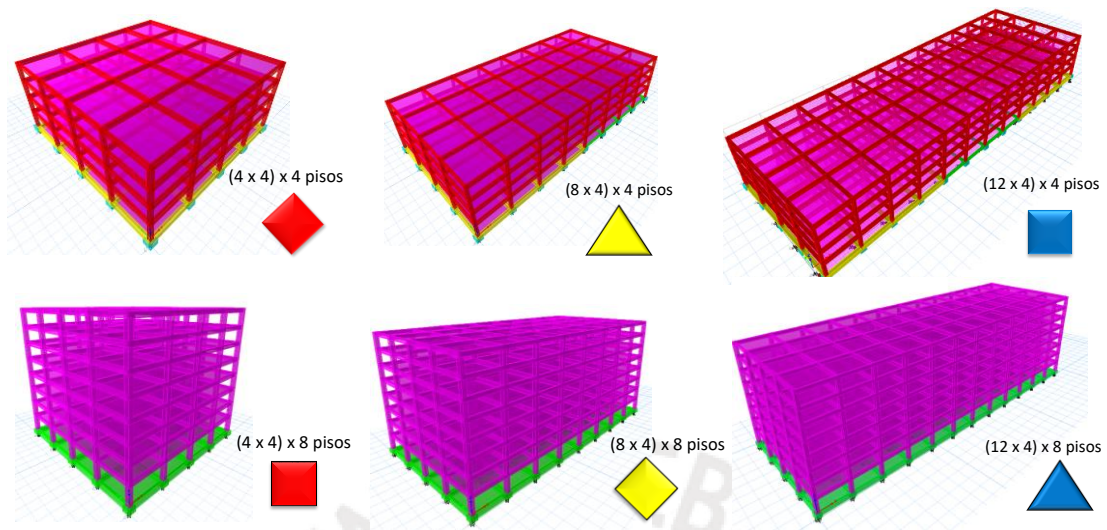
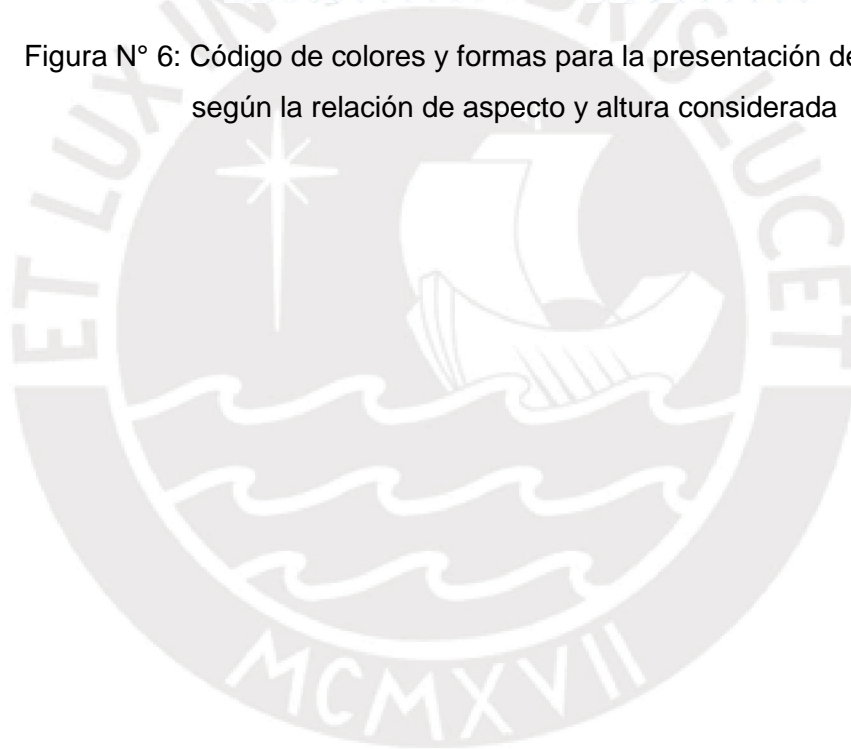


Figura N° 6: Código de colores y formas para la presentación de resultados según la relación de aspecto y altura considerada



CAPITULO IV: ANÁLISIS SÍSMICO

4.1. Demanda sísmica

La demanda sísmica está determinada por las aceleraciones a nivel de diseño para zona sísmica 4 y para el perfil de suelo S1 según la norma técnica peruana de edificaciones E.030 (2018). Cabe indicar que el sismo de diseño corresponde a un evento equivalente a un evento sísmico con 10% de probabilidad de excedencia en 50 años y un sismo máximo considerado corresponde a un evento con 2% de probabilidad de excedencia en 50 años.

Los registros de aceleraciones han sido tomados de las bases de datos de aceleraciones de movimiento de terreno del CISMID, USGS y StrongMotion. Los eventos sísmicos considerados poseen fuente sísmo-génica correspondiente a fenómenos de subducción de placas del Círculo de Fuego del Pacífico.

4.2. Pares de registros de aceleración para análisis tiempo-historia

El proceso de análisis del presente proyecto se realizó empleando la respuesta promedio de 23 pares de registros espectro compatibles, la cantidad de registros de aceleración se dio con el objeto de reducir cualquier posible sesgo que podría producirse por un inadecuado ajuste. La técnica de ajuste para que los acelerogramas resulten compatibles con el espectro de diseño se realizó con la técnica propuesta por Abrahamson (1992) denominada ajuste espectral en el dominio del tiempo, con la herramienta computacional SeismoMatch (SeismoSoft 2016).

Como medio de verificación de las respuestas promedio de los 23 pares ajustados en el dominio del tiempo, se empleó un juego adicional de 20 pares de registros ajustados en el dominio de la frecuencia, el software empleado para este último proceso de escalamiento es el SeismoArtif (SeismoSoft 2016).

La Tabla N° 10, presenta los 23 pares de registros de aceleración de eventos sísmicos empleados y su correspondiente duración.

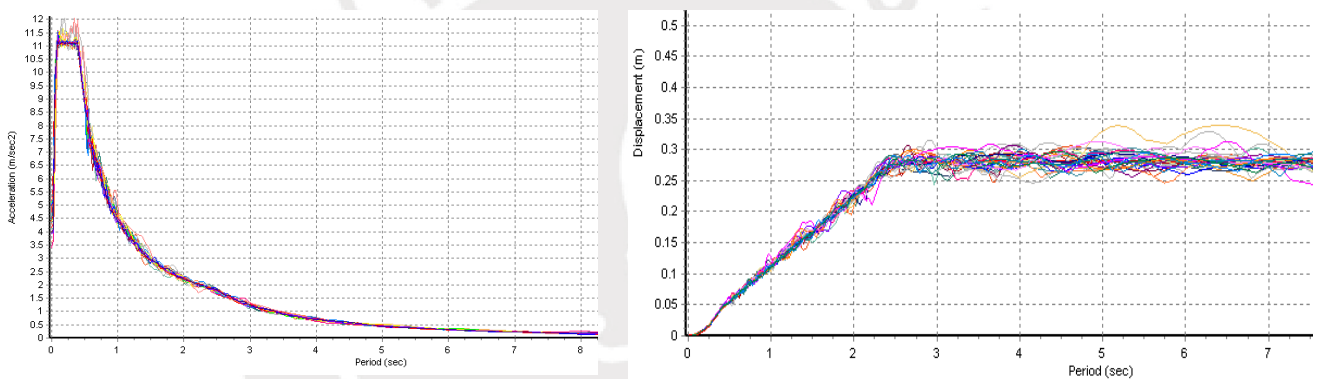
Tabla N° 10: Pares de registros de aceleración considerados

Nro	Sismo	Estación	Mw	Componente	PGA cm/s ²	Factor escala (*)	Duración seg.
1	Lima 1966	Parque de la Reserva	8.10	EW	180.56	2.44	65.64
				NS	268.24	1.65	65.64
2	Lima 1974	Parque de la Reserva	6.60	EW	194.21	2.27	97.96
				NS	180.09	2.45	97.96
3	Arequipa-Moquegua 2001	Estación Characato	6.90	EW	138.50	3.19	198.9
				NS	125.43	3.52	198.9
5	Arequipa-Moquegua 2001	César Vizcarra Vargas	6.90	EW	295.15	1.50	198.9
				NS	219.99	2.01	198.9
4	Hiroshima 2001	Hiroshima	6.40	L	55.39	7.97	124.95
				T	84.30	5.24	124.95
6	Miyagi 2003	Miyagi	7.00	EW	650.90	0.68	99.99
				NS	809.10	0.55	99.99
7	Tarapaca 2005	Cuya	7.80	L	428.53	1.03	75.725
				T	440.25	1.00	75.725
8	Tarapaca 2005	Pica	7.80	EW	720.47	0.61	74.99
				NS	532.91	0.83	74.99
9	Pisco 2007	Dirección de Hidrografía y Navegación	7.00	EW	101.03	4.37	124.98
				NS	95.76	4.61	124.98
10	Pisco 2007	UNICA	7.00	EW	272.82	1.62	124.98
				NS	333.66	1.32	124.98
11	Pisco 2007	Jorge Alva Hurtado	7.00	EW	73.89	5.97	163.84
				NS	46.89	9.41	163.84
12	Maule 2010	Concepción San Pedro	8.80	L	598.41	0.74	149.98
				T	637.65	0.69	149.98
13	Maule 2010	Concepción CONCP	8.80	L	393.21	1.12	141.68
				T	280.47	1.57	141.68
14	Maule 2010	Curico	8.80	T	401.22	1.10	149.98
				NS	461.00	0.96	149.98
15	Maule 2010	Constitución	8.80	L	541.51	0.82	89.87
				T	627.84	0.70	89.87
16	Norte de Chile 2014	Chusmiza	8.20	EW	231.60	1.91	99.985
				NS	355.60	1.24	99.985
17	Norte de Chile 2014	Limon Verde	8.20	EW	15.60	28.30	99.985
				NS	13.80	31.99	99.985
18	Valparaiso 2017	Torpederas	6.90	EW	889.00	0.50	70.15
				NS	731.00	0.60	70.15
19	Artificial 1	Artificial 1	8.50	EW	441.45	1.00	148.62
				NS	441.45	1.00	148.62
20	Artificial 2	Artificial 2	8.50	EW	441.45	1.00	149.96
				NS	441.45	1.00	149.96
21	Artificial 3	Artificial 3	8.50	EW	441.45	1.00	119.98
				NS	441.45	1.00	119.98
22	Artificial 4	Artificial 4	8.50	EW	441.45	1.00	119.98
				NS	441.45	1.00	119.98
23	Artificial 5	Artificial 5	8.50	EW	441.45	1.00	119.98
				NS	441.45	1.00	119.98

(*) Factor de escala al PGA del espectro Suelo S1, Zona 4. Valor referencial debido a que el escalamiento del acelerograma se realizó modificando amplitudes (en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo).

4.3. Acelerogramas espectro compatibles

Los registros de aceleración se han corregido por línea base y pasabanda. El ajuste al espectro normativo ha sido realizado con la técnica SpectralMatching, conforme lo explicado en el ítem 2.2 del presente documento. En la Figura N° 7 se aprecia la compatibilidad entre los espectros de respuesta y los espectros de diseño, tanto en aceleración como en desplazamiento. El rango de periodos considerados para el ajuste de registros va desde 0.02 segundos hasta los 7.5 segundos



Espectros de respuesta de aceleraciones

Espectros de respuesta de desplazamientos

Figura N° 7: Formas espectrales de los registros escalados.

4.4. Resultados del análisis estático

Para analizar el fenómeno físico relacionado a la estimación de desplazamientos incluidos los efectos de torsión empleando el procedimiento estático del ASCE 7-10 y 7-16 se emplearon las ecuaciones indicadas en el ítem 2.3. La Tabla N° 11, presenta el resumen los datos empleados las ecuaciones de la sección 2.3 para estimar el máximo desplazamiento en cada caso en estudio.

Para la presentación de resultados y discusión de los mismos se empleó el factor de amplificación de desplazamientos (" α_x " o " α_y ") correspondiente a las direcciones ortogonales "X" e "Y" respectivamente. Como se indicó previamente, este representa la relación de desplazamientos en la esquina más crítica del edificio (i) y los desplazamientos correspondientes al centro de rigidez del edificio en análisis, las expresiones para determinar " α " se muestra en la sección 2.3 del presente trabajo.

De manera referencial se presenta algunas relaciones de " α_x " en la Figura N° 11, sin embargo el presente trabajo se concentra en analizar los máximos desplazamientos que se presentan en el sistema de aislamiento sísmico, es decir, en la dirección "Y" y por ende los correspondientes valores de " α_y " (debido a que la menor oposición al desplazamiento lateral a nivel de interfaz de aislamiento se produce en la dirección "Y").

El ASCE 7-10 emplea directamente parámetros relacionados a dimensiones en planta y excentricidad del centro de masa determinado por medio de la ecuación (4), ignorando por la influencia del número de niveles de entrepiso o la distribución de los aisladores en planta.

El ASCE 7-16 además de las variables empleadas en el procedimiento del ASCE 7-10 incorpora el parámetro " P_T " que tiene dos acepciones, una mediante la ecuación (9) y la otra por medio de la ecuación (10); en estas ecuaciones el ASCE 7-16 reconoce que existe influencia en la distribución de los aisladores en la interfaz de aislamiento. Para el presente trabajo el factor PT obtenido por la ecuación (9) es denominado PTe y el determinado por la ecuación (10) es denominado PTd.

En general los desplazamientos obtenidos del análisis estático se multiplican por 1.044 para tomar en cuenta la bidireccionalidad (regla 100%-30%) de la excitación sísmica considerada en los análisis tiempo historia y espectral

Tabla N° 11: Datos para la determinación de la respuesta torsional por procedimientos estáticos ASCE 7-10 y ASCE 7-16

Nro	Modelo	Dimens. en planta		Excentricidad en sentido "X"	Distancia perpendicular entre CR y punto de interes	PT según ASCE 7/16			
		b	d			Obtenido de relaciones geométricas (*)		Obtenido de relación de periodos del modelo 3D (**)	
		[m]	[m]	e(x) [m]	[m]	PTe _(X)	PTe _(Y)	PTd _(X)	PTd _(Y)
1	4x4.p4(0)	28	28	0.0	14	1.22	1.22	1.18	1.18
2	4x4.p4(5)	28	28	1.4	14	1.24	1.24	1.21	1.25
3	4x4.p4(10)	28	28	2.8	14	1.27	1.27	1.29	1.41
4	8x4.p4(0)	56	28	0.0	28	1.14	1.14	1.11	1.12
5	8x4.p4(5)	56	28	2.8	28	1.15	1.15	1.16	1.21
6	8x4.p4(10)	56	28	5.6	28	1.19	1.19	1.25	1.40
7	12x4.p4(0)	84	28	0.0	42	1.10	1.10	1.08	1.08
8	12x4.p4(5)	84	28	4.2	42	1.11	1.11	1.14	1.20
9	12x4.p4(10)	84	28	8.4	42	1.15	1.15	1.23	1.40
10	4x4.p8(0)	28	28	0.0	14	1.22	1.22	1.17	1.17
11	4x4.p8(5)	28	28	1.4	14	1.24	1.24	1.21	1.25
12	4x4.p8(10)	28	28	2.8	14	1.27	1.27	1.28	1.41
13	8x4.p8(0)	56	28	0.0	28	1.14	1.14	1.11	1.11
14	8x4.p8(5)	56	28	2.8	28	1.15	1.15	1.16	1.21
15	8x4.p8(10)	56	28	5.6	28	1.19	1.19	1.25	1.40
16	12x4.p8(0)	84	28	0.0	42	1.10	1.10	1.08	1.08
17	12x4.p8(5)	84	28	4.2	42	1.11	1.11	1.13	1.20
18	12x4.p8(10)	84	28	8.4	42	1.15	1.15	1.23	1.40

(*) Determinado según ecuación (9)

(**) Determinado según ecuación (10)

La Figura N° 16 presenta los desplazamientos totales máximos en la esquina del sistema de aislamiento, el eje de las abscisas presenta los desplazamientos calculados con la ecuación (4), el eje de las ordenadas presenta los desplazamientos calculados con las ecuaciones (8) y (9). Las ecuaciones indicadas se presentan en la sección 2.3.

La Figura N° 17 presenta un gráfico similar al presentado en la Figura N° 16 variando parámetros de cálculo para el eje de las ordenadas, cuyo valor ha sido calculado con las ecuaciones (8) y (10). Las ecuaciones indicadas se presentan en la sección 2.3.

Un análisis detallado del parámetro PT según las ecuaciones (9). y (10) para la determinación de los desplazamientos máximos según el método ELF del ASCE 7-16 se presenta en las figuras Figura N° 9, Figura N° 11 y Figura N° 15, donde se aprecia la diferencia que existen entre las acepciones de la, teorica, misma expresion especialmente para relaciones de aspecto mayor independientemente del numero de pisos.

La Figura N° 8 y Figura N° 9 ilustra la comparación de las deficiones establecidas por el ASCE 7-16 en relación a la relación de periodos traslacionales respecto de los rotacionales "PT" tanto para la dirección "Y" como para la dirección "X". Siendo el eje de las abscisas los valores de PT determinadas por la formulas de la ecuación (9) y mostrado en cada grafica, y el eje de las ordenadas es el PT determinado a partir de la relación de periodos de los casos numericos 3D extraidos de la herramienta computacional ETABS y calculado conforme la ecuación (10).

La Figura N° 10 y Figura N° 11 presenta los factores de amplificación entre el aislador de la esquina con mayor desplazamiento respecto del centroide del edificio con 0% de excentricidad ($\alpha = D_T/D$) para cada dirección de análisis. Los valores de "α" empleando PT corresponden a los valores mostrados en la Figura N° 8 y Figura N° 9 en los ejes correspondientes y en cada dirección de análisis.

La Figura N° 14 y Figura N° 15 presenta los desplazamientos máximos correspondientes a la Figura N° 10 y Figura N° 11, que representa el desplazamiento en la esquina de cada edificio analizado obtenido como producto del desplazamiento del centroide por el factor de amplificación de cada caso.

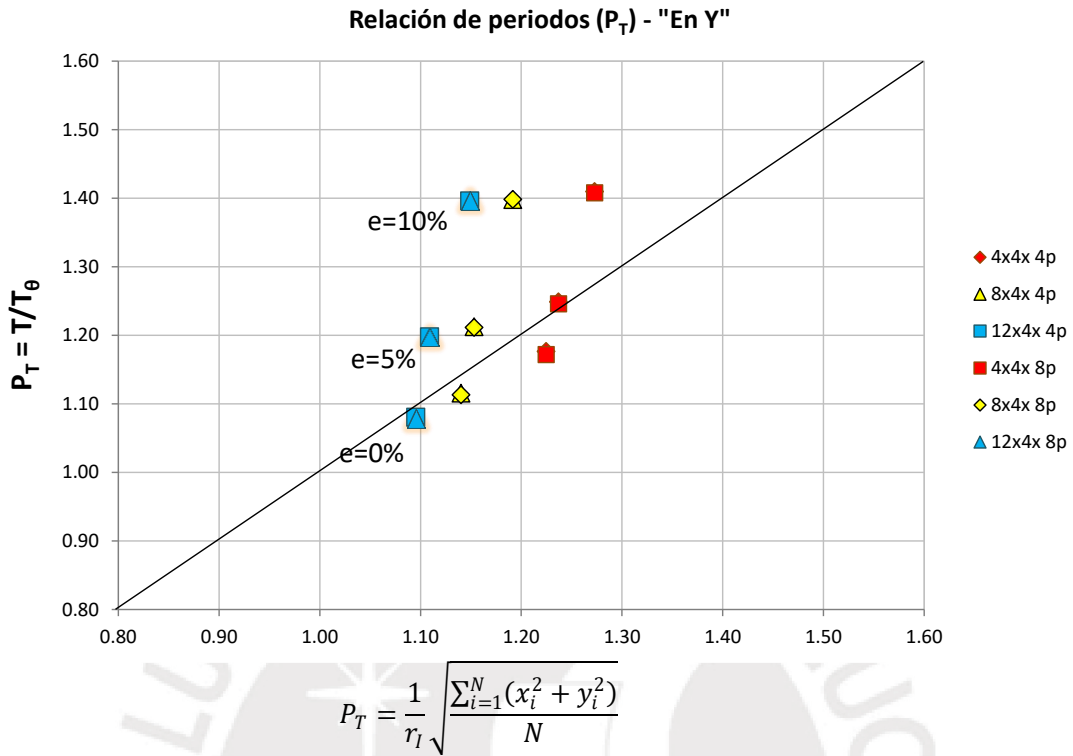


Figura N° 8: Variación del factor P_T según definición del ASCE 7-16 – dirección Y

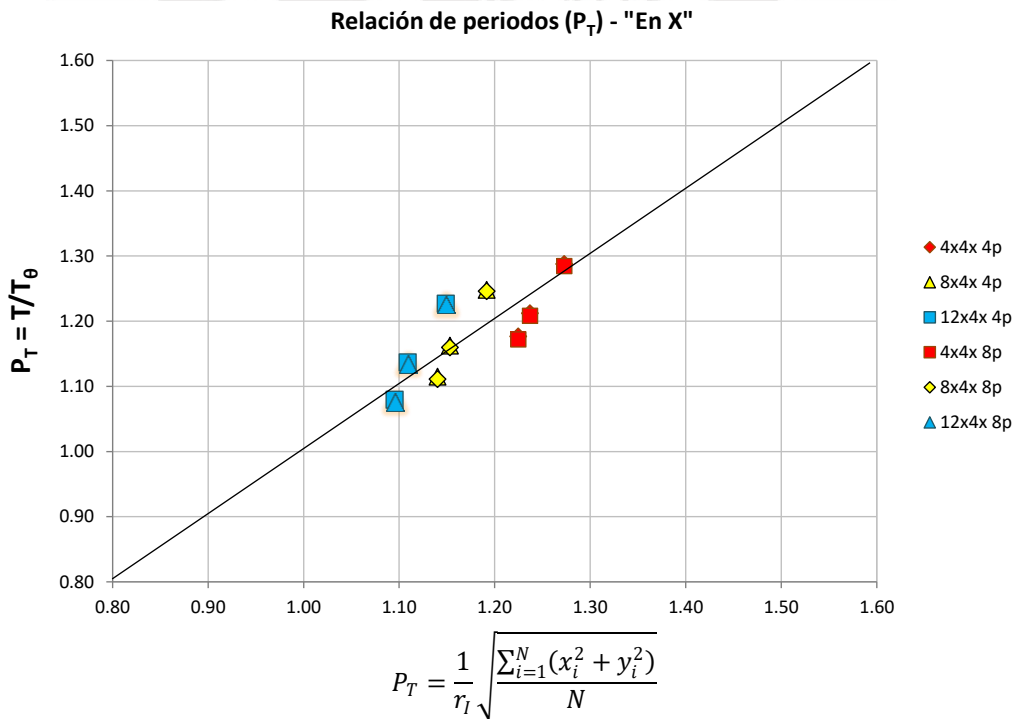


Figura N° 9: Variación del factor P_T según definición del ASCE 7-16– dirección X

Factores de Amplificación ASCE 7/16
f(P_T) - "En Y"

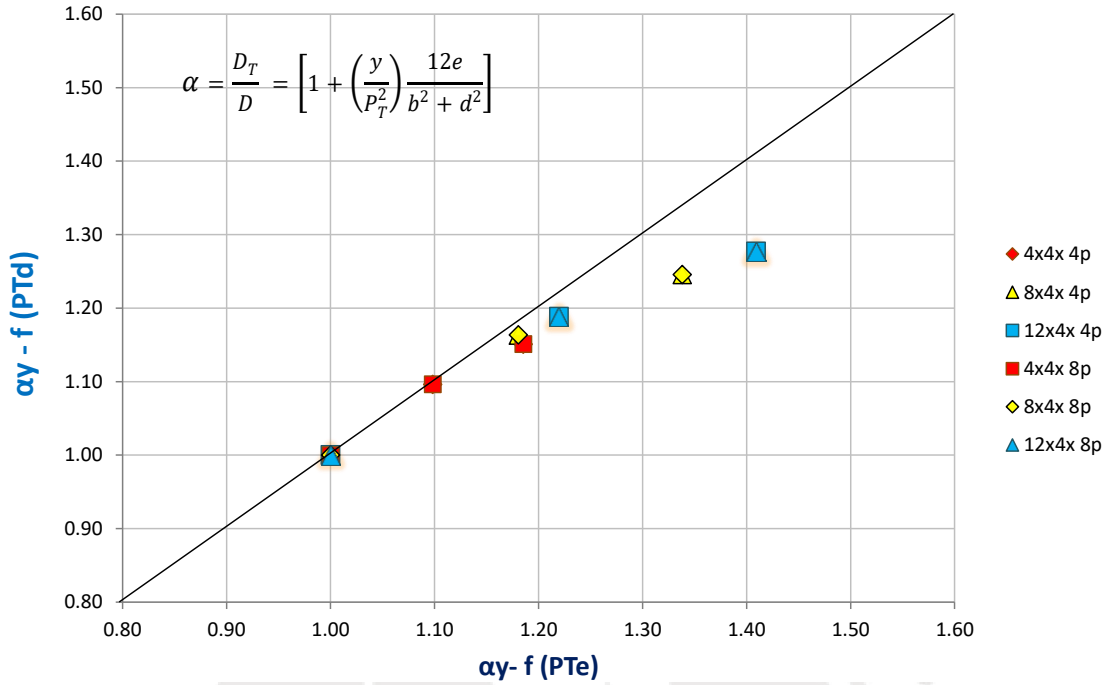


Figura N° 10: Factores de amplificación de desplazamientos en función de PT del ASCE 7-16– dirección Y

Factores de Amplificación ASCE 7/16
f(P_T) - "En X"

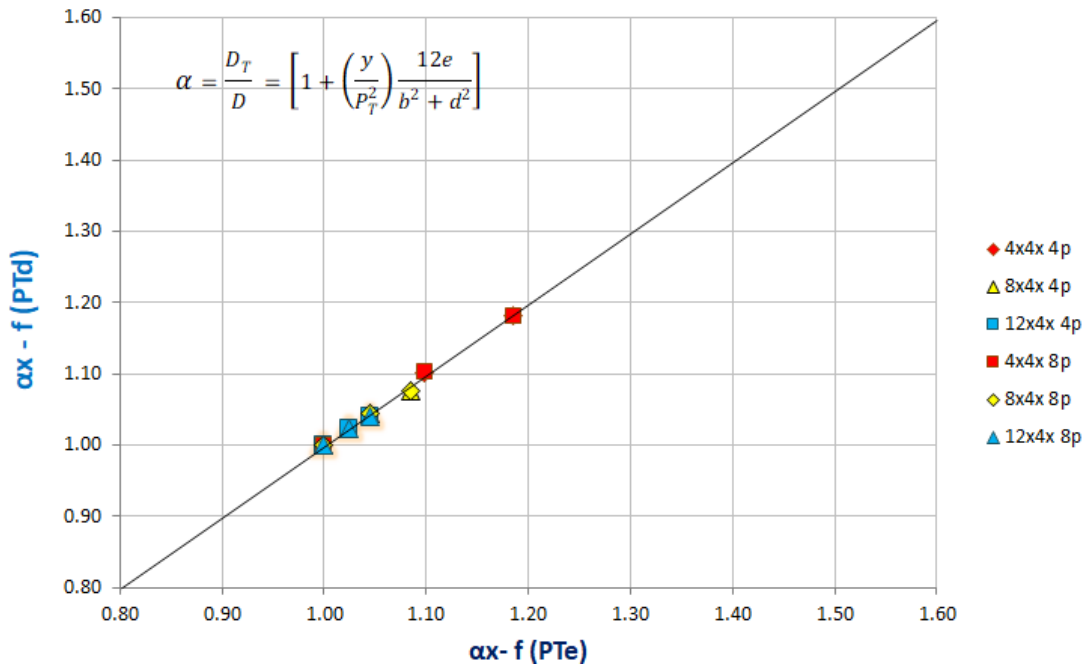


Figura N° 11: Factores de amplificación de desplazamientos en función de PT del ASCE 7-16– dirección X

Factores de Amplificación ASCE 7/16
f(P_T) - "En X"

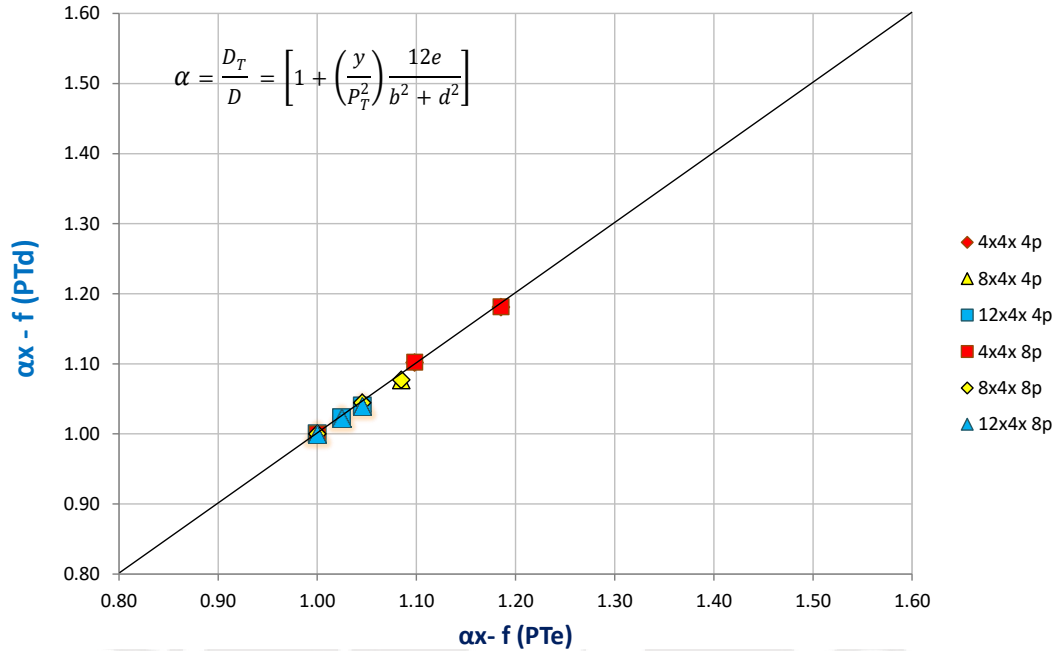


Figura N° 12: Factores de amplificación según ASCE 7-10 y según ASCE 7-16 en función de PTd – dirección Y

Factores de Amplificación ASCE 7/10 vs ASCE 7/16
"En dirección Y"

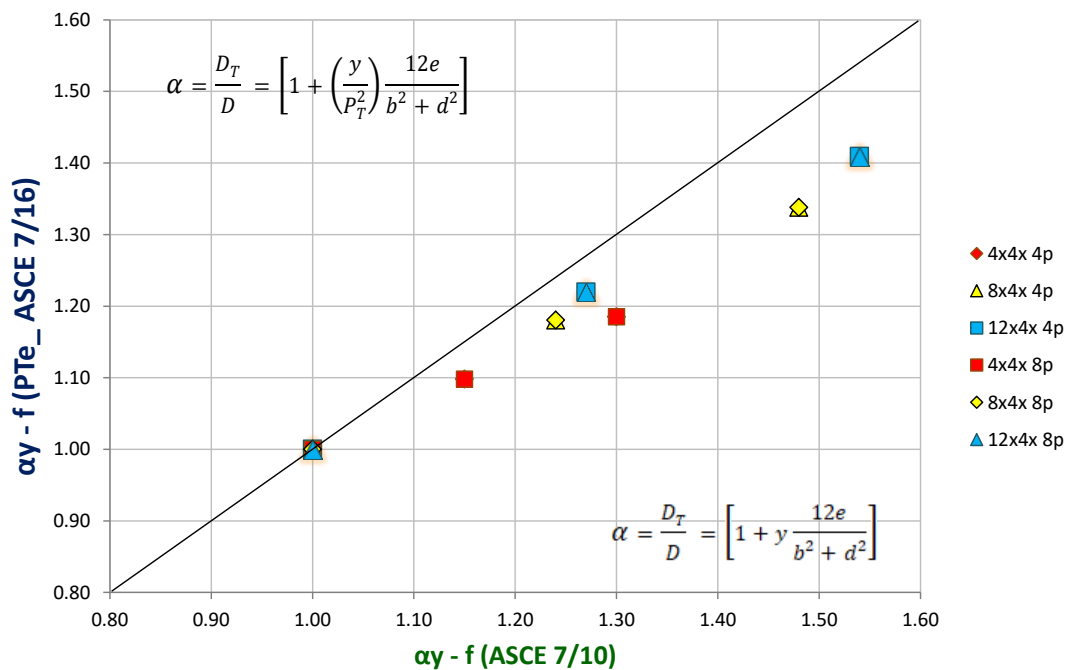


Figura N° 13: Factores de amplificación según ASCE 7-10 y según ASCE 7-16 en función de PTE – dirección Y

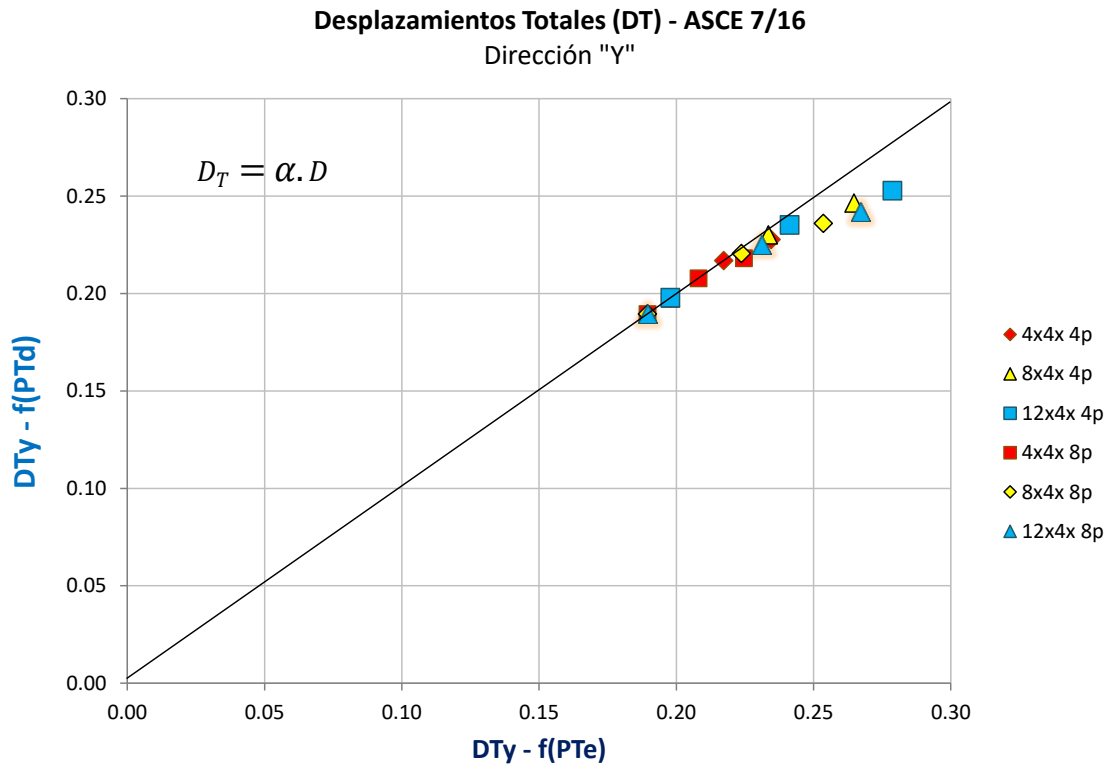


Figura N° 14: Desplazamientos calculados en función a PTd y PTe según el ASCE 7-16– dirección Y

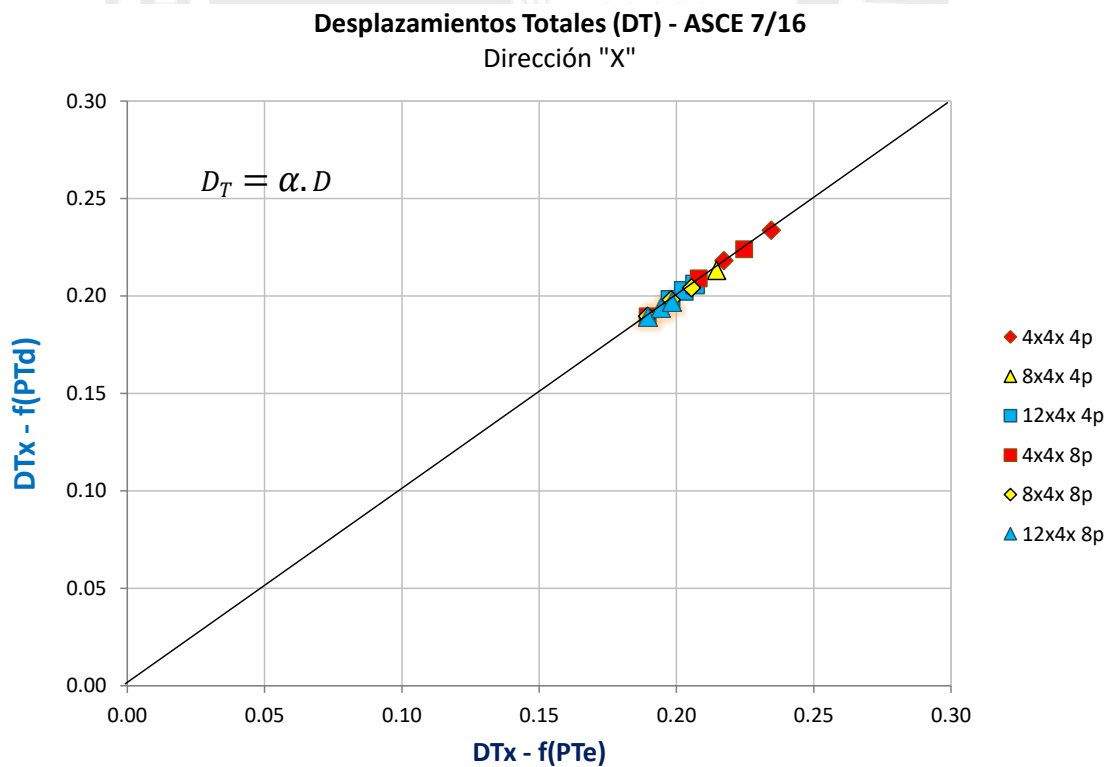


Figura N° 15: Desplazamientos calculados en función a PTd y PTe según el ASCE 7-16– dirección X

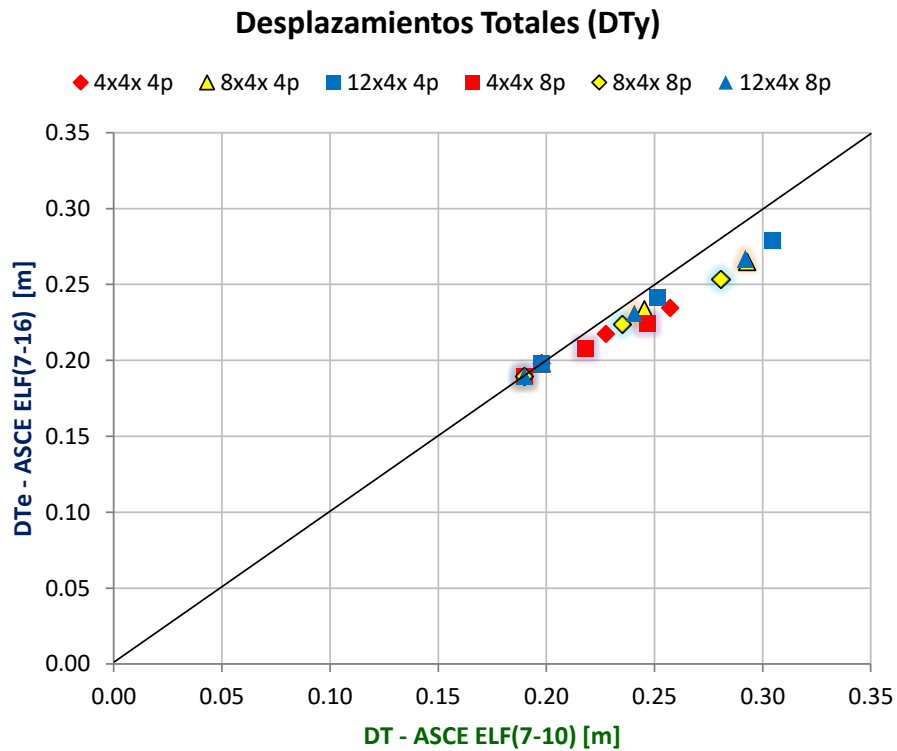


Figura N° 16: Desplazamientos totales según ELF del ASCE 7-10 y ASCE 7-16 con "PTe"

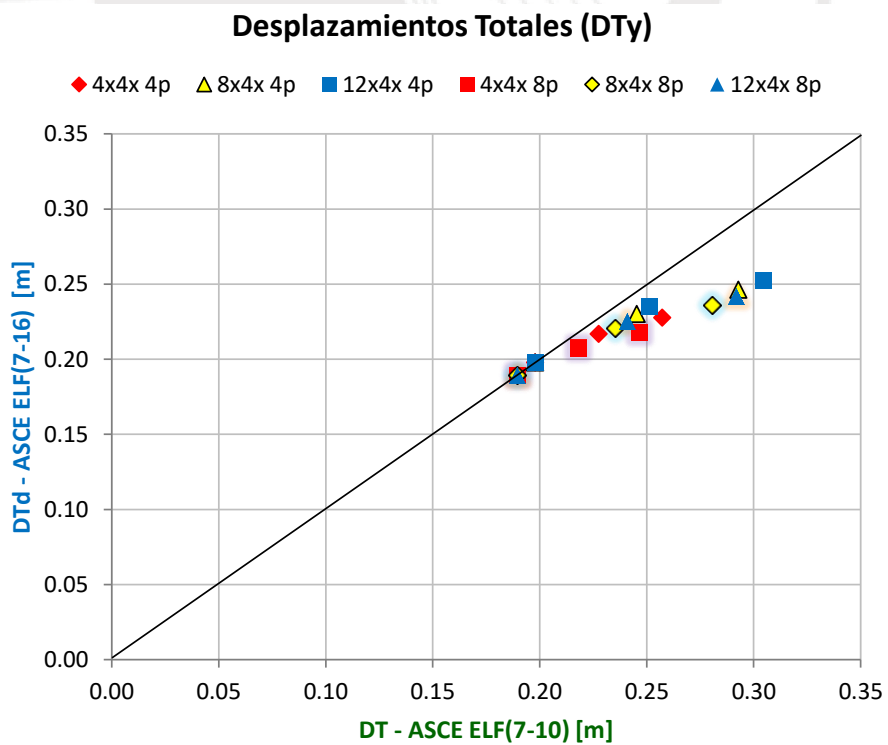


Figura N° 17: Desplazamientos totales según ELF del ASCE 7-10 y ASCE 7-16 con "PTd"

4.5. Resultados del análisis espectral y tiempo historia

El análisis espectral considera el espectro normativo conforme lo indicado en el ítem 4.1, cuya acción sísmica se aplicó con el 100% en la dirección en análisis más un 30% de la componente sísmica ortogonal a la dirección principal.

Los análisis tiempo historia se realizan con los 23 pares de registros de aceleración cuyas componentes ortogonales se aplican tanto en la dirección "X" como en la dirección "Y", totalizando 46 movimientos de terreno para cada dirección sobre cada uno de los casos. El proceso de análisis tiempo historia se efectúa en dos fases, la primera etapa con propiedades lineales en los dispositivos de aislamiento y la segunda con propiedades bilineales de los aisladores. Las propiedades lineales y bilineales contempladas en el análisis, se presenta en la Tabla N° 9, resaltando el hecho que las mismas provienen de fases sucesivas de iteración.

En todos los casos, se presenta el promedio de los máximos desplazamiento de todos los registros sísmicos para la dirección más crítica (Y).

La Figura N° 18 presenta el comparativo de los desplazamientos máximos en la dirección "Y" de cada configuración, correspondientes a los análisis espectral y tiempo historia con dispositivos con propiedades lineales. Así mismo la Figura N° 19 presenta el comparativo de los desplazamientos máximos en la dirección "Y" de cada configuración estructural, considerando los análisis tiempo historia con dispositivos con propiedades lineales versus dispositivos con propiedades bilineales.

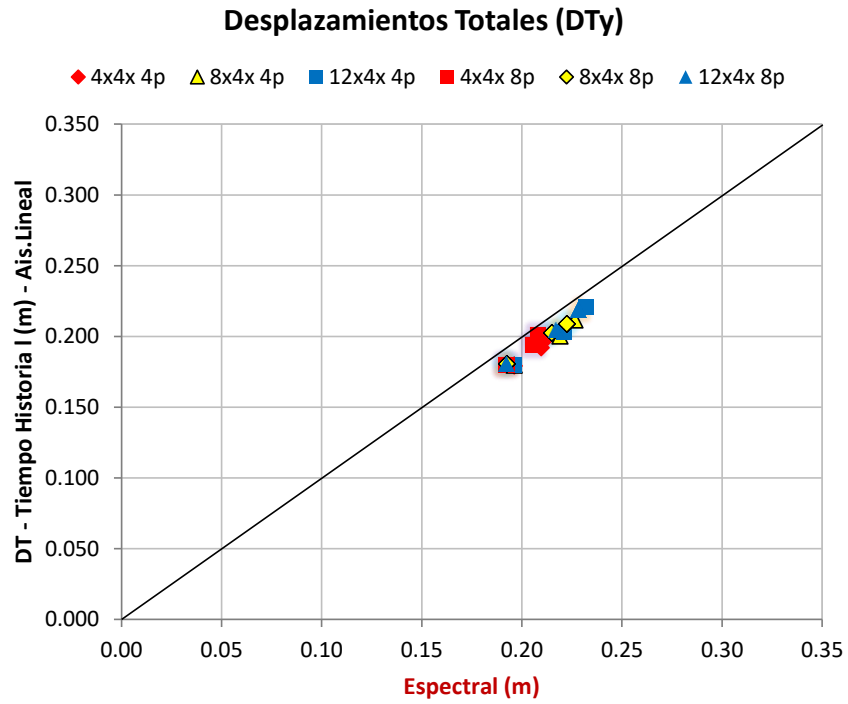


Figura N° 18: Desplazamientos por el análisis espectral y por el análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades lineales– dirección Y

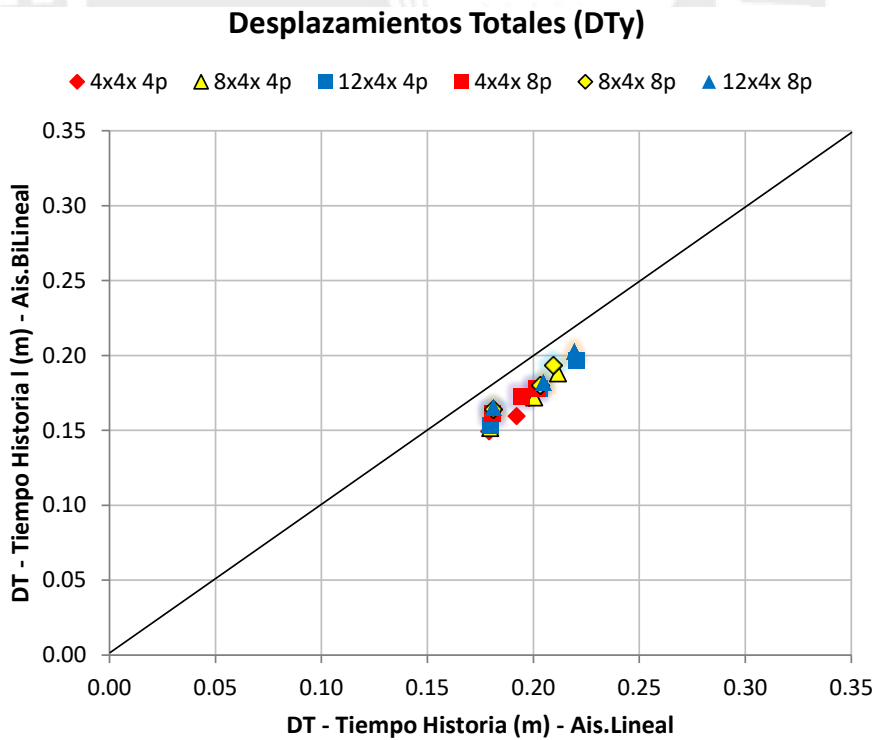


Figura N° 19: Desplazamientos por el análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades lineales y bilineales – dirección Y

CAPITULO V: DISCUSION DE RESULTADOS

5.1. Discusión de resultados de los procedimientos estáticos

Discusión de los resultados de los casos analizados

El procedimiento ELF planteado por el ASCE 7-10 para la determinación de desplazamientos máximos difiere del procedimiento ELF del ASCE 7-16 hasta en un 20%, cuando revisamos la estructura de 12x4.8p(10) es decir para el caso analizado que posee la mayor excentricidad y mayor alargamiento en planta, porcentaje que se incrementa si tomamos los edificios de 4 niveles (presentados posteriormente en la etapa de verificación). El caso nombrado posee el periodo más largo de los casos analizados con una tendencia a incrementar su diferencia a medida mayor sea la excentricidad (evidenciado con los resultados mostrados en la Figura N° 17 y posteriormente ratificado en la Figura N° 35).

El ELF del ASCE 7-16, empleando PTe y PTd cuyos resultados mostrados en Figura N° 8 y la Figura N° 9, indican que mientras la excentricidad del centro de masa sea más importante, la diferencia entre ambas formas de determinación de "PT" se hace creciente. Se ha encontrado dispersiones de hasta 22% en la dirección "Y" para los casos con configuración de 12x4.4p(10) y 12x4.8p(10), es decir para las plantas más alargadas y con mayor excentricidad,

Podemos inferir, de la Figura N° 8 y la Figura N° 9, que independientemente de la forma, número de pisos y del sentido de análisis, los valores de PTe y PTd son aproximadamente iguales cuando la excentricidad es 0% y que la diferencia crece a medida que se incrementa la excentricidad bidireccional.

Cabe mencionar que el planteamiento del ELF del ASCE 7 en su versión 2016, fundamenta su respuesta al desplazamiento lateral en la distribución geométrica de los aisladores, por ello se encuentra que la respuesta según ELF es independiente del número de pisos de cada caso tanto para "PTe" y "PTd". Representando, para este procedimiento, la relación de aspecto en planta de cada entrespacio y la excentricidad los parámetros más importantes (evidenciado con los resultados mostrados en la Figura N° 10 y Figura N° 11).

Los máximos desplazamientos incluidos los efectos de torsión para el ASCE 7-16 según PTe y PTd se muestran en la Figura N° 14 y en la Figura N° 15 para las direcciones “Y” y “X” respectivamente, notándose que los desplazamientos para estos dos (02) “PT”s difieren de forma más significativa en la dirección “Y”. Esta diferencia se acrecienta a mayor excentricidad. Sin embargo en la dirección “X” se puede llegar a afirmar que no existe prácticamente diferencia entre desplazamientos si se calcula tomando PTe o PTd.

En la Figura N° 14 y en la Figura N° 15, para la dirección “Y” la dispersión entre ambas formas de cálculo según el ELF está justificado por los resultados de la relación entre “ α_y ” en función de “PTe” y “ α_y ” en función de “PTd”, presentado en la Figura N° 10 donde se aprecia la trascendencia del factor de amplificación de desplazamientos (α) sobre los desplazamientos estimados según ELF del ASCE 7-16.

Se puede afirmar que emplear el método ELF según el ASCE 7-16 empleando las definiciones de “PT” otorga valores más conservadores para la dirección más crítica si se utiliza “PTe”.

Los valores de desplazamiento más conservadores para “DT” calculado según “PTe” según el ELF del ASCE 7-16, difieren del ELF del ASCE 7-10 hasta un 10% en los casos analizados, resultando más conservador el ASCE 7-10. La diferencia corresponde a la dirección “Y” para la planta más alargada y con mayor excentricidad de los casos estudiados (12x4.4p(10)), sin embargo existe una tendencia a presentarse mayor dispersión a medida que se tenga mayores excentricidades y mayores periodos. (Ver Figura N° 16).

5.2. Discusión de resultados de los procedimientos dinámicos

Se puede llegar a afirmar que para los casos analizados, el promedio de las máximas respuestas de desplazamiento en el punto de interés (esquina del modelo en planta), determinado por análisis tiempo historia con propiedades lineales de los dispositivos es menos conservador que el análisis espectral. Además se encuentra que la relación entre

ambos métodos permanece prácticamente constante con diferencias del orden del 5%, todo ello según se evidencia en la Figura N° 18.

Por otra parte, la relación que existe entre procedimientos tiempo historia con dispositivos representados con propiedades lineales versus dispositivos con propiedades bilineales es también aproximadamente constante con dispersiones del orden del 10% entre métodos de análisis. Así mismo, para la comparación indicada se evidencia que la respuesta más conservadora (mayor desplazamiento) corresponde al análisis tiempo historia con dispositivos con propiedades lineales. (Lo afirmado está ilustrado en la Figura N° 19).

5.3. Discusión de resultados de los procedimientos estáticos versus procedimientos dinámicos.

A partir de los resultados presentados es posible inferir nuevas comparaciones a efectos de establecer relaciones entre procedimientos estáticos y dinámicos. Se analizó los edificios de 8 niveles (sin excluir los edificios de 4 niveles que poseen la misma tendencia pero en diferente magnitud, ver: Figura N° 20 el caso del ELF según ASCE 7-10).

Presentamos en la Figura N° 21 la relación entre desplazamientos totales según ELF del ASCE 7-10 versus análisis tiempo historia con aisladores con propiedades bilineales. El gráfico muestra los desplazamientos correspondientes a las estructuras de 8 niveles. Se encuentra que la diferencia mostrada entre cada caso llega a valores del orden de 45% para el caso con mayor excentricidad y con mayor periodo.

La Figura N° 22 presenta la comparación entre los resultados del procedimiento ELF del ASCE 7-16 empleando el factor "PTe", versus análisis tiempo historia con aisladores con propiedades bilineales, encontrándose una diferencia del orden del 35% para la estructura de 8 niveles con la planta más alargada y con mayor excentricidad (12x4.8p(10)). La gráfica evidencia una tendencia hacia una mayor dispersión a mayores excentricidades y mayores periodos.

La Figura N° 23 presenta la comparación entre los resultados del procedimiento ELF del ASCE 7-16 empleando el factor “PTd, versus análisis tiempo historia con aisladores con propiedades bilineales, encontrándose una diferencia del orden del 20% para la estructura de 8 niveles con la planta más alargada y con mayor excentricidad (12x4.8p(10)). La tendencia respecto de la dispersión entre métodos aparentemente tiende a reducirse sin embargo no resulta concluyente (hecho que también se aprecia en los casos con menor número de pisos con diferencias porcentuales mayores, mostradas en la fase de verificación de la sección 5.5).

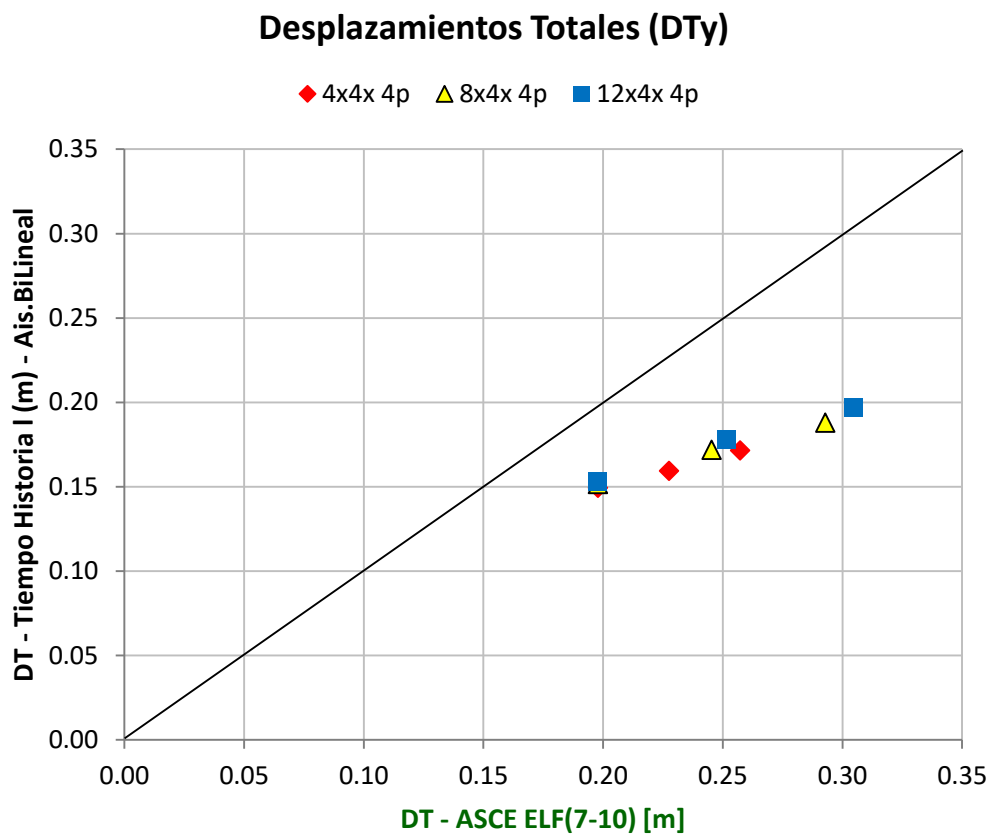


Figura N° 20: Desplazamientos obtenidos por análisis estático según ASCE 7-10 versus desplazamientos obtenidos por análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades bilineales (modelo numérico de 4 pisos) – dirección Y

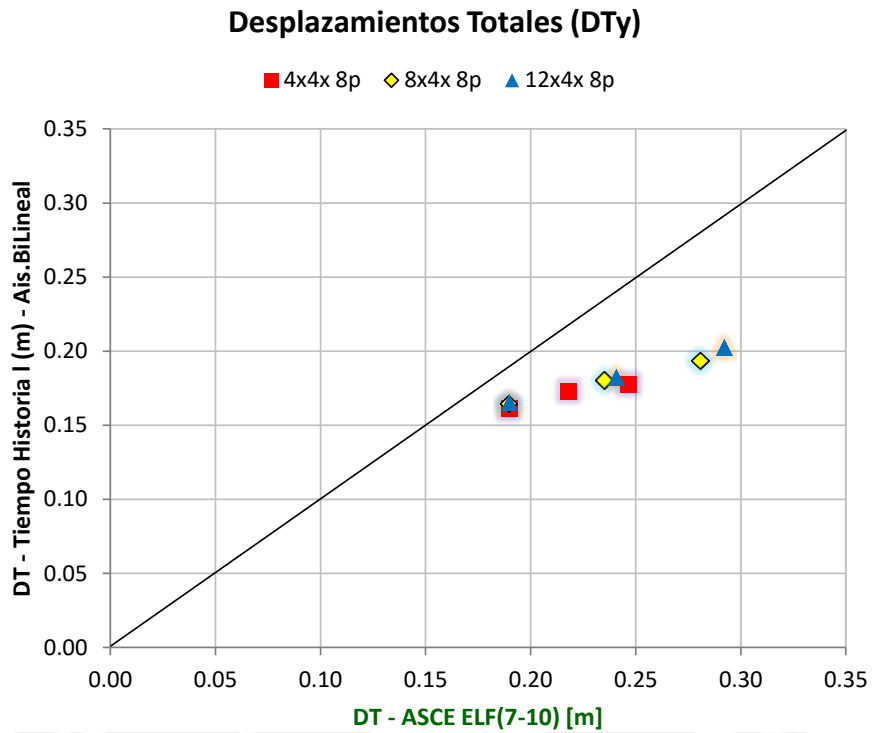


Figura N° 21: Desplazamientos obtenidos por análisis estático según ASCE 7-10 versus desplazamientos obtenidos por análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades bilineales (Modelo numérico de 8 pisos) – dirección Y

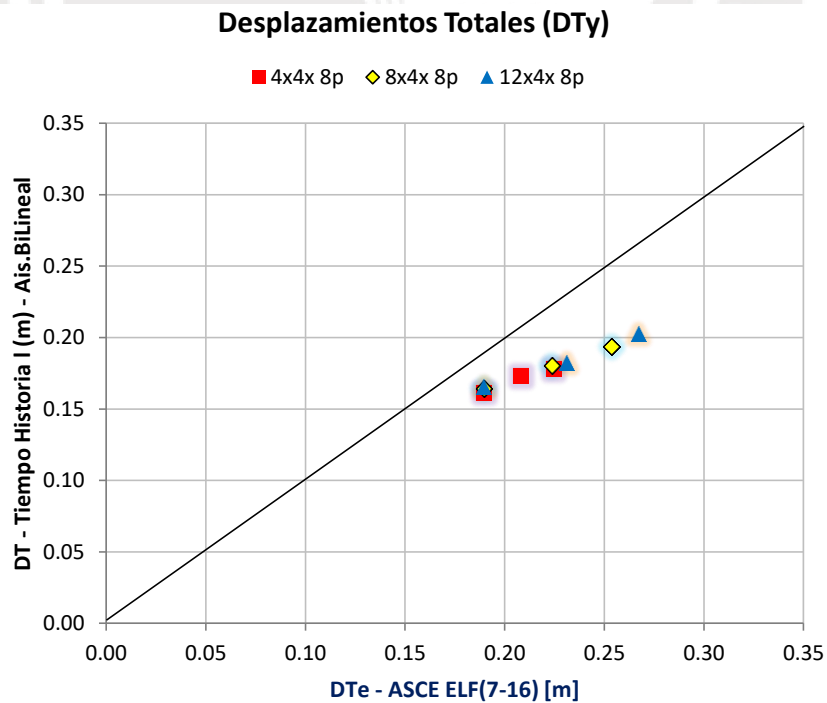


Figura N° 22: Desplazamientos obtenidos por análisis estático según ASCE 7-16 con “PTe” versus desplazamientos obtenidos por análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades bilineales – dirección Y

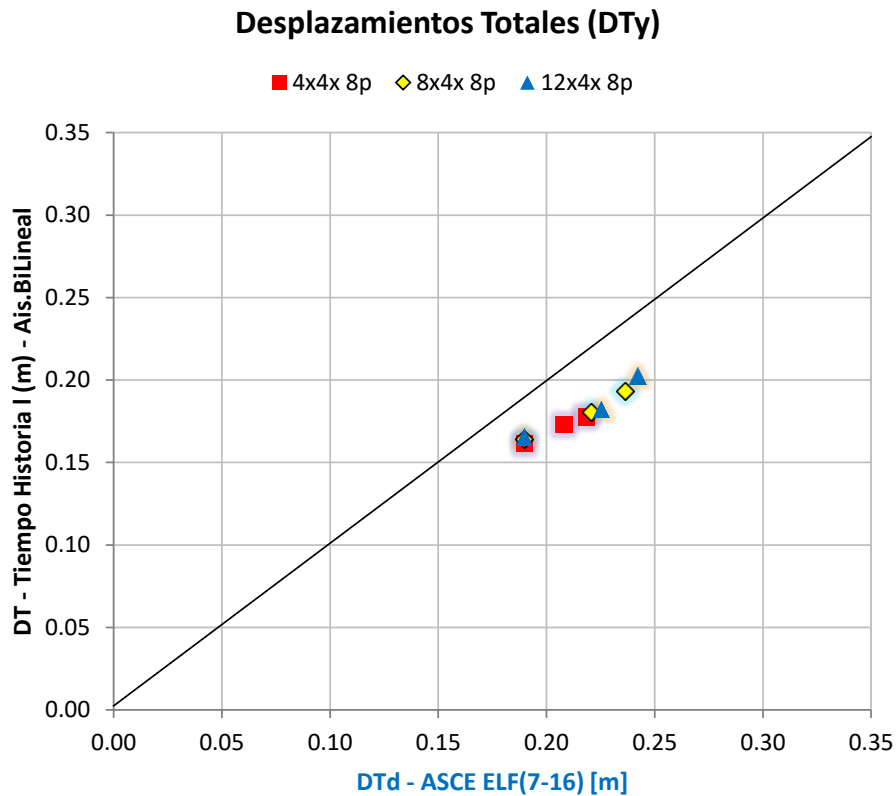


Figura N° 23: Desplazamientos obtenidos por análisis estático según ASCE 7-16 con “PTd” versus desplazamientos obtenidos por análisis tiempo historia considerando aisladores con propiedades bilineales – dirección Y

5.4. Planteamiento de ecuación para predecir desplazamientos máximos en edificios con aislamiento sísmico.

Las dispersiones encontradas y crecientes divergencias entre las comparaciones entre procedimientos estáticos y tiempo historia no lineal, conlleva a poder plantear expresiones de mejor ajuste, dada las tendencias presentadas en el conjunto de casos. Para dicho propósito se realizó un análisis matemático de las ecuaciones de los procedimientos estáticos y su relación con la respuesta del análisis no lineal de la interfaz de aislamiento, lo indicado se realiza en tres fases:

- Análisis de las ecuaciones del ELF.
- Correlación y uniformidad de la respuesta torsional en ecuaciones propuestas.

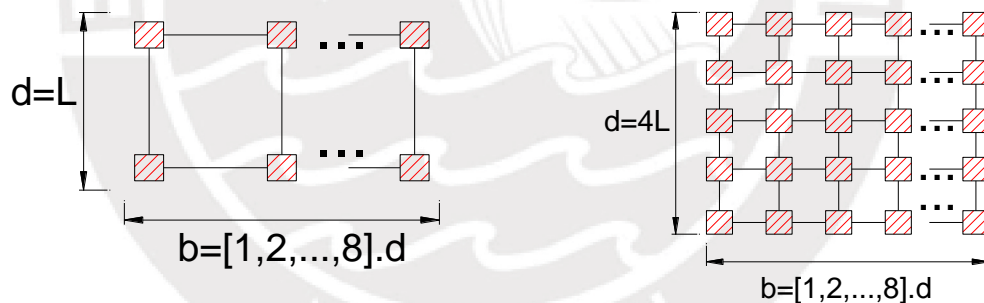
- Verificación empleando señales sintéticas y señales artificiales espectro-compatibles.

Los puntos mencionados se desarrollan a continuación:

Análisis de las ecuaciones del ELF

Se realiza un análisis numérico extendido de las implicancias del empleo de las ecuaciones de los procedimientos estáticos, inclusive considerando casos ideales. Para ello se preparó una rutina en la herramienta computacional MATLAB y se revisaron casos con relaciones de aspecto en planta “b/d” de 1 hasta 8 y excentricidades de 0% hasta 20%. Este análisis se limita al empleo de las ecuaciones del ASCE 7-16 con PTe y del ASCE 7-10. (Ver acápite 2.3).

En la Figura N° 24, se muestra un esquema de las plantas típicas consideradas. Siendo este un aspecto a estudiarse y evaluar sus implicancias.



Caso A: Planta “b” x “d”,

Con: $d=L$ y $b=[1,2,\dots,8]$ veces “d”

(Aisladores en dirección “Y”=2 und.).

Caso B: Planta “b” x “d”,

Con: $d=4L$ y $b=[1,2,\dots,8]$ veces “d”

(Aisladores en dirección “Y”=5 und.).

Figura N° 24: Plantas consideradas en el análisis de las implicancias del procedimiento estático

Para el análisis de los resultados, en adelante se muestran pares de gráficos para evidenciar la diferencia entre los casos presentados en la Figura N° 24 correspondiente a dos casos “A” y “B” (Izquierda y derecha).

El Caso A representa un conjunto de estructuras considerando una mínima cantidad constante de aisladores en la dirección “Y” (02 aisladores) y considerando la dirección “X” como variable, con una cantidad de aisladores que cumplan relaciones en planta “b/d” que van desde uno (1) hasta ocho (8). Así mismo el Caso B presenta también estructuras con relaciones en planta que van de uno (1) hasta ocho (8), considerando constante la cantidad de aisladores en la dirección “Y” (05 aisladores).

Cabe mencionar que el Caso B, contiene en parte los casos analizados como estructuras tridimensionales (3D) desarrollados en la herramienta ETABS y mostrados en la Figura N° 4. En adelante se presentan regiones sombreadas para resaltar los porcentajes de excentricidad considerados en los casos analizados en la herramienta ETABS.

La Figura N° 25, muestra que no existe diferencia alguna en el Factor de Amplificación de Desplazamientos ($\alpha=DT/D$) y la relación “b/d” (para los casos A y B) si este se determina según ASCE 7-10. Lo que implicaría que para el ELF del ASCE 7-10 no importaría la distribución de los aisladores siempre y cuando se cumpla la relación geométrica en planta de cualquier configuración rectangular analizada.

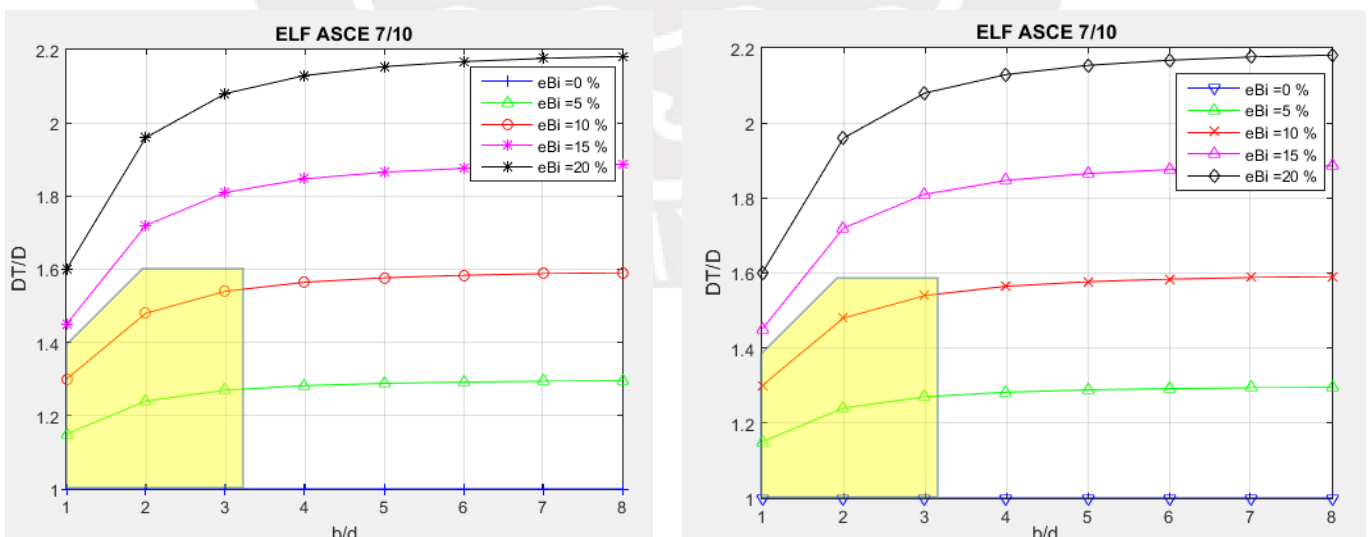


Figura N° 25: Relación geométrica “b/d” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

La Figura N° 26 muestra que tampoco existe diferencia de respuesta entre casos A y B si se usa el número de aisladores considerados versus el Factor de Amplificación de Desplazamientos ($\alpha=DT/D$) según ASCE 7-10, implica por tanto que el número de aisladores no influye en el factor de amplificación para las mismas relaciones “b/d” presentadas en la Figura N° 25.

A partir de los casos analizados es posible plantear relaciones adicionales de “densidad” entre el área de una plataforma de aislamiento y la cantidad de aisladores que posea “(b x d) /Nro Aisladores” según se muestra en la Figura N° 27, respecto del Factor de Amplificación de Desplazamientos ($\alpha=DT/D$) según ASCE 7-10; de lo cual se encuentra que los resultados tienden a presentar valores constantes mientras más alargada es la planta “b/d \geq 4”

Se puede por tanto inferir que mientras mayor la cantidad de aisladores se esperaría valores de amplificación aproximadamente similares según el ELF del ASCE 7-10.

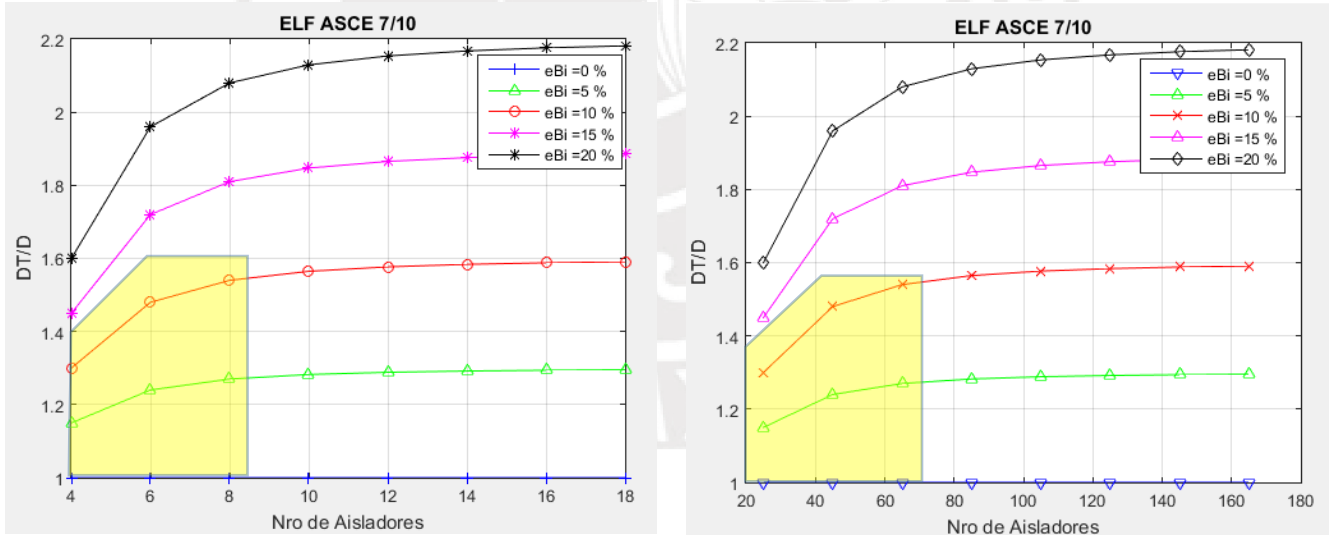


Figura N° 26: Relación “Nro Aisladores” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

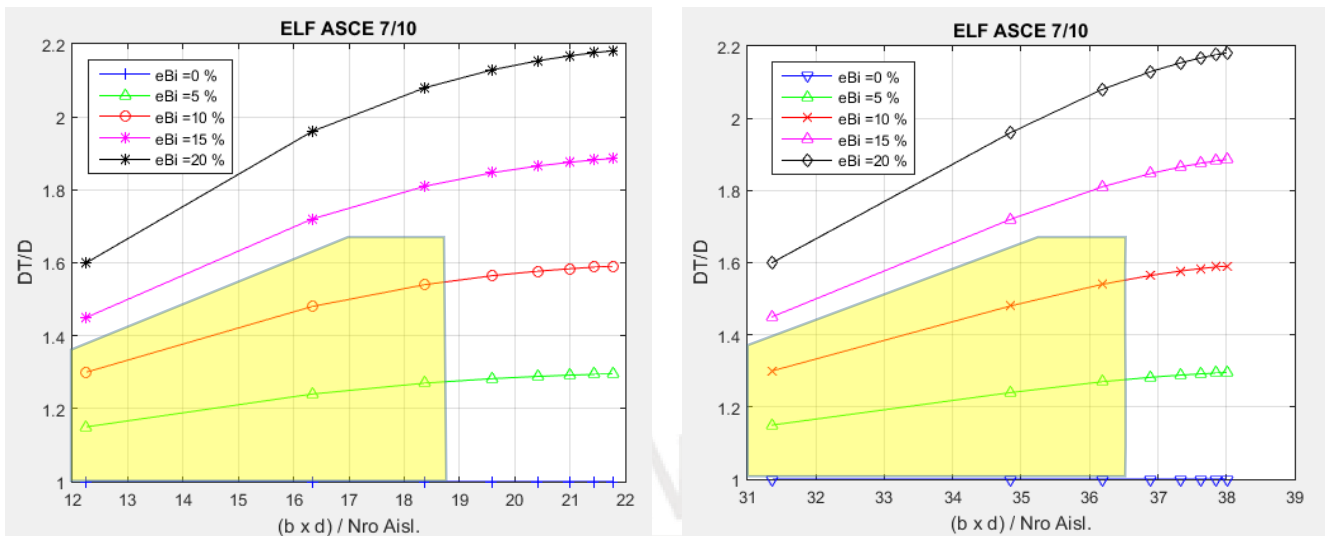


Figura N° 27: Relación de densidad “(b x d) / Nro Aisladores” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

De forma similar a lo presentado en las figuras previas, se presentan la Figura N° 28, Figura N° 29 y Figura N° 30, el análisis de los resultados considerando las expresiones del ASCE 7-16 con PTe, encontrándose en este caso que “Sí” existe una diferencia del valor de “ $\alpha=DT/D$ ” entre los casos A y B analizados. Las diferencias oscilan entre 5% y 11% (dependiendo del tipo de gráfico), todo ello para los casos con excentricidades bidireccionales diferentes de cero ($eBi \neq 0\%$), siendo mayores los valores del factor de amplificación en las plantas con mayor número de aisladores.

Un resultado interesante es el presentado en la Figura N° 30 que muestra que la relación de “densidad” vs factor de amplificación ($\alpha=DT/D$) es prácticamente lineal para ambos casos analizados (“A” y “B”). El mismo que podría ser utilizado como medida en propósitos de control o verificación.

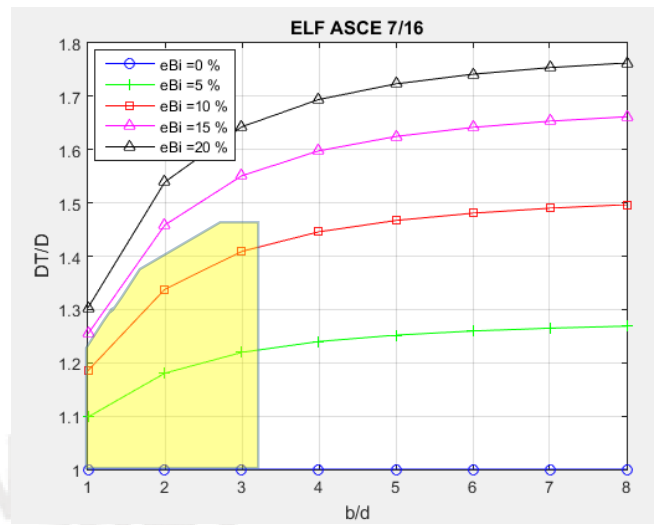
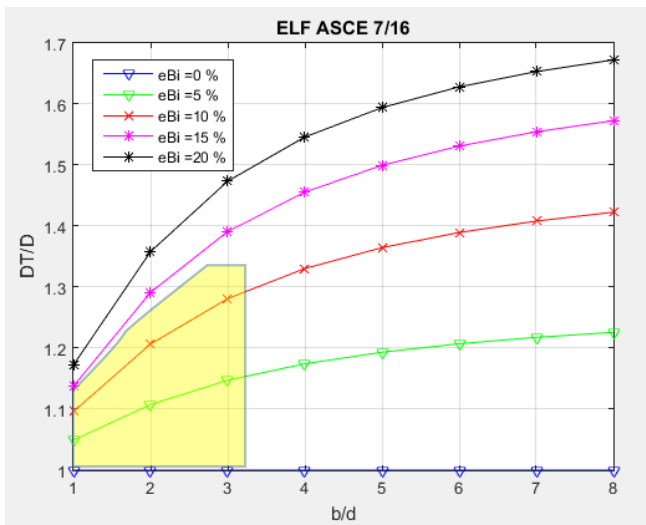


Figura N° 28: Relación geométrica “b/d” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

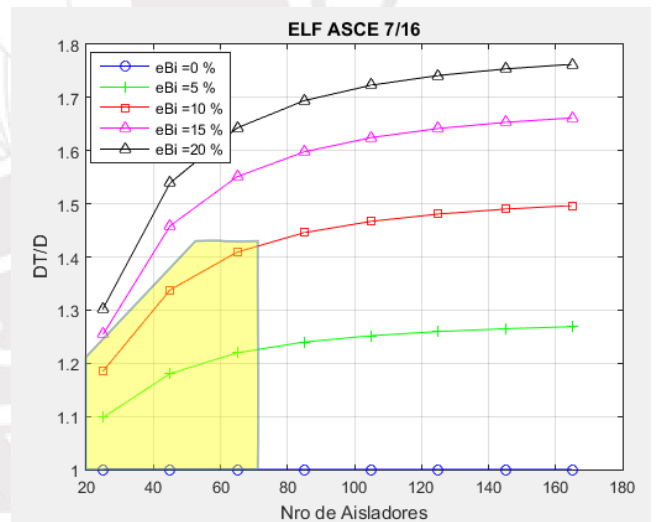
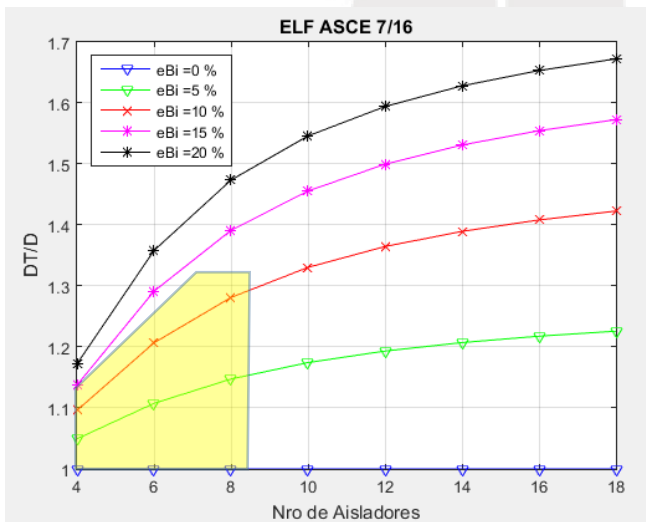


Figura N° 29: Número de aisladores vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

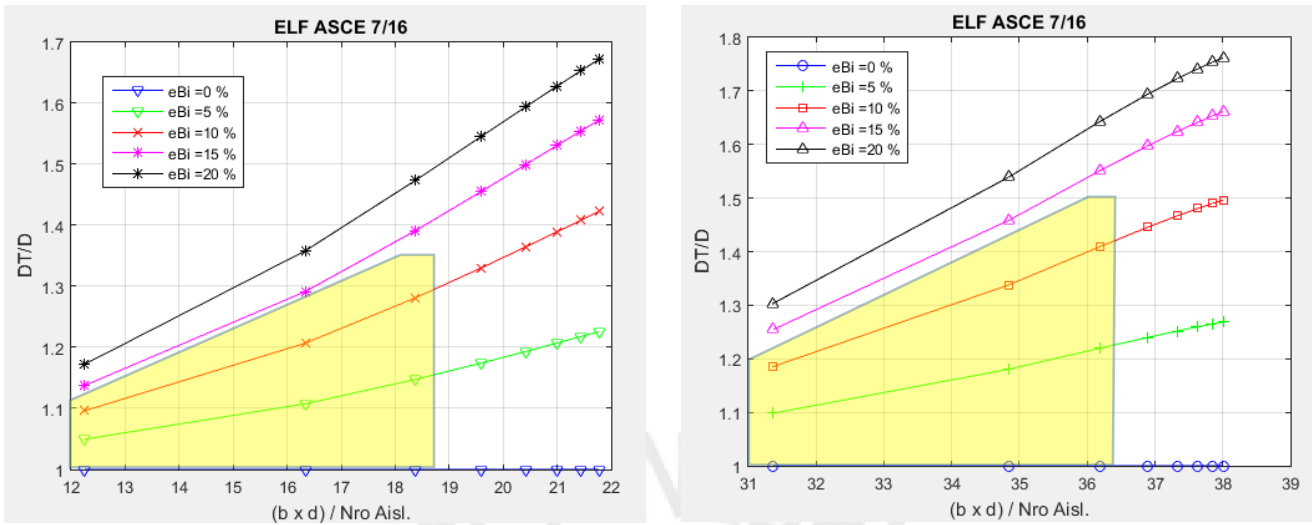


Figura N° 30: Relación de densidad “(b x d) / Nro Aisladores” vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

Se complementa el análisis numérico en la herramienta MATLAB, con las formas de los valores de “PTe” del ASCE 7-16 versus las relaciones “b/d”, “Número de Aisladores” y versus “Densidad=(b x d) / Nro Aisladores”, todo ello presentado en la Figura N° 31, Figura N° 32 y Figura N° 33 , donde se muestra la evolución de los valores de PTe a medida que existe mayor excentricidad y mayor alargamiento de las planta. Concluyéndose que a mayor “b/d” y mayor “Nro de Aisladores” se tiene menor “PTe”, situación que complementa lo presentado en la Figura N° 8 y Figura N° 10.

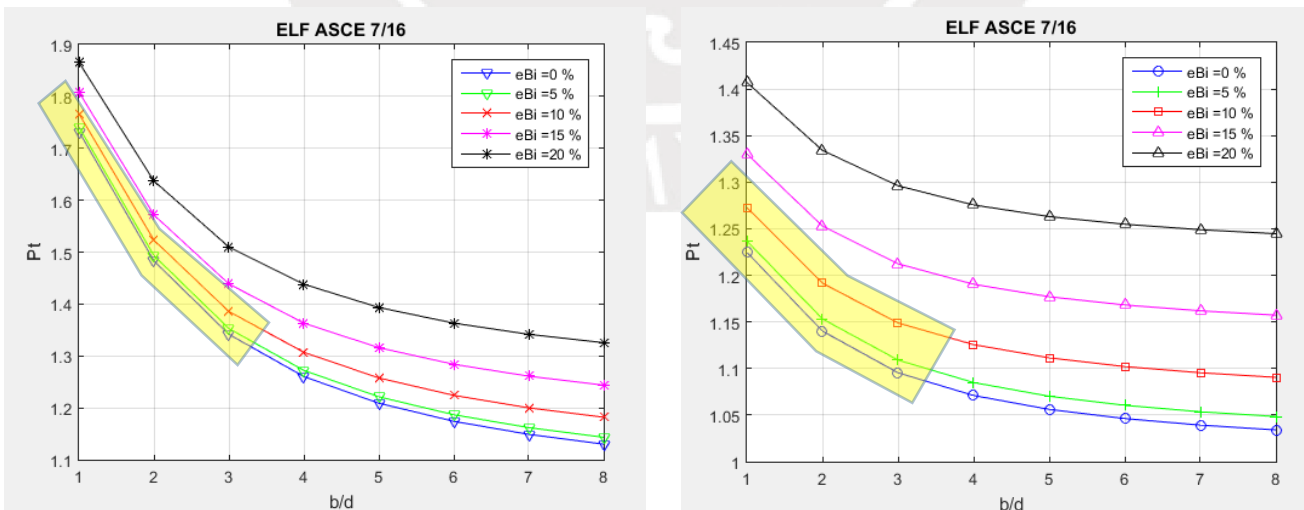


Figura N° 31: Relación geométrica “b/d” vs “PTe” del ASCE 7-16. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

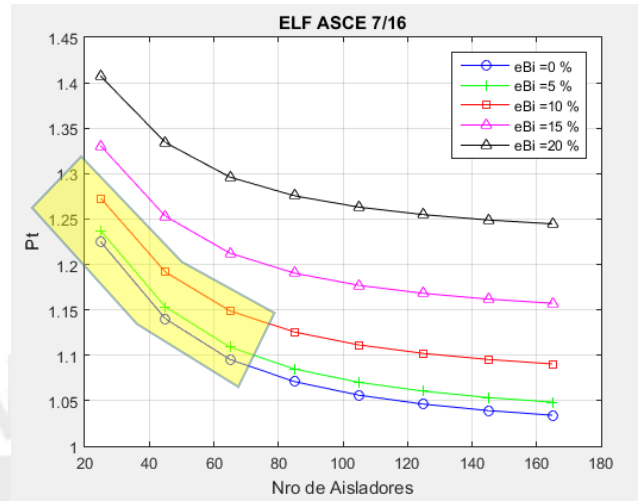
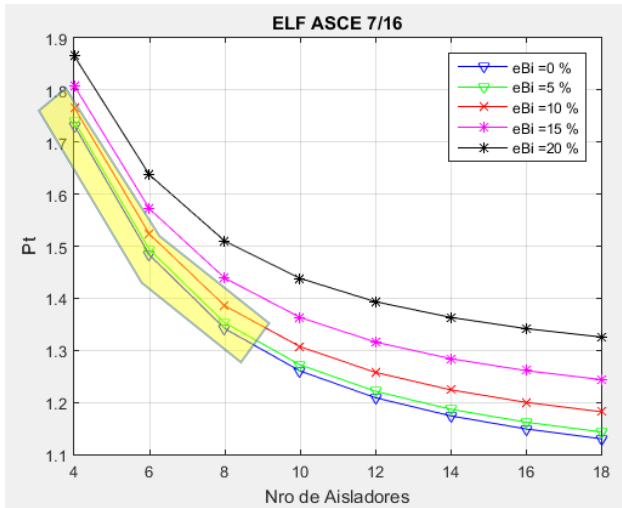


Figura N° 32: Número de aisladores vs “P_T” del ASCE 7-16. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

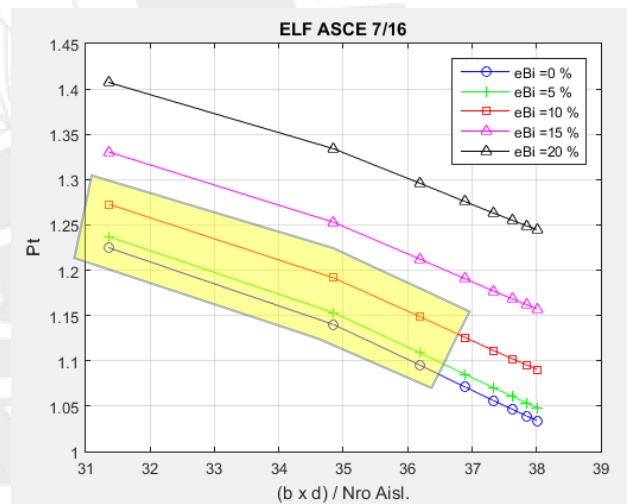
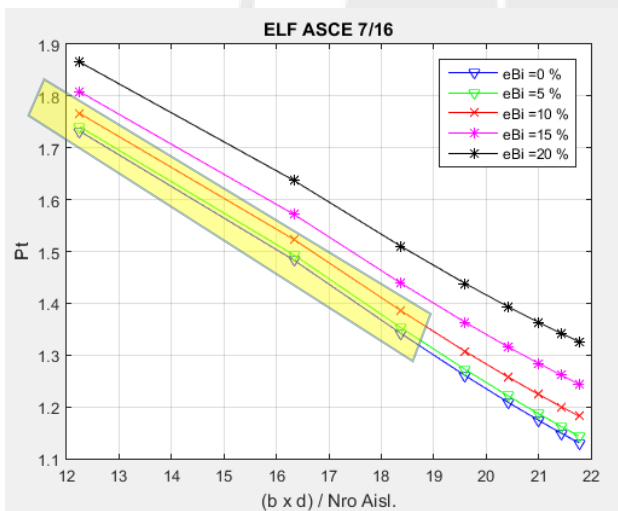


Figura N° 33: Relación de densidad “(b x d) / Nro Aisladores” vs “P_T” del ASCE 7-16. Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

La Figura N° 34 y la Figura N° 35 muestran los comparativos entre los factores de amplificación ($\alpha=DT/D$) calculados según ASCE 7-10 y ASCE 7-16 en función de P_T. Ambas figuras contienen la misma información, sin embargo se elaboran curvas con énfasis en la excentricidad y las relaciones “b/d” para un mejor análisis.

Se concluye de ambas figuras (Figura N° 34 y la Figura N° 35) que a mayor excentricidad el factor alfa ($\alpha=DT/D$) es más conservador para las ecuaciones del ASCE 7-10, así mismo en la misma tendencia se tiene que a mayor alargamiento de la planta, mayor conservadurismo en la forma de cálculo de desplazamientos según ASCE 7-10.

Adicionalmente se encuentra que una mayor excentricidad resulta más trascendente que una planta alargada (relación de aspecto mayor), ello en referencia a la estimación de desplazamientos laterales.

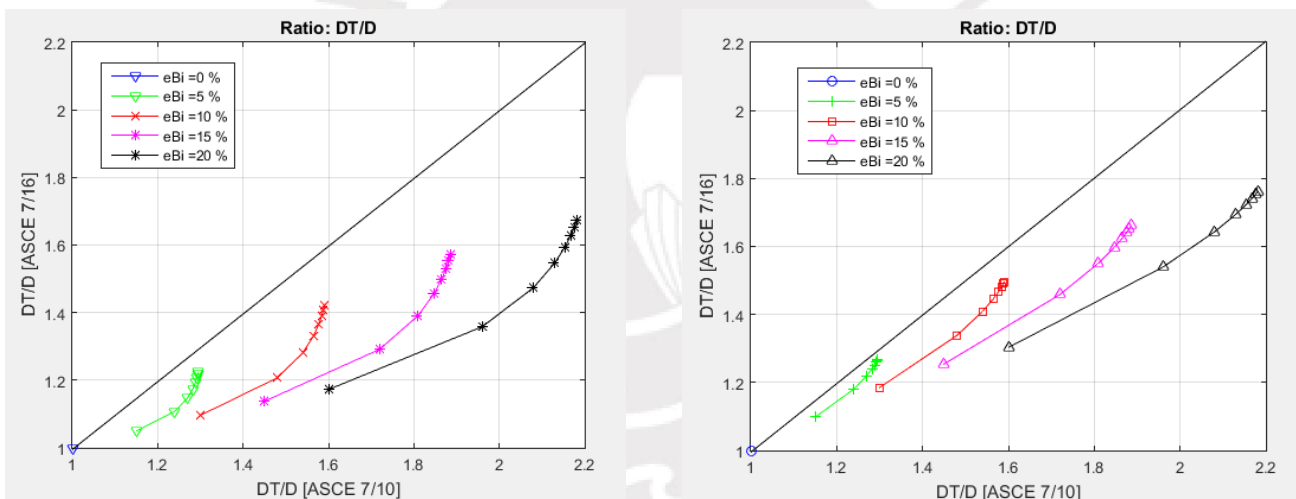


Figura N° 34: Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10 vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Comparación entre curvas con énfasis en la excentricidad bidireccional.
Dirección Y. Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

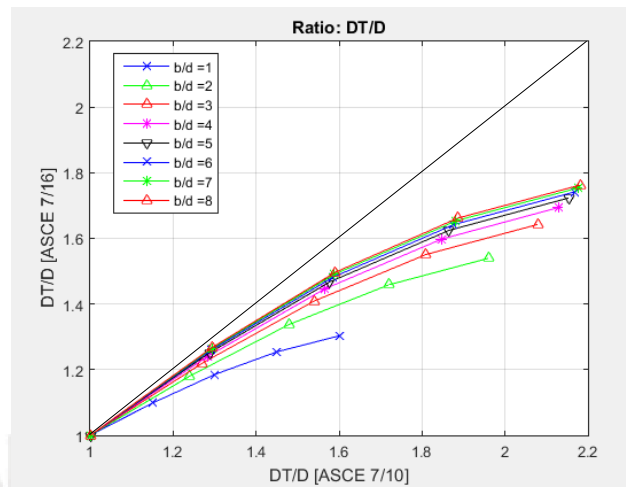
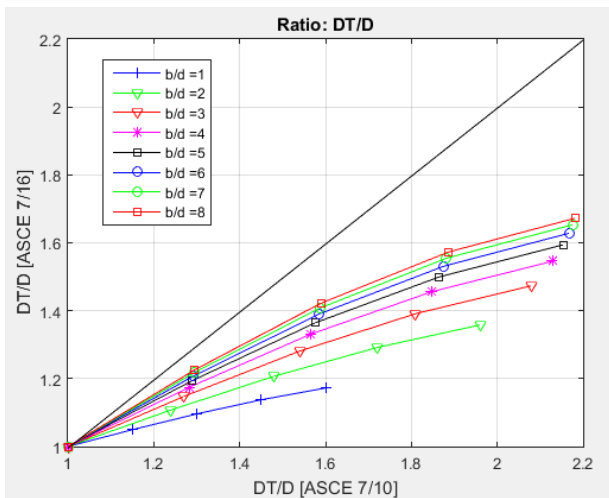


Figura N° 35: Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-10 vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Comparación entre curvas con énfasis en la forma de las plantas. Dirección Y Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

En el colofón de esta sección de análisis del procedimiento estático del ASCE 7-10 y ASCE 7-16, se presenta las relaciones entre “PTe” y los factores de amplificación ($\alpha=DT/D$) del ASCE 7-16 en la Figura N° 36 y la Figura N° 37. Encontrándose que existe una relación “radial” cuyo propósito resultaría útil para fines académicos para verificación de resultados.

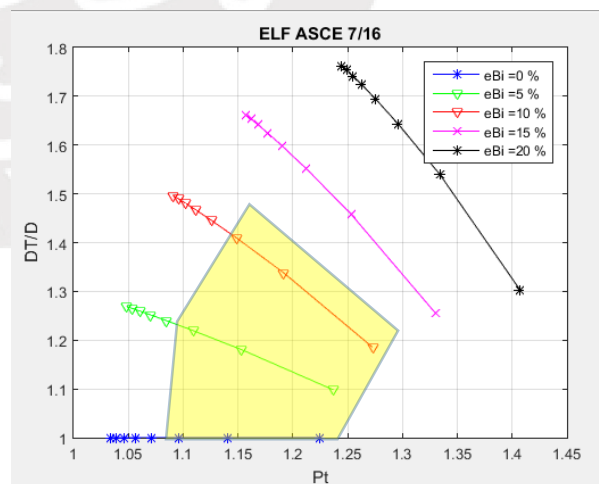
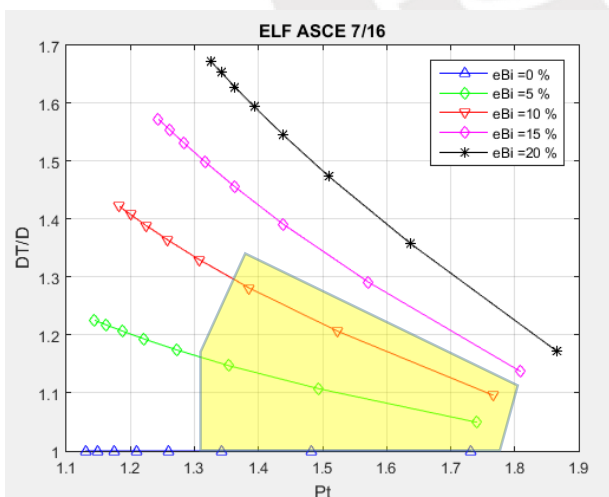


Figura N° 36: Relación “PTe” del ASCE 7-16 vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Comparación entre curvas con énfasis en la excentricidad bidireccional. Dirección Y Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

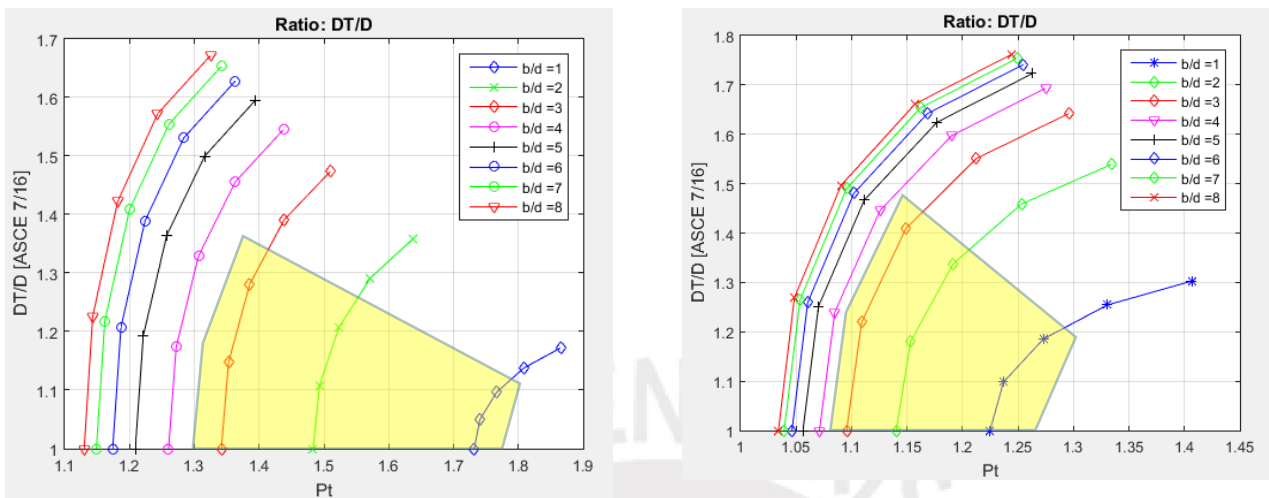


Figura N° 37: Relación “PTE” del ASCE 7-16 vs Factor de amplificación de desplazamientos ($\alpha=DT/D$), según ASCE 7-16 en función a PTe. Comparación entre curvas con énfasis en la forma de las plantas. Dirección Y . Izquierda: Caso A, Derecha: Caso B

Correlación y uniformidad de la respuesta torsional en ecuaciones propuestas

Acorde a los resultados encontrados para los procedimientos estáticos del ASCE 7-10 y ASCE 7-16 se puede inferir que, en el marco del presente trabajo, la tendencia encontrada (curvas de comportamiento) no se verá alterada por ningún otro parámetro (diferente a la excentricidad o alargamiento de plantas), por lo que es posible decir que es factible estimar de forma fiable el desplazamiento total máximo en la esquina de una planta rectangular de aislamiento a partir de *ecuaciones de regresión potencial y lineal*.

Se ha elaborado una secuencia de cálculo para encontrar la “mejor” respuesta a partir de los datos promedios de análisis tiempo historia no lineal y de los resultados de los procedimientos estáticos del ASCE 7-10 y ASCE 7-16. Al momento es conocido que existe una dispersión relativamente uniforme entre los resultados de los métodos estáticos y los métodos dinámicos no lineales encontrándose en todos los casos una tendencia a valores “*muy conservadores*” en favor de los procedimientos estáticos.

Por lo indicado es posible realizar un proceso de cálculo donde se modifique la tendencia de los resultados de los métodos estáticos y conducirlos a una respuesta uniforme y de poca dispersión. (Ilustrándose esquemáticamente en la Figura N° 38, el proceso a seguir). El proceso resultaría útil para poder plantear la “mejor” ecuación para el uso de procedimientos estáticos para sistemas aislados en el Perú, con una tendencia uniforme y coherente.

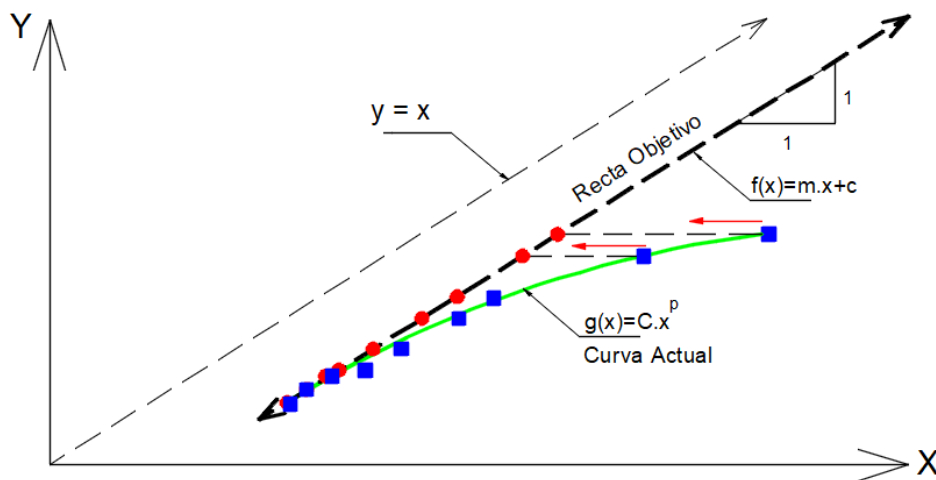


Figura N° 38: Esquema para determinar la recta de mejor ajuste

La Figura N° 38, presenta de forma esquemática, en el eje “X” los desplazamientos estimados según procedimientos estáticos y en el eje “Y” los desplazamientos máximos según análisis tiempo historia con aisladores con propiedades bilineales, representado por los puntos azules (cuadrados) cuya curva de regresión estadística ajustaría a una curva potencial. El propósito es modificar los valores en “X” sin alterar los valores en “Y” y obtener una “Recta Objetivo” que estimaría mejor los resultados de una análisis estático puntos en rojo (redondeados).

La ecuación de la recta “objetivo” presentada en la Figura N° 38 implica que a los valores de desplazamiento total ($DT = \alpha \cdot D$) del ELF se le afecte por algún “modificador” para obtener una “distribución de datos modificada “mejor” con una recta de regresión lineal que posea la suficiente uniformidad (es decir que la pendiente “m” sea lo más próximo

a 1, a su vez obtener una “varianza” (dispersión de datos respecto de una curva o recta) con valores cercanos a la unidad.

Se emplea la curva de regresión correspondiente a formas potenciales $g(x) = C \cdot x^p$, esta curva se lleva a una forma lineal $f(x') = mx' + c$, por ende es necesario establecer relaciones entre x' y $x = DT = \alpha \cdot D$. Frente a la naturaleza “potencial” de las relaciones, se establece la hipótesis: que la “mejor” expresión vendrá como consecuencia de la alteración de los valores de alfa (α) por medio de una “potencia” (q), es decir $x' = \alpha^q \cdot D$.

Para calcular confiablemente los valores de la curva de regresión potencial y lineal del esquema presentado en la Figura N° 38, se analizan una variedad de casos haciendo agrupaciones aleatorias de resultados de los análisis tiempo historia con aisladores con comportamiento bilineal. Se evalúan juegos de 3, 5, 7, 8, 11, 12 y 15 pares de registros tiempo historia no lineal. Sin embargo por ser más representativo se optó por presentar juegos de 12 y 15 pares de registros.

En la Tabla N° 12 se presentan los grupos de análisis considerados, cabe mencionar que la numeración corresponde al número de orden de los pares de registros de la Tabla N° 10. La herramienta MATLAB se utilizó para generar 10 combinaciones aleatorias de grupos de 12 y 15 registros, ello para evitar algún tipo de sesgo en la evaluación de cada una de las 18 estructuras analizadas y para cada uno de los 3 procedimientos del análisis estático (ASCE 7-10, ASCE 7-16 con PTe y con PTd).

La determinación de “q” implica realizar un proceso iterativo para modificar la curva “potencial” y llevarlo a su forma lineal. Se presenta parte del proceso iterativo en la Tabla N° 13. La tabla muestra la “varianza” y la “pendiente” (m) obtenida de la recta $f(x') = mx' + c$ cuando se calcula $x' = \alpha^q \cdot D$. La tabla presenta los valores *calculados* de “q” así como los valores *propuestos* de “q” (establecidos a partir de observación de los datos estadísticos: promedio, mediana y moda).

Finalmente el exponente modificador “q” es diferente según sea uno u otro procedimiento estático del ASCE, presentamos a continuación las ecuaciones ajustadas:

- Ecuación modificada para el ELF del ASCE 7-10:

$$\alpha_{m1} = \frac{D_T}{D} = \left[1 + \frac{ye}{r_l^2} \right]^{0.45} = \left[1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]^{0.45} \quad (20)$$

- Ecuación modificada para el ELF del ASCE 7-16,

cuando: $P_T = P_{Te} = \frac{1}{r_l} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}}$:

$$\alpha_{m2} = \frac{D_T}{D} = \left[1 + \frac{1}{P_T^2} \frac{ye}{r_l^2} \right]^{0.6} = \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]^{0.6} \quad (21)$$

- Ecuación modificada para el ELF del ASCE 7-16, cuando: $P_T = P_{Td} = \frac{T}{T_\theta}$

$$\alpha_{m3} = \frac{D_T}{D} = \left[1 + \frac{1}{P_T^2} \frac{ye}{r_l^2} \right]^{0.8} = \left[1 + \left(\frac{y}{P_T^2} \right) \frac{12e}{b^2 + d^2} \right]^{0.8} \quad (22)$$

A manera de una verificación general se emplean las expresiones planteadas sobre las relaciones de la Figura N° 21, Figura N° 22 y Figura N° 23, teniéndose por tanto la respuesta “mejorada” en la Figura N° 39, Figura N° 40 y Figura N° 41.

Tabla N° 12: Grupos de registros para respuesta al desplazamiento y determinación del exponente modificador “q”

Nro Grupo	Grupos de registros	Prop.	Comentario
1	12 20 5 6 14 13 23 17 3 21 7 8	BiLin	12 Reg.TH
2	4 14 10 19 20 16 5 17 23 13 2 12	BiLin	12 Reg.TH
3	20 16 8 1 7 12 19 10 5 14 11 9	BiLin	12 Reg.TH
4	14 4 20 1 7 21 16 12 19 23 11 2	BiLin	12 Reg.TH
5	3 18 10 20 14 8 1 17 7 15 22 13	BiLin	12 Reg.TH
6	15 16 18 1 2 5 4 3 13 14 9 6	BiLin	12 Reg.TH
7	15 9 7 5 1 6 20 18 8 21 10 12	BiLin	12 Reg.TH
8	21 17 11 7 18 12 13 1 4 16 14 5	BiLin	12 Reg.TH
9	10 11 12 16 3 17 4 2 22 14 8 20	BiLin	12 Reg.TH
10	22 9 5 6 3 4 23 15 18 7 16 2	BiLin	12 Reg.TH
11	18 16 13 14 4 10 21 12 3 2 11 20 5 15 9	BiLin	15 Reg.TH
12	1 22 15 7 13 21 19 23 3 17 10 2 8 14 18	BiLin	15 Reg.TH
13	8 6 17 9 2 13 7 1 20 16 18 14 21 4 19	BiLin	15 Reg.TH
14	10 2 7 12 20 5 9 11 22 4 1 8 15 21 17	BiLin	15 Reg.TH
15	18 2 21 7 17 14 12 22 16 20 15 13 23 9 1	BiLin	15 Reg.TH
16	14 4 6 7 17 21 20 5 18 16 19 12 3 13 15	BiLin	15 Reg.TH
17	8 7 11 18 20 3 4 14 23 13 19 2 16 22 17	BiLin	15 Reg.TH
18	14 15 17 23 3 6 22 8 2 9 1 20 11 7 13	BiLin	15 Reg.TH
19	18 19 12 4 10 21 22 9 14 1 2 20 17 6 5	BiLin	15 Reg.TH
20	3 16 15 12 4 10 23 5 18 20 14 22 9 19 17	BiLin	15 Reg.TH

Tabla N° 13: Cálculo de expresiones para mejor ajuste de curvas de regresión

Cod. Caso	Prop.Mod.Dinámico	Comentario	Valores	Nro Pisos	Proc.Estático	Calculada			Propuesta		
						q	Correlación	Pendiente	q	Correlación	Pendiente
3	BiLin	12 Reg.TH	Promedio	4 Pisos	ASCE 7/16_f(PTe)	0.60	0.99	0.9	0.60	0.99	0.9
					ASCE 7/16_f(PTd)	0.78	0.95	0.9	0.80	0.95	0.9
					ASCE 7/10	0.46	0.96	0.9	0.45	0.96	0.9
4	BiLin	12 Reg.TH	Promedio	4 Pisos	ASCE 7/16_f(PTe)	0.55	0.99	0.9	0.60	0.99	1.0
					ASCE 7/16_f(PTd)	0.71	0.96	0.9	0.80	0.96	1.0
					ASCE 7/10	0.42	0.96	0.9	0.45	0.96	1.0
19	BiLin	15 Reg.TH	Promedio	8 Pisos	ASCE 7/16_f(PTe)	0.56	0.98	0.9	0.60	0.98	1.0
					ASCE 7/16_f(PTd)	0.72	0.93	0.9	0.80	0.93	1.0
					ASCE 7/10	0.43	0.95	0.9	0.45	0.95	1.0
20	BiLin	15 Reg.TH	Promedio	8 Pisos	ASCE 7/16_f(PTe)	0.51	0.99	0.9	0.60	0.99	1.1
					ASCE 7/16_f(PTd)	0.66	0.96	0.9	0.80	0.96	1.1
					ASCE 7/10	0.39	0.96	0.9	0.45	0.96	1.1

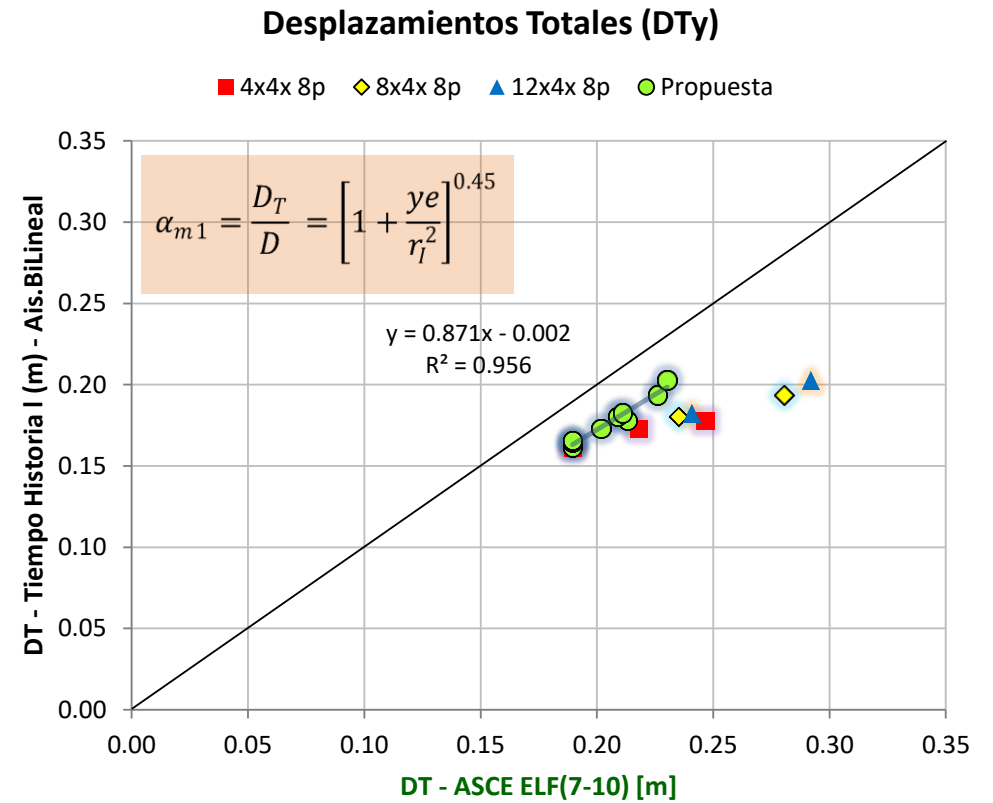
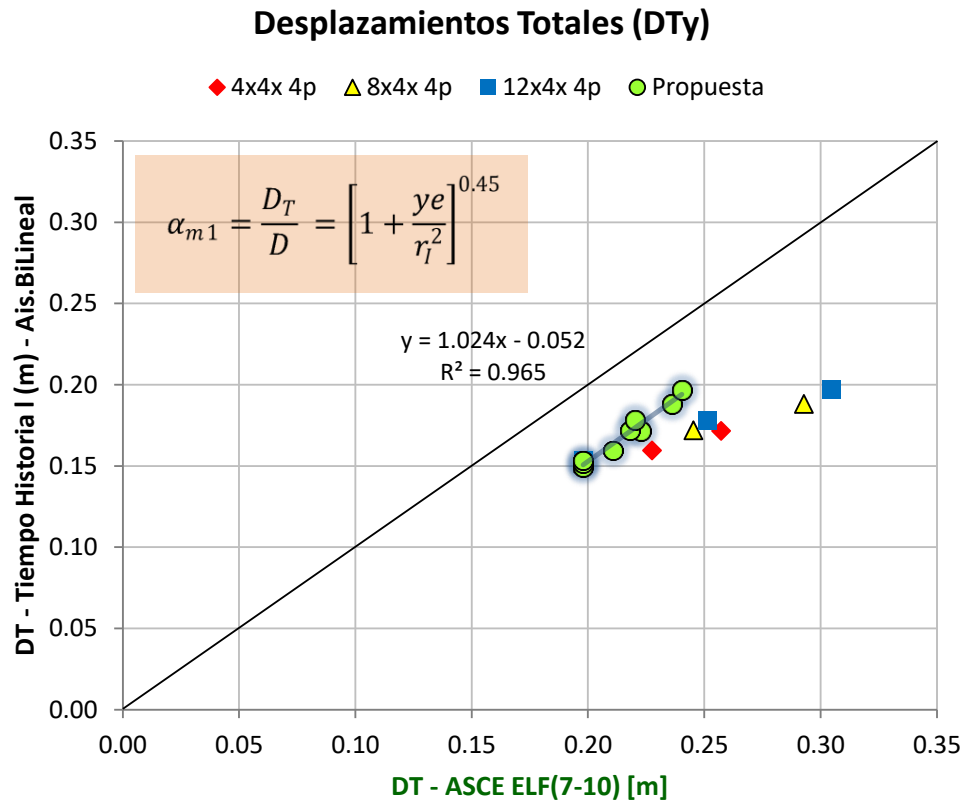
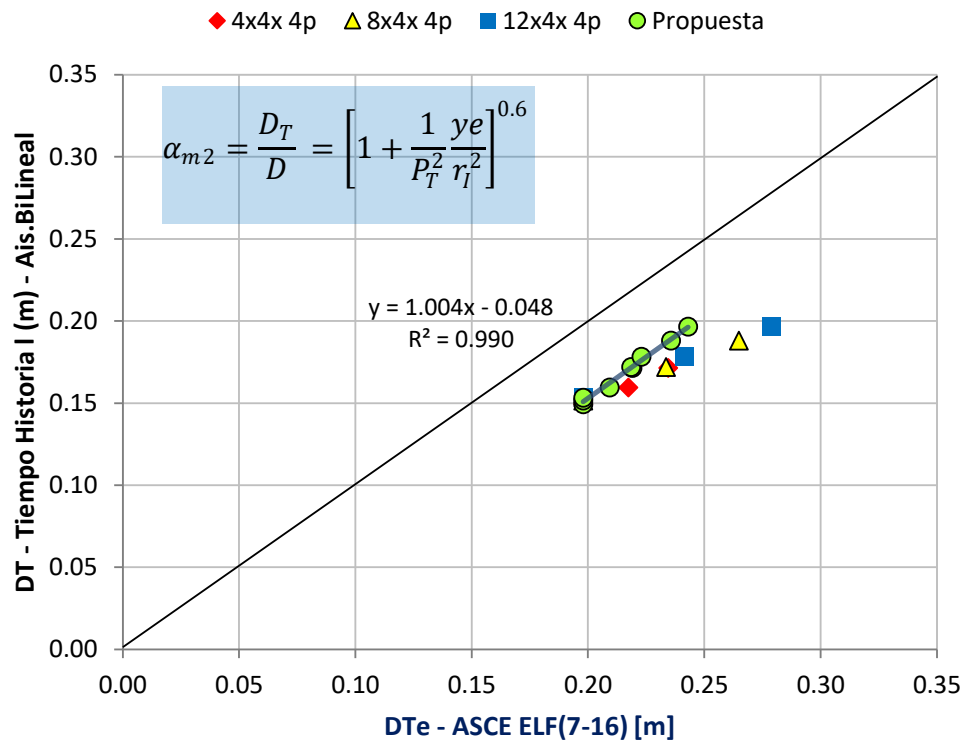


Figura N° 39: Planteamiento de ecuación para el ELF del ASCE 7-10– dirección Y

Desplazamientos Totales (DTy)



Desplazamientos Totales (DTy)

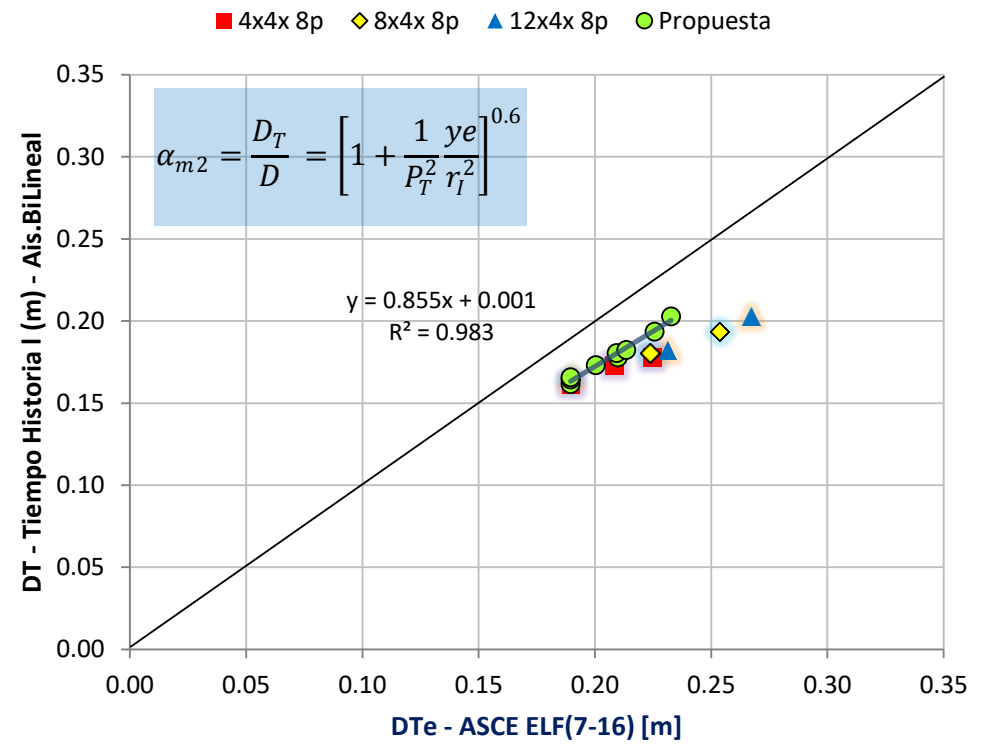
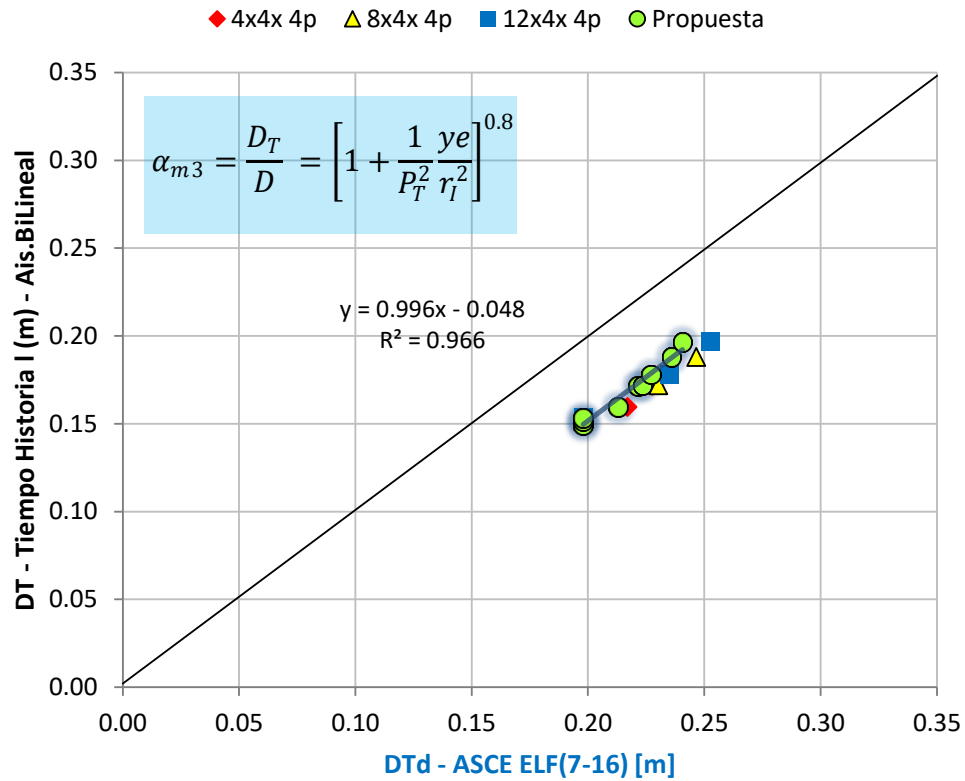


Figura N° 40: Planteamiento de ecuación para el ELF del ASCE 7-16 empleando “PTe”– dirección Y

Desplazamientos Totales (DTy)



Desplazamientos Totales (DTy)

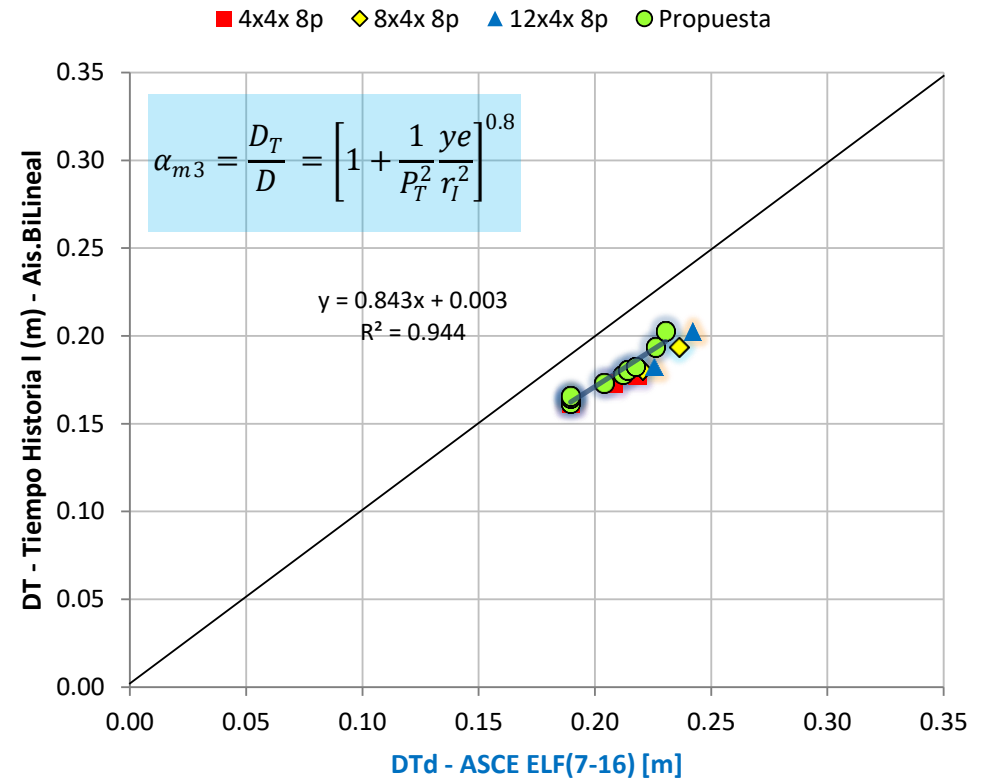


Figura N° 41: Planteamiento de ecuación para el ELF del ASCE 7-16 empleando “PTd”– dirección Y

5.5. Verificación de resultados con señales escaladas en el dominio de la frecuencia

Con el propósito de verificar las ecuaciones planteadas se ha generado señales en la herramienta computacional SeismoArtif con el procedimiento de escalamiento en el dominio de la frecuencia, este procedimiento fue aplicado sobre registros reales (Real Accelerogram Adjustment) y sobre registros sintéticos (Synthetic Accelerogram Generation & Adjustment), alcanzado los 20 pares de registros para sismo de 500 años y 20 pares para sismo de 2500 años.

El proceso de evaluación consiste en determinar el promedio simple de los máximos valores de respuesta de los 20 pares y relacionarlos con la respuesta obtenida según la formulación planteada en la sección 5.4.

Los parámetros de control para la valoración de las ecuaciones planteadas se hacen en función a la pendiente (m) de la regresión lineal (cuyo valor cercano a la unidad representa una correlación uniforme entre los métodos estáticos y tiempo historia) y la varianza R^2 (cuya aproximación a la unidad indica la escasa dispersión entre valores individuales de las respuestas al desplazamiento).

El resumen del análisis de verificación se presenta en la Tabla N° 14, concluyéndose que las ecuaciones planteadas proporcionan un “mejor” ajuste respecto de la respuesta al desplazamiento. Se ilustra en la Figura N° 42 y Figura N° 43, parte de los resultados encontrados en la Tabla N° 14.

Tabla N° 14: Comparación de respuestas según ecuaciones planteadas para sismos de 500 y 2500 años

Nro	Evaluación	Modelos	Sismo	Elementos de valoración	
				Pendiente (m)	Varianza (R^2)
1	Ecuación 19	4 Pisos	500 años	1.11	0.96
			2500 años	1.07	0.97
		8 Pisos	500 años	0.96	0.96
			2500 años	0.80	0.91
2	Ecuación 20	4 Pisos	500 años	1.09	0.98
			2500 años	1.04	0.99
		8 Pisos	500 años	0.94	0.98
			2500 años	0.79	0.95
3	Ecuación 21	4 Pisos	500 años	1.09	0.98
			2500 años	1.04	0.98
		8 Pisos	500 años	0.93	0.94
			2500 años	0.78	0.90



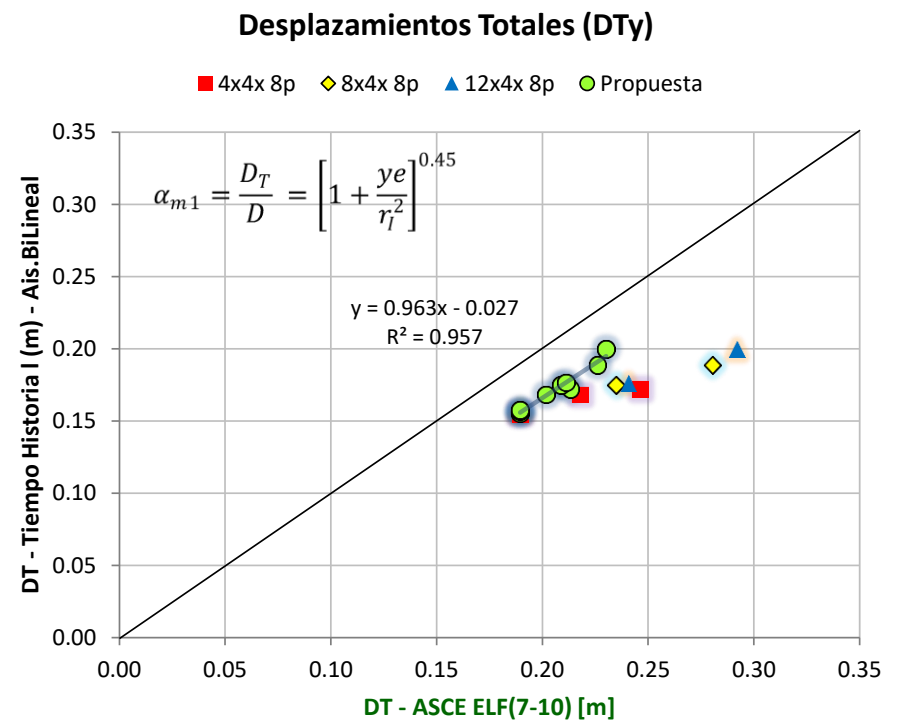
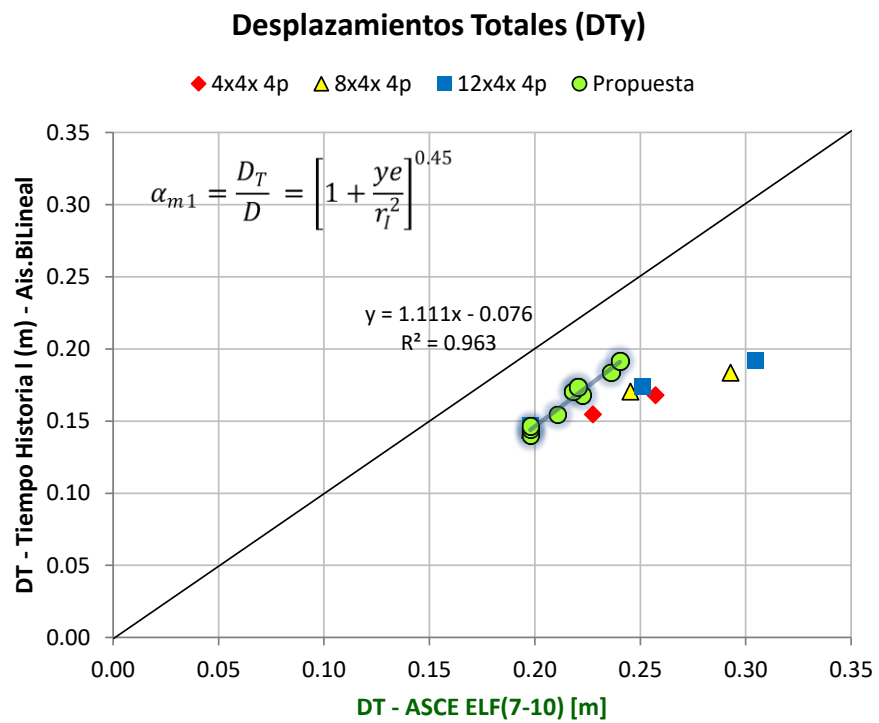
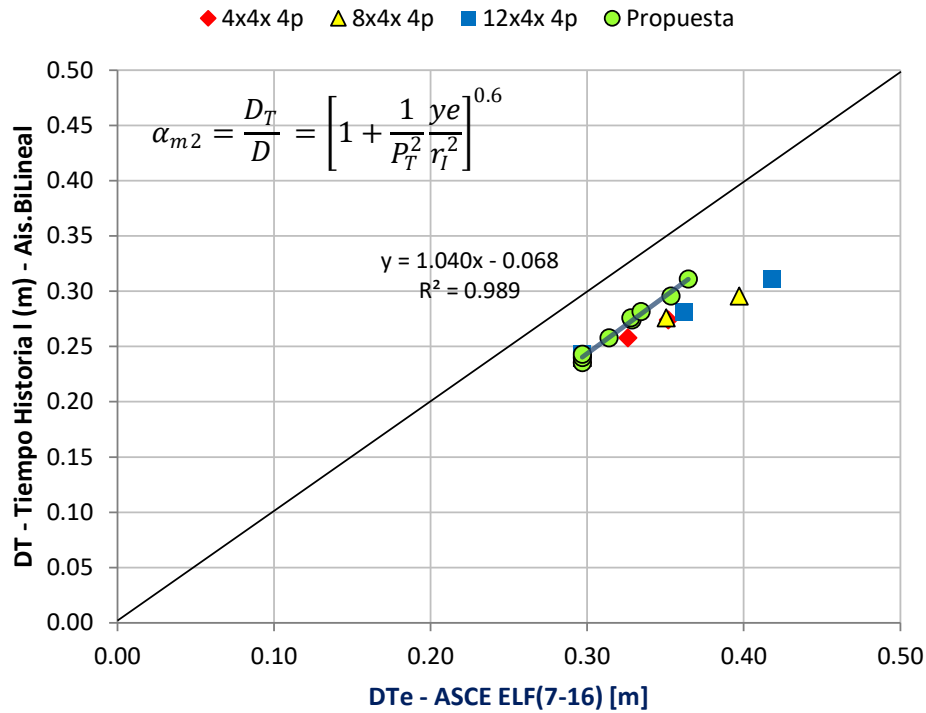


Figura N° 42: Verificación de la ecuación (20) para valores promedio de sismos de 500 años

Desplazamientos Totales (DTy)



Desplazamientos Totales (DTy)

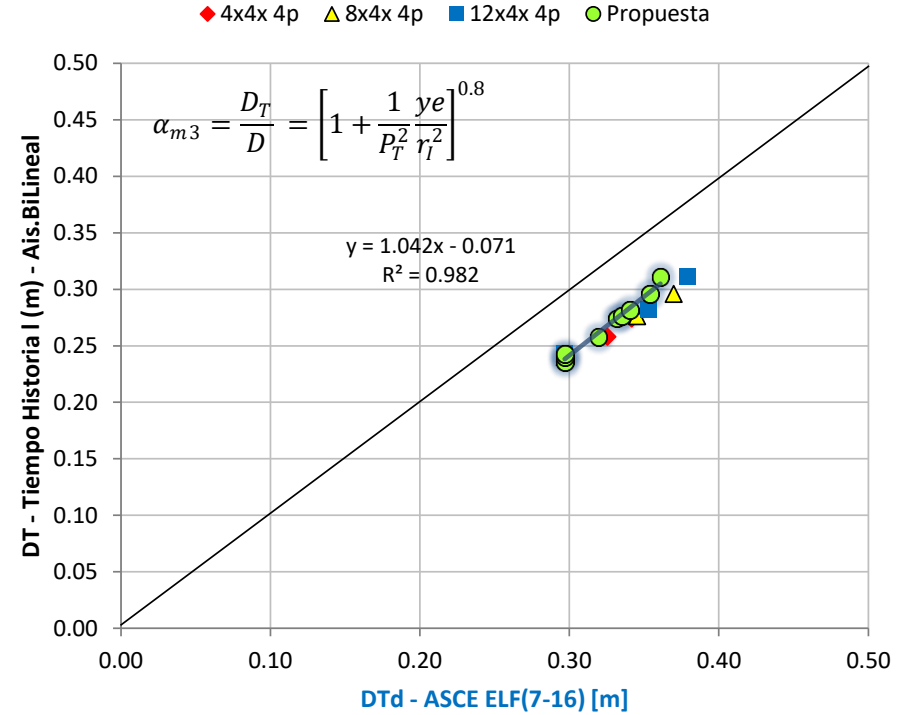


Figura N° 43: Verificación de la ecuación (21) y (22) para valores promedio de sismos de 2500 años

5.6. Revisión de parámetros de desempeño de estructuras analizadas

Para las estructuras modeladas numéricamente (e ilustradas en la Figura N° 6) con la demanda sísmica de diseño y sismo considerado máximo de la sección 5.5, se ha verificado las hipótesis de trabajo contempladas en la sección 1.6 con límites en la aceleración pico y en la distorsión angular de entrepiso, todo ello para dar por válido que las superestructuras de los casos en análisis mantengan sus propiedades en el rango elástico lineal y que la interfaz de aislamiento de cada caso permanezca en un rango no lineal, y que en general garanticen un desempeño adecuado de las estructuras analizadas. Se detalla a continuación los resultados obtenidos.

Distorsiones angulares de entrepiso:

La Figura N° 45, muestra los picos de los promedios de los máximos valores de distorsión angular de entrepiso de los veinte pares de registros espectro-compatibles con sus respectivos valores de excentricidad. Así por ejemplo la estructura de 12x4x4p con 5% de excentricidad en planta y con demanda sísmica de diseño, presenta una distorsión angular máxima de entrepiso igual a 0.0016, muy por debajo del límite establecido de 0.003.

Así mismo la Figura N° 46, muestra que las distorsiones angulares de entrepiso para sismo con periodo de retorno de 2500 años posee valores máximos inferiores a 0.0024 (<0.003 límite establecido).

De los casos analizados y presentados en la Figura N° 45 y Figura N° 46 podemos inferir:

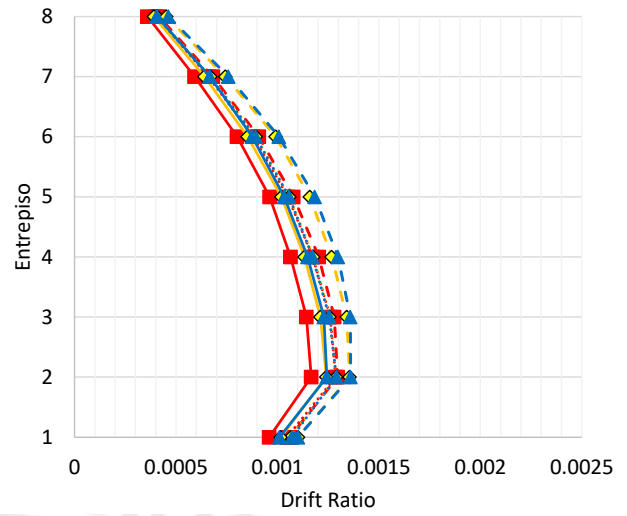
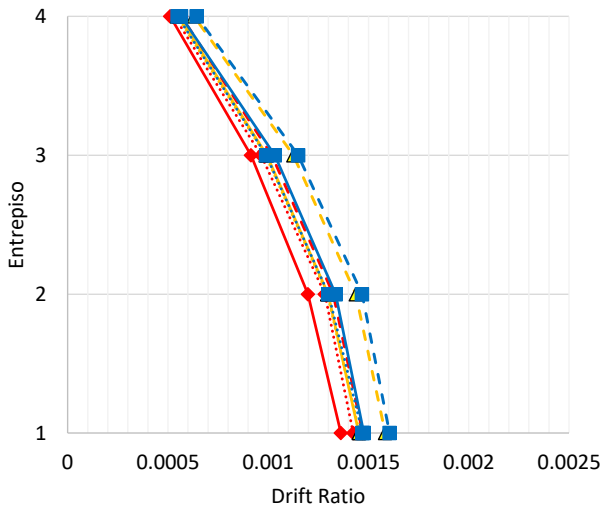
- a) Las estructuras aisladas analizadas que poseen una misma configuración en planta y un mismo porcentaje de excentricidad presentan menor distorsión angular para los casos de ocho pisos respecto de los casos de cuatro pisos. Situación probablemente influenciada por el mayor amortiguamiento teórico que poseen edificios con mayor altura.
- b) En los casos analizados se evidencia que a mayor alargamiento de la planta del edificio se encuentra una mayor distorsión angular de entrepiso.
- c) En todos los casos se ha encontrado que independientemente de su relación de aspecto los edificios que no poseen excentricidad y para un mismo número de pisos, se tiene que la máxima distorsión angular de entrepiso presenta valores similares.
- d) Para los casos analizados se ha encontrado que los máximos valores en relación a la distorsión angular, se ha presentado para excentricidades del 5%.

- e) Finalmente es posible afirmar que de los casos analizados, las hipótesis de trabajo respecto de considerar una interfaz de aislamiento con propiedades mecánicas no lineales y propiedades mecánicas lineales elásticas en la superestructura es correcta y que no influyeron en los resultados que sirvieron para el planteamiento de las expresiones propuestas en las ecuaciones (20), (21) y (22).

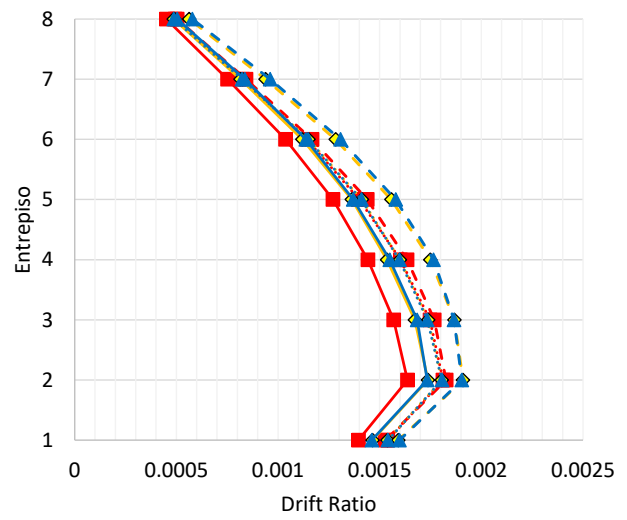
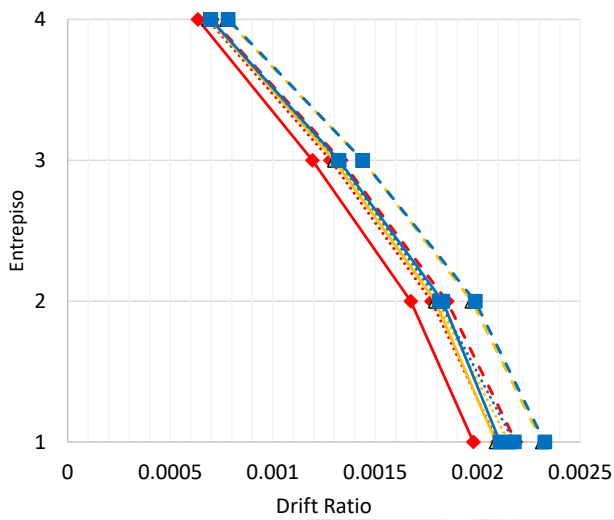
La Figura N° 44 presenta el detalle de las distorsiones por cada piso y por cada caso analizado.



Sismo de 500 años



Sismo de 2500 años



-◆..... 4x4.p4(0)
 - - -◆- - - 4x4.p4(5)
 - - -◆- - - 4x4.p4(10)
■..... 4x4.p8(0)
 - - -■- - - 4x4.p8(5)
 - - -■- - - 4x4.p8(10)
-△..... 8x4.p4(0)
 - - -△- - - 8x4.p4(5)
 - - -△- - - 8x4.p4(10)
◇..... 8x4.p8(0)
 - - -◇- - - 8x4.p8(5)
 - - -◇- - - 8x4.p8(10)
-■..... 12x4.p4(0)
 - - -■- - - 12x4.p4(5)
 - - -■- - - 12x4.p4(10)
▲..... 12x4.p8(0)
 - - -▲- - - 12x4.p8(5)
 - - -▲- - - 12x4.p8(10)

Figura N° 44: Distorsiones angulares de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con $T_r=500$ años y $T_r=2500$ años

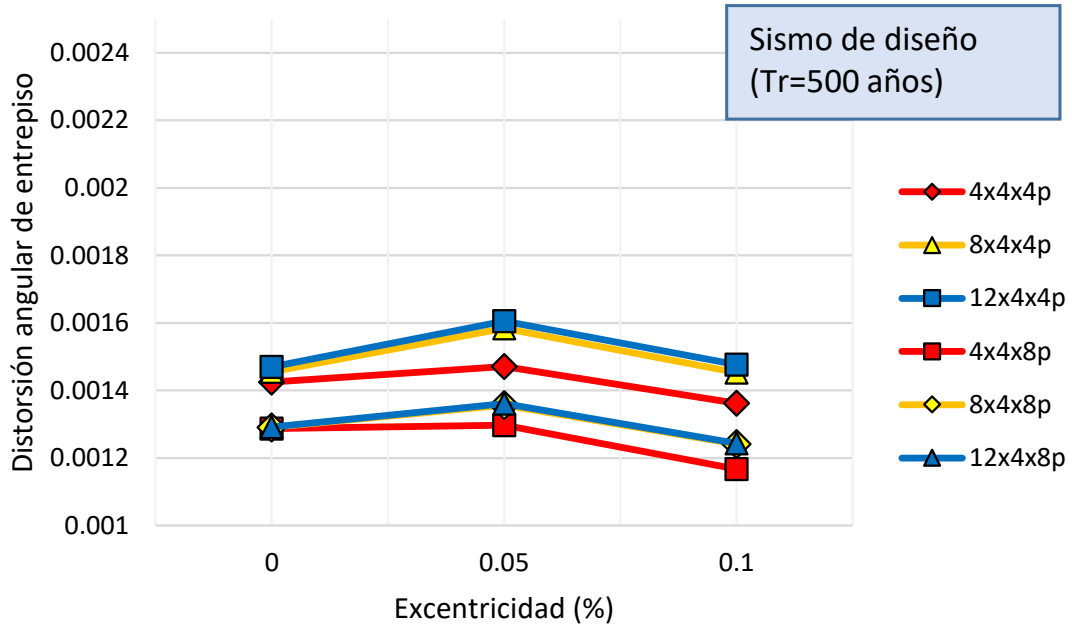


Figura N° 45: Máximas distorsiones angulares de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=500 años

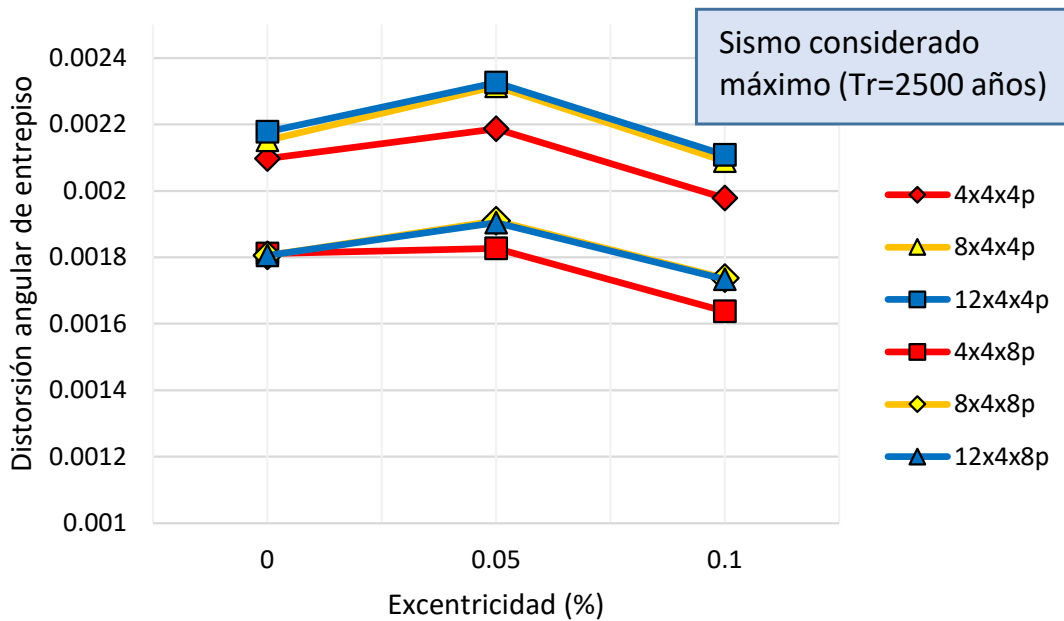


Figura N° 46: Máximas distorsiones angulares de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=2500 años

Aceleraciones de entrepiso:

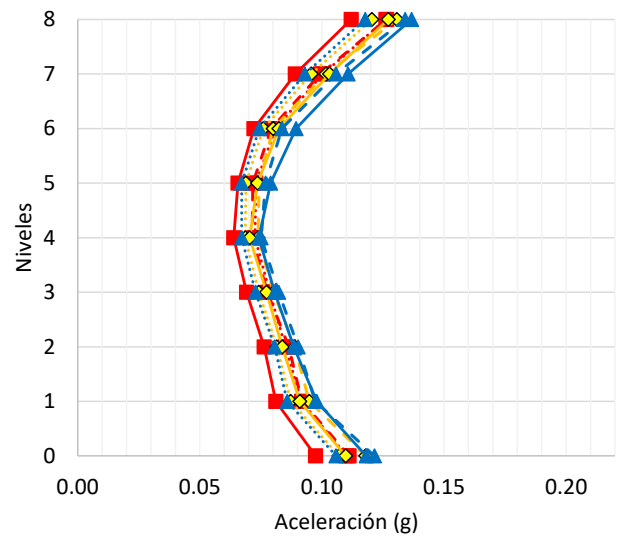
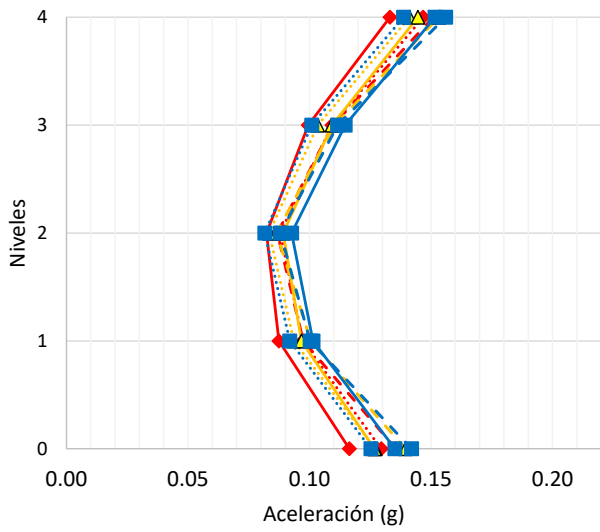
Otro parámetro de desempeño estructural se presenta en la Figura N° 48 y Figura N° 49 donde se muestra los picos de los valores promedio de los máximos valores de aceleración de entrepiso de los veinte pares de registros compatibilizados habiéndose encontrado, en todos los casos, valores inferiores a 0.20g ($g=9.81\text{m/s}^2$) tanto para sismo con periodos de retorno de 500 y 2500 años.

De los casos analizados podemos indicar:

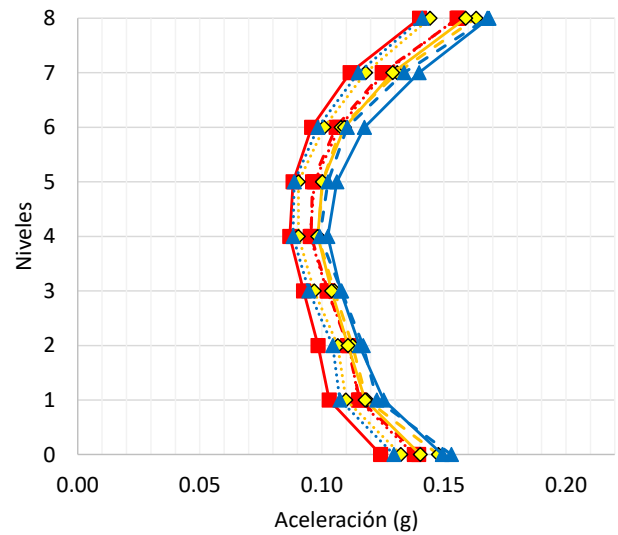
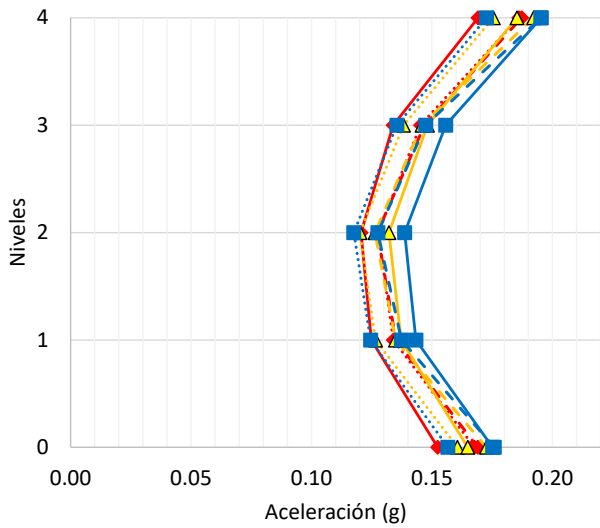
- a) Los valores más altos respecto de las respuestas de aceleración se presenta en los casos con menor número de niveles (cuatro pisos).
- b) Los edificios con relación de aspecto más alargada presentan mayores valores de aceleración respecto de los edificios menos alargados, ello para excentricidades de 5% y 10%.
- c) Los edificios con relación de aspecto en planta 1:1 tienden a presentar menor aceleración cuando la excentricidad en planta es del 10%.
- d) Los edificios con relación de aspecto en planta 1:3 poseen mayor aceleración a medida que su excentricidad en planta es mayor.
- e) Los edificios que no poseen excentricidad ($e=0\%$) presentan mayores aceleraciones de entrepiso en los casos con relaciones de aspecto 1:1.
- f) De forma similar a lo afirmado respecto de las distorsiones máximas de entrepiso, las aceleraciones de entrepiso encontradas poseen valores inferiores al límite de 0.2 veces la aceleración de la gravedad, para sismos de 500 y 2500 años, validando así la hipótesis de comportamiento elástico lineal de la superestructura en los casos analizados.

La Figura N° 47 presenta el detalle de las distorsiones por cada piso y por cada caso analizado.

Sismo de 500 años



Sismo de 2500 años



- | | | | | | |
|------------------------|----------------|-----------------|------------------------|----------------|-----------------|
|◆..... 4x4.p4(0) | -◆- 4x4.p4(5) | —◆— 4x4.p4(10) |■..... 4x4.p8(0) | -■- 4x4.p8(5) | —■— 4x4.p8(10) |
|▲..... 8x4.p4(0) | -▲- 8x4.p4(5) | —▲— 8x4.p4(10) |◇..... 8x4.p8(0) | -◇- 8x4.p8(5) | —◇— 8x4.p8(10) |
|■..... 12x4.p4(0) | -■- 12x4.p4(5) | —■— 12x4.p4(10) |▲..... 12x4.p8(0) | -▲- 12x4.p8(5) | —▲— 12x4.p8(10) |

Figura N° 47: Aceleraciones de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con $T_r=500$ años y $T_r=2500$ años

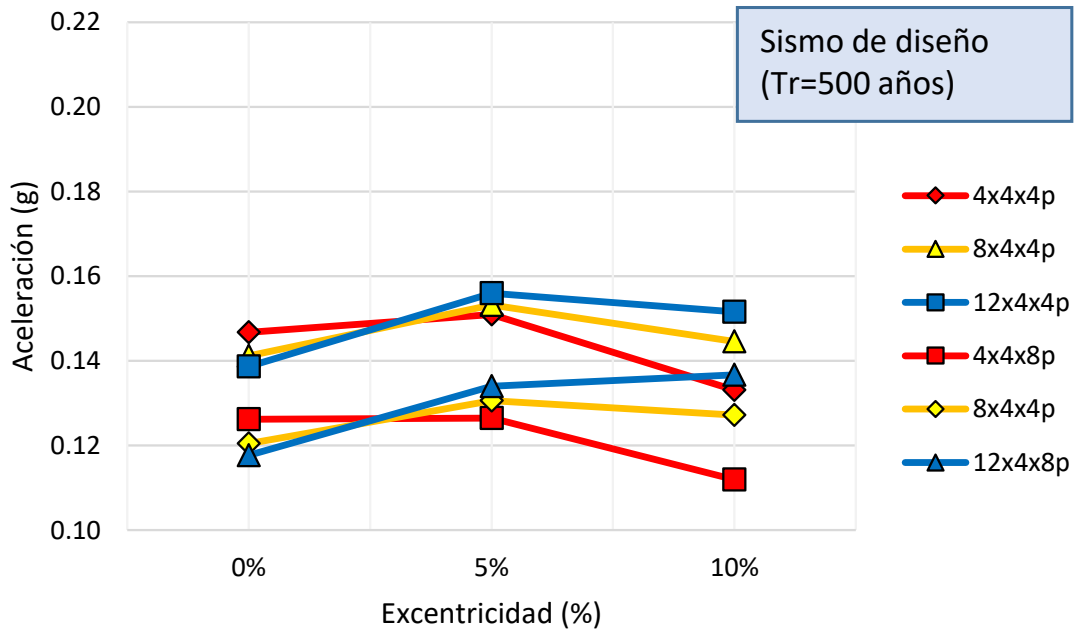


Figura N° 48: Máximas aceleraciones de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=500 años

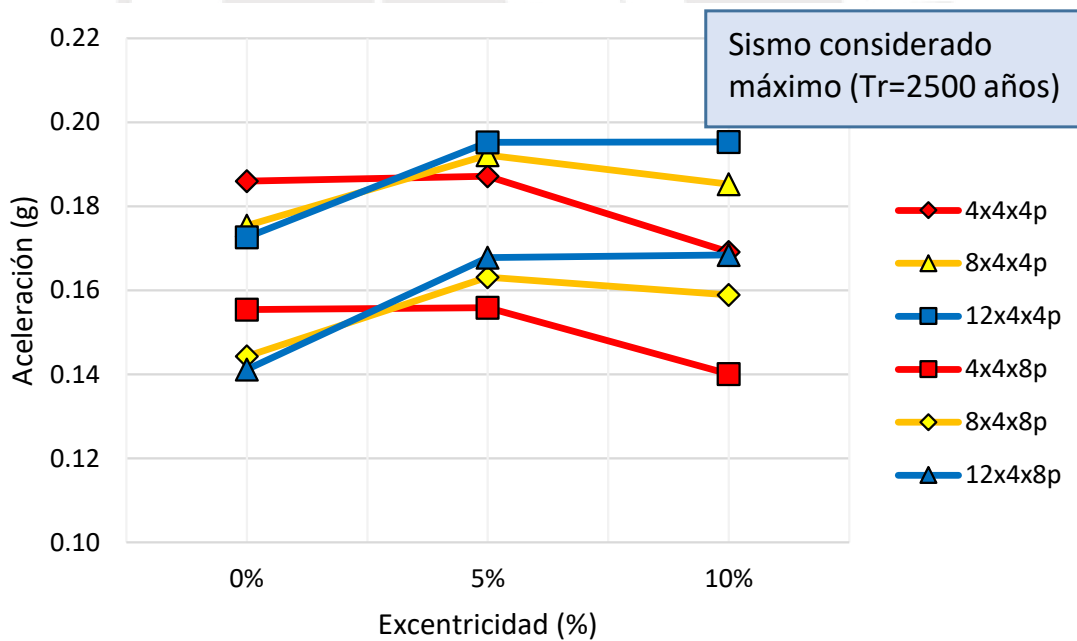


Figura N° 49: Máximas aceleraciones de entrepiso promedio de cada caso numérico en análisis, en la dirección Y, para sismo con Tr=2500 años

5.7. Verificación de resultados con caso numérico y distribución real de masa

Descripción del caso de estudio

Los planteamientos presentados en las ecuaciones (20), (21) y (22) se verifican en un caso de un proyecto con una distribución real de masas y rigideces. El caso en estudio considera la distribución arquitectónica real de un proyecto de infraestructura hospitalaria; las cargas vivas y cargas muertas se repartieron por unidad de área (distribuyéndose en función al tipo de uso por ambiente conforme se aprecia en la Figura N° 50 y acorde a la norma técnica de edificaciones del Perú E.020).

El caso en estudio, visualizado de forma tridimensional en Figura N° 52, presenta para la superestructura: columnas de 0.45m x 0.45m, vigas de 0.35m x 0.70m, losa maciza con espesor de 0.20m y losa nervada bidireccional con espesor de 0.25. El nivel de aislamiento presenta vigas de 1.00m x 0.50m, dados de concreto de 1.00m x 1.00m y losa maciza de 0.25m de espesor. Adicionalmente la luz de mayor longitud en la dirección horizontal "X" es de 7.20m y en la dirección vertical "Y" es de 6.90m, las alturas típicas de los entresijos son de 3.50m y del primer nivel de 4.00m. El número total de aisladores es de 56 unidades ubicados bajo cada columna.

La Figura N° 50 presenta la zonificación de los ambientes del proyecto hospitalario diferenciados en función a los planos arquitectónicos, con excepción del nivel de azotea donde la carga viva y muerta se considera uniforme. La Figura N° 51 muestra las losas que cubren cada nivel presentado en la imagen de sectorización de ambientes.

Las consideraciones respecto de las propiedades del caso en estudio del sistema de aislamiento son similares a lo presentado en la sección 3.1.

Los parámetros resultantes del análisis completo de la estructura en estudio para el sistema de aislamiento, son presentados de forma genérica e independiente de un aislador en particular, detalles del tipo de material y construcción de los dispositivos no fueron necesarios para el propósito del presente estudio.

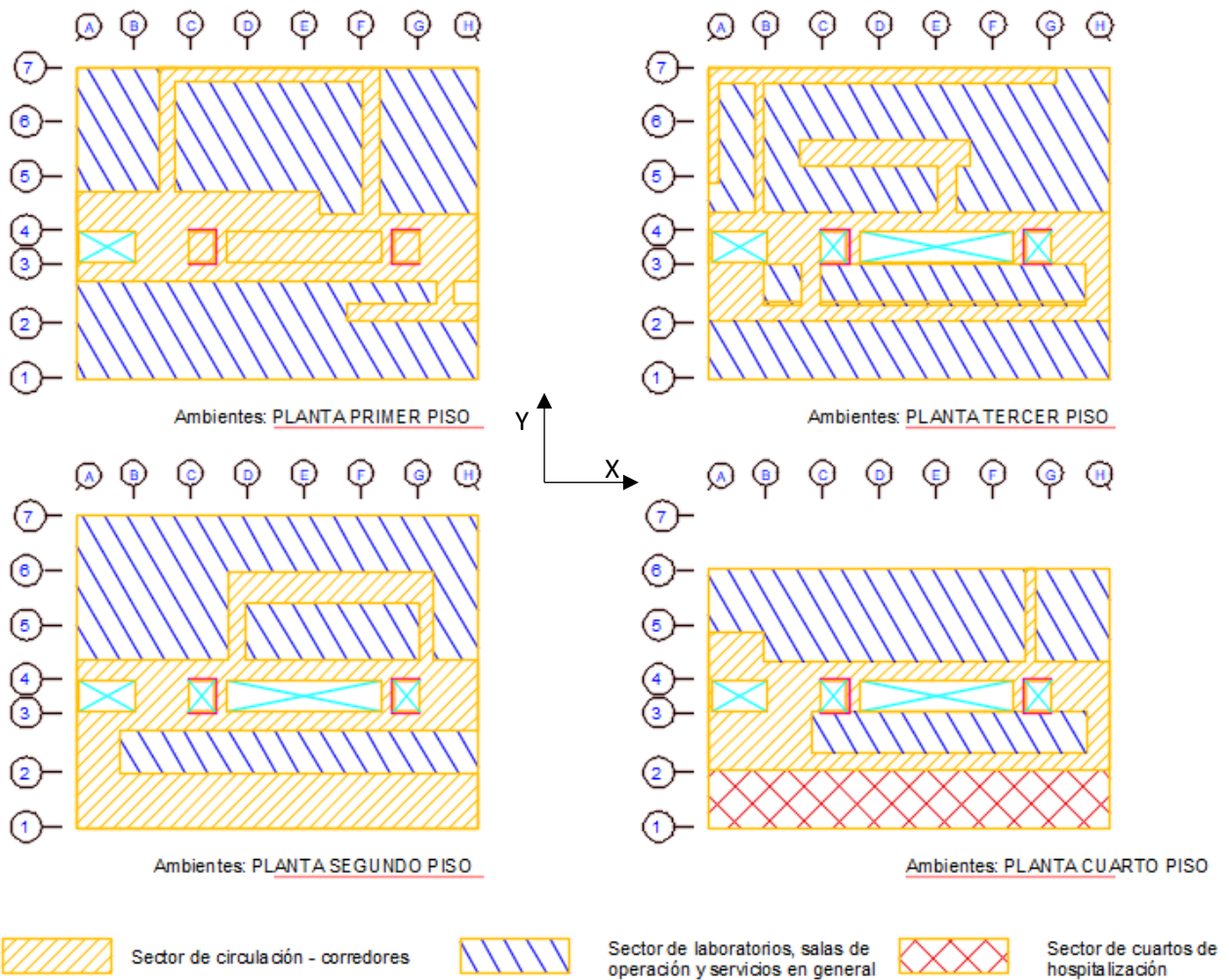


Figura N° 50: Clasificación en planta de los ambientes de un proyecto de infraestructura hospitalaria en función al tipo de uso.

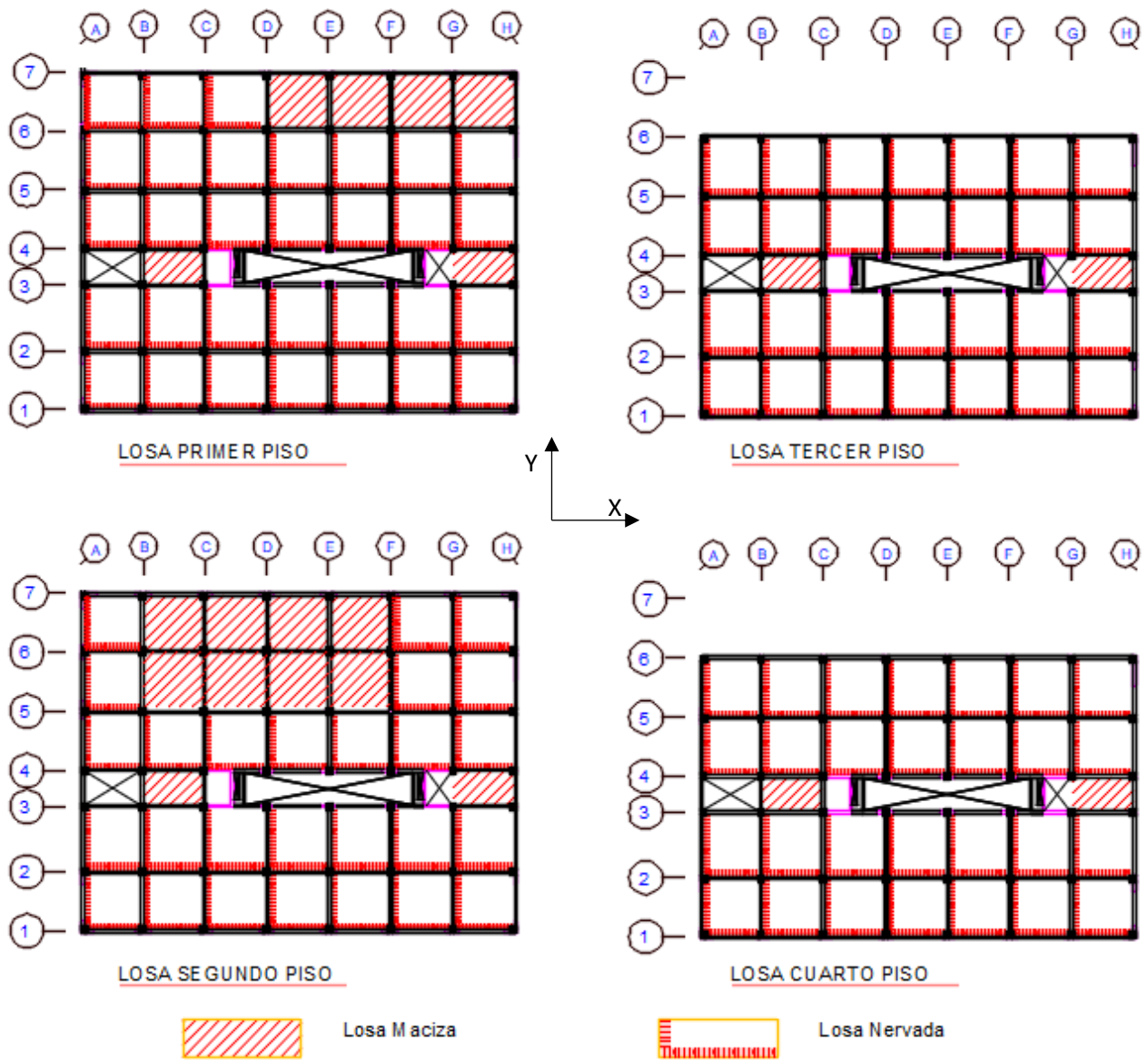


Figura N° 51: Sistema de losas consideradas en proyecto hospitalario.

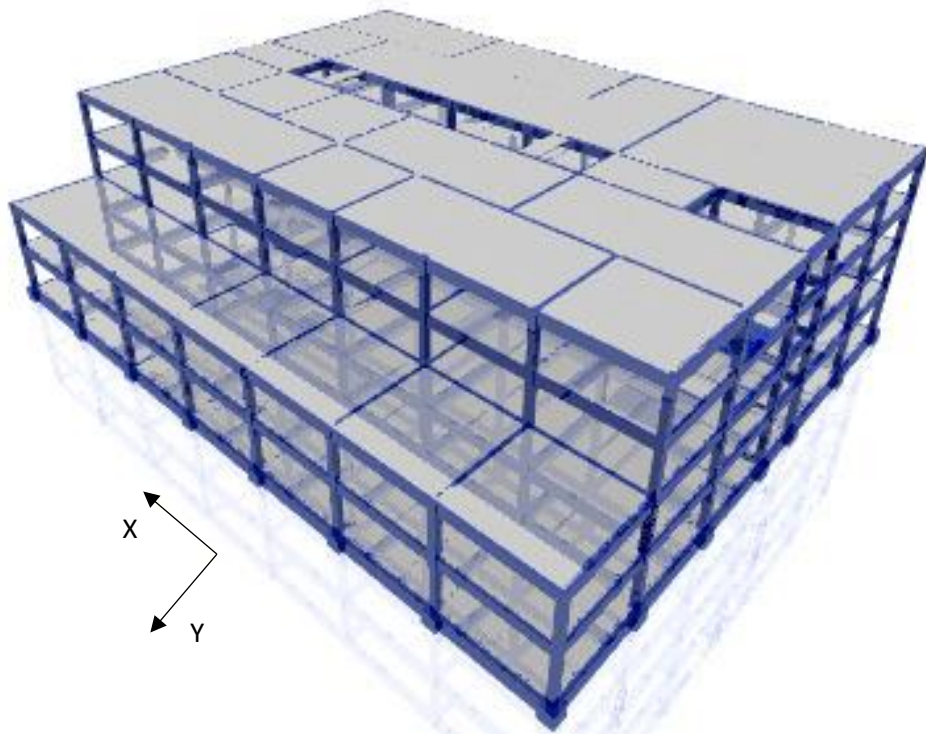


Figura N° 52: Modelo numérico de un proyecto con distribución real de masas y rigideces.

Resultados del caso de estudio

La masa de la superestructura y sistema de aislamiento resultan de 632.26 tonf-s²/m y 297.53 tonf-s²/m, respectivamente. Los periodos fundamentales para las direcciones "X", "Y" y "θ" resultan de 3.39 s, 3.09 s y 2.58 s respectivamente. Así mismo la razón de amortiguamiento para el sistema $\xi=15\%$.

Los parámetros finales para el análisis no lineal en los dispositivos del sistema de aislamiento resultan:

- Rigidez (K_1) = 600.21 tonf/m
- Carga de fluencia (f_y) = 4.50 tonf
- Relación de rigidez post fluencia (K_1/K_2) = 0.10

Tabla N° 15: Ubicación del centro de masas y rigideces por cada nivel del caso de estudio

Story	Diaphragm	Mass X tonf-s ² /m	Mass Y tonf-s ² /m	XCCM m	YCCM m	XCR m	YCR m
Piso 4(Azotea)	D1	109.31	109.31	28.35	12.97	25.22	19.31
Piso 3	D1	147.62	147.62	28.43	13.09	25.23	19.51
Piso 2	D1	189.08	189.08	28.44	14.55	25.24	19.67
Piso 1	D1	186.25	186.25	28.40	15.29	25.25	19.66
Plataforma	D1	297.53	297.53	28.35	15.46	25.25	19.66
Promedio:				28.39	14.27		

Con los resultados obtenidos es posible calcular las excentricidades naturales del sistema estructural como:

$$e_x = \left| \frac{X_{CM} - X_{CR}}{L_x} \right| \cdot 100\%, \quad e_y = \left| \frac{Y_{CM} - Y_{CR}}{L_y} \right| \cdot 100\%$$

Obteniendo:

$$e_x = 3.14 \text{ m}, \quad e_y = 5.39 \text{ m}$$

$$e_x = 6.2\%, \quad e_y = 13.7\%$$

i) Resultados del procedimiento “estático” para la estimación de desplazamientos y relación de desplazamientos (DT/D)

La estimación de desplazamientos por las ecuaciones propuestas de la sección 5.4, se realizaron para la dirección “X” e “Y”. Se resume los valores requeridos para estimar el valor “α=DT/D” y los desplazamientos máximos.

$$b = 50.8\text{m}, \quad d = 39.4\text{m}, \quad y_{(\text{Sismo } Y)} = 25.55\text{m}, \quad y_{(\text{Sismo } X)} = 19.74\text{m}, \quad r_f = 18.56\text{m}$$

$$P_{Te} = 1.14, \quad P_{Td} = 1.31$$

$$\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2) = 26894, \quad N = 56$$

Los desplazamientos estimados por procedimientos estáticos de acuerdo a lo indicado en la sección 2.3 nos brinda valores de desplazamiento:

Para sismos de 500 años:

$$\text{Desplazamiento en el Centro de Rigidez} \quad : \quad D_x = 0.19\text{m}, \quad D_y = 0.19\text{m}$$

Para sismos de 2500 años:

$$\text{Desplazamiento en el Centro de Rigidez} \quad : \quad D_x = 0.29, \quad D_y = 0.29\text{m}$$

Los valores de los factores de amplificación de desplazamientos “ α ”, según las expresiones planteadas se presentan:

- Relación de desplazamiento por la Ecuación modificada para el ELF del ASCE 7-10:

$$\alpha = \frac{D_T}{D} = \left[1 + \frac{ye}{r_l^2} \right]^{0.45} = \left[1 + y \frac{12e}{b^2+d^2} \right]^{0.45} \rightarrow \begin{cases} \text{Direccion X: } \alpha_x = 1.129 \\ \text{Direccion Y: } \alpha_y = 1.098 \end{cases}$$

- Relación de desplazamiento por la Ecuación modificada para el ELF del ASCE

$$7-16, \text{ cuando: } P_T = P_{T_e} = \frac{1}{r_l} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 + y_i^2)}{N}}$$

$$\alpha = \frac{D_T}{D} = \left[1 + \frac{1}{P_{T_e}^2} \frac{ye}{r_l^2} \right]^{0.6} = \left[1 + \left(\frac{y}{P_{T_e}^2} \right) \frac{12e}{b^2+d^2} \right]^{0.6}, \rightarrow \begin{cases} \text{Direccion X: } \alpha_x = 1.127 \\ \text{Direccion Y: } \alpha_y = 1.099 \end{cases}$$

- Relación de desplazamiento por la Ecuación modificada para el ELF del ASCE

$$7-16, \text{ cuando: } P_T = P_{T_d} = \frac{T}{T_\theta}$$

$$\alpha = \frac{D_T}{D} = \left[1 + \frac{1}{P_{T_d}^2} \frac{ye}{r_l^2} \right]^{0.8} = \left[1 + \left(\frac{y}{P_{T_d}^2} \right) \frac{12e}{b^2+d^2} \right]^{0.8}, \rightarrow \begin{cases} \text{Direccion X: } \alpha_x = 1.142 \\ \text{Direccion Y: } \alpha_y = 1.126 \end{cases}$$

ii) Resultados del procedimiento “Dinámico tiempo-historia” para la estimación de desplazamientos y relación de desplazamientos (DT/D)

Los desplazamientos promedio de los máximos valores de desplazamiento por cada par de registro tiempo historia para los 20 registros sísmicos indicados en la sección 5.5, nos da los resultados:

Para sismos de 500 años:

Desplazamiento en el Centro de Rigidez : Dx= 0.130m, Dy= 0.132m,
Desplazamiento Total Máximo : DTx=0.145m, DTy=0.149m

Para sismos de 2500 años:

Desplazamiento en el Centro de Rigidez : Dx= 0.219m, Dy= 0.224m,
Desplazamiento Total Máximo : DTx=0.242m, DTy=0.251m

Por tanto el valor de “ $\alpha=DT/D$ ” en la dirección “X” e “Y” nos da:

Para sismos de 500 años:

$$\alpha_x = 1.115, \alpha_y = 1.129$$

Para sismos de 2500 años:

$$\alpha_x = 1.105, \alpha_y = 1.121$$

La Tabla N° 16, resume los resultados obtenidos del análisis del caso en estudio en la sección actual además presenta los resultados de la aplicación de la formulación planteada para los procedimientos estáticos del ASCE 7 en su versión original y en sus versiones modificadas.

Del análisis presentado en la Tabla N° 16 podemos desprender que para todos los resultados, las expresiones propuestas brindan un mejor ajuste sin dejar de ser conservadora. Si bien resulta que los factores “ α ” son pequeños en todos los casos, debido a la configuración estructural del caso analizado, el propósito de la presente verificación fue predecir la respuesta al desplazamiento en una distribución real. Se puede además indicar que los resultados obtenidos concuerdan con los analizados de forma exhaustiva en las secciones 5.4 y 5.5

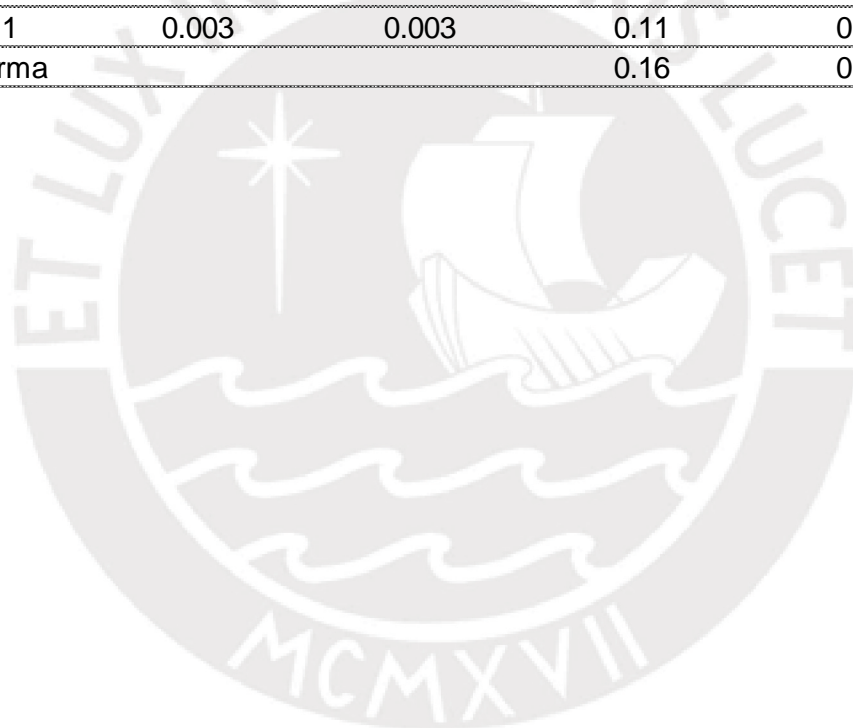
Tabla N° 16: Resumen de resultados del análisis caso de estudio de proyecto real

Procedimiento de análisis	Sismo de 500 años						Sismo de 2500 años					
	Dx	DTx	α_x	Dy	DTy	α_y	Dx	DTx	α_x	Dy	DTy	α_y
Análisis Dinámico												
Tiempo-Historia	0.13	0.145	1.115	0.132	0.149	1.129	0.219	0.242	1.105	0.224	0.251	1.121
Análisis Estático												
Expresiones Modificadas												
ASCE 7/10 Ecuación (20)	0.190	0.215	1.129	0.190	0.209	1.098	0.290	0.327	1.129	0.290	0.318	1.098
ASCE 7/16 Ecuación (21)	0.190	0.214	1.127	0.190	0.209	1.099	0.290	0.327	1.127	0.290	0.319	1.099
ASCE 7/16 Ecuación (22)	0.190	0.217	1.142	0.190	0.214	1.126	0.290	0.331	1.142	0.290	0.327	1.126
Expresiones Originales												
ASCE 7/10 Ecuación (7)	0.190	0.249	1.309	0.190	0.234	1.231	0.290	0.380	1.309	0.290	0.357	1.231
ASCE 7/16 Ecuación (12) - PTe	0.190	0.232	1.221	0.190	0.222	1.170	0.290	0.354	1.221	0.290	0.339	1.170
ASCE 7/16 Ecuación (12) - PTd	0.190	0.224	1.181	0.190	0.220	1.160	0.290	0.342	1.181	0.290	0.336	1.160

Finalmente y a efectos de validar los resultados del análisis, en la Tabla N° 17 se presenta los parámetros de desempeño del caso analizado, en una de las direcciones (Y).

Tabla N° 17: Parámetros de desempeño en caso de estudio de proyecto real –
Dirección “X” e “Y”

Piso	Promedio Max. Drift Ratio		Promedio Max. Acel.(g)	
	Sismo 500	Sismo 2500	Sismo 500	Sismo 2500
DIRECCION "X"				
Piso 4(Azotea)	0.001	0.001	0.18	0.15
Piso 3	0.002	0.002	0.11	0.11
Piso 2	0.002	0.003	0.08	0.10
Piso 1	0.002	0.003	0.09	0.14
Plataforma			0.12	0.21
DIRECCION "Y"				
Piso 4(Azotea)	0.001	0.002	0.23	0.27
Piso 3	0.002	0.003	0.16	0.19
Piso 2	0.002	0.003	0.11	0.15
Piso 1	0.003	0.003	0.11	0.15
Plataforma			0.16	0.19



CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

1. La estimación de desplazamientos laterales máximos (DT) en estructuras sísmicamente aisladas, acordes a la sismicidad peruana, pudo realizarse a partir de procedimientos estáticos empleando expresiones modificadas basadas en ecuaciones del código ASCE 7-10 y ASCE 7-16. Las relaciones entre procedimientos tiempo historia no lineal y estáticos demostraron uniformidad y coherencia cuando se emplearon los exponentes de modificación:
 - 0.45, para modificar la ecuación del ASCE 7-10
 - 0.60, para modificar la ecuación del ASCE 7-16 con $PT=P_{Te}$
 - 0.80, para modificar la ecuación del ASCE 7-16 con $PT=P_{Td}$
2. Es posible indicar que, para los casos analizados, la estimación de la respuesta de desplazamientos a nivel del sistema de aislamiento según las ecuaciones modificadas del ASCE 7 brindan resultados coherentes, aceptablemente conservadores y de tendencia uniforme lineal en favor de los procedimientos estáticos, con diferencias promedio entre 15% y 35% respecto de los resultados del análisis tiempo historia no lineal, según el número de pisos de los edificios analizados y según periodo de retorno del sismo analizado. Resaltando adicionalmente que la tendencia uniforme no se presenta en las expresiones originales del ASCE 7, presentando valores conservadores.
3. Producto de los análisis numéricos y del proceso comparativo de los casos de estudio concernientes a la estimación de los desplazamientos máximos a nivel del sistema de aislamiento, se puede afirmar que:
 - Emplear un análisis modal - espectral resulta conservador respecto de los análisis tiempo historia con propiedades lineales asignadas a los dispositivos de aislamiento sísmico, con diferencias promedio de hasta un 8%.
 - Así mismo, emplear análisis tiempo historia con propiedades lineales resulta conservador respecto de los análisis tiempo historia con propiedades no lineales asignadas a los dispositivos de aislamiento sísmico, con diferencias promedio de hasta un 18%.

4. De los casos analizados, el empleo directo de las ecuaciones originales (sin modificadores) del procedimiento estáticos (ELF) para la predicción de desplazamientos totales por efectos de torsión, se puede afirmar que:
 - El ASCE 7-10 brinda resultados muy conservadores con diferencias de hasta un 56% y con tendencia creciente, respecto del análisis tiempo historia no lineal.
 - El ASCE 7-16, con $PT=P_{Te}$, brinda resultados conservadores con diferencias de hasta un 35% y con tendencia creciente, respecto del análisis tiempo historia no lineal.
 - El ASCE 7-16, con $PT=P_{Te}$, brinda resultados conservadores con diferencias de hasta un 24% y con tendencia creciente, respecto del análisis tiempo historia no lineal.
5. Debido a las diferencias encontradas en los casos de análisis respecto a la estimación de los desplazamientos máximos (DT), entre los procedimientos estáticos originales (no modificados) del ASCE 7 respecto de los análisis tiempo historia no lineal, podemos afirmar que el ASCE 7-16 con $PT=P_{Td}$ brinda resultados con mejor ajuste respecto de sus pares ASCE 7-16 con $PT=P_{Te}$ y ASCE 7-10, sin embargo tiende a presentar mayor diferencia (24%) a mayores excentricidades y plantas con relación de aspecto mayor.
6. Finalmente según los datos obtenidos de todo el proceso de análisis y posterior verificación, se puede indicar que de los ajustes propuestos por medio de los exponentes de modificación proporcionan, entre sí, una utilidad práctica similar en la estimación del factor de amplificación ($\alpha=DT/D$) obtenidas a partir de las ecuaciones de los procedimientos estáticos del ASCE 7. Sin embargo, la expresión modificada del ASCE 7-16 con el exponente 0.80 es la que proporcionó, muy levemente, una mejor estimación cuando fue contrastado con los análisis tiempo historia no lineal.

Recomendaciones generales:

1. Se recomienda usar al menos 12 pares de registros espectro compatibles, en base a registros reales y/o registros artificiales, cuando se realicen análisis tiempo historia en edificios con aislamiento sísmico y emplear promedios como medida de tendencia central.

2. Emplear como base sismos con periodos de retorno de 2500 años y verificar siempre el estado elástico de la superestructura a partir de parámetros de desempeño relacionadas a la aceleración y distorsiones angulares de entrepiso.
3. Emplear medios de verificación de procedimientos dinámicos por medio del uso de procedimientos estáticos.

Recomendaciones para futuras investigaciones:

1. Estudiar la demanda de desplazamientos en estructuras con formas irregulares empleando las expresiones del ASCE 7-10, ASCE 7-16 y las expresiones “propuestas modificadas” a efectos de obtener expresiones particulares y/o generales para estructuras con plantas irregulares extremas.
2. Proseguir la investigación considerando una distribución no uniforme de dispositivos de aislamiento así como incorporar dispositivos no elastoméricos tales como péndulos de fricción.
3. Estudiar los desplazamientos totales de respuesta incorporando en el análisis el efecto por interacción suelo-estructura.
4. Realizar análisis comparativos variando la relación Q/W de los dispositivos de aislamiento.
5. Realizar análisis comparativos con demandas sísmicas de campo cercano (Distancia de ruptura $< 10\text{Km}$) así como considerando perfiles de suelo diferentes.
6. Investigar las implicancias de la técnica de escalamiento en la estimación de desplazamientos con efectos torsionales en estructuras sísmicamente aisladas.
7. Estudiar el efecto de la variación posicional no uniforme de los centros de masa en las plantas para edificios de baja altura, mediana altura y gran altura.

CAPITULO VII: REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abrahamson, N., 1992. Non-stationary spectral matching. *Seismological Research Letters*, 63(1), p. 30.
- Alhan, C. & Öncü-Davas, S., 2016. Performance limits of seismically isolated buildings under near-field earthquakes. *Engineering Structures*, Issue 116, pp. 83-94.
- American Society of Civil Engineers, 2016. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*. Reston(VA): American Society of Civil Engineers.
- Anagnostopoulos, S. A., Kyrkos, M. & Stathopoulos, K., 2015. Earthquake induced torsion in buildings: Critical review and state of the art. *Earthquakes and Structures*, 8(2), pp. 305-377.
- Basu, D., Constantinou, M. C. & Whittaker, A. S., 2014. An equivalent accidental eccentricity to account for the effects of torsional ground motion on structures. *Engineering Structures*, Issue 69, pp. 1-11.
- Bhagat, S. & Wijeyewickrema, A. C., 2017. Seismic response evaluation of base-isolated reinforced concrete buildings under bidirectional excitation. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 16(2), pp. 365-3382.
- Chen, X., Yang, T. & Shi, W., 2014. Influence of isolation hysteresis on the seismic performance of isolated buildings. *Structural Control and Health Monitoring*.
- Chimamphant, S. & Kasai, K., 2015. Comparative response and performance of base-isolated and fixed-base structures. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Issue 45, pp. 5-27.
- CISMID - UNI, 2013. *Generación de acelerogramas sintéticos para la costa del Perú*, Lima: SENCICO.
- Computer and Structures Inc., 2016. *ETABS 2016*. Berkeley, CA, USA: CSI.
- Escamilla Cruz, J. L. & Tena Colunga, A., 2003. *Respuesta torsional de aisladores sísmicos debida a excentricidades asociadas a las rigideces de la Superestructura*. Guajajuato-León, México, s.n.
- Escamilla Cruz, J. L., Tena Colunga, A., Félix Antonio, S. K. & Sánchez Solano, J. A., 2011. *Impacto de las Asimetrías de los centros de rigidez de la superestructura en las fuerzas cortantes desarrolladas en estructuras aisladas sísmicamente*. Aguascalientes, Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, p. 18.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2015. *FEMA P-751, NEHRP Recommended Provisions: Design Examples*. Washington, D.C.: FEMA.
- Federal Emergency Management Agency (FEMA), s.f. *Hazus-MH MR5 Technical Manual*, Washington, D.C.: FEMA.
- Hancock, J. y otros, 2006. An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets. *Journal of Earthquake Engineering*, Volumen 10, pp. 67-89.

- Heo, Y., Kunnath, S. K. & Abrahamson, N., 2011. Amplitude-Scaled versus Spectrum-Matched Ground Motions for Seismic Performance Assessment. *Journal of Structural Engineering*, Marzo, 3(137), pp. 278-288.
- Jangid, R. & Kelly, J., 2000. Torsional Displacements in Base-Isolated Buildings. *Earthquake Spectra*, 16(2), pp. 443-454.
- Khante, S. & Wankhade, L. R., 2010. Study of seismic response of symmetric and asymmetric base isolated building with mass asymmetric in plan. *International Journal of Civil and Structural Engineering*, pp. 897-909.
- Kilar, V. & Koren, D., 2009. Seismic behaviour of asymmetric base isolated structures with various distributions of isolators. *Engineering Structures*, Issue 31, pp. 910-921.
- Konstantinidis, D. & Nikfar, F., 2015. Seismic response of sliding equipment and contents in base-isolated. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Issue 44, pp. 865-887.
- Lee, D., 1980. Base isolation for torsion reduction in asymmetric structures under earthquake loading. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*, Volumen 8, pp. 349-359.
- Lopez, A. A., 2018. *Tesis: Efecto del ángulo de incidencia sísmica en la respuesta no-lineal de edificaciones de concreto armado con sistema dual*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
- MathWorks, 2015. *MatLab*. USA: MathWorks.
- Mendo, A. R., 2015. *Tesis: Bases para la implementación de la norma peruana de análisis y diseño de edificios con aislación sísmica*, Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2006. *Norma Técnica Peruana E.020*. Lima: El Peruano.
- Ministerio de Vivienda Construcción y Saneamiento, 2016. *Norma Técnica Peruana E.030*. Lima: El Peruano.
- Naeim, F. & Kelly, J. M., 1999. *Design of Seismic Isolated Structures from Theory to Practice*. United States of America: John Wiley & Sons.
- Ozdemir, G. & Constantinou, M. C., 2010. Evaluation of equivalent lateral force procedure in estimating seismic isolator displacements. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Issue 30, pp. 1036-1042.
- Pant, D. . R., Constantinou, M. C. & Wijeyewickrema, A. C., 2013. Re-evaluation of equivalent lateral force procedure for prediction of displacement demand in seismically isolated structures. *Engineering Structures*, Issue 52, pp. 455-465.
- Pant, D. . R. & Maharjan, M., 2016. On selection and scaling of ground motions for analysis of seismically isolated structures. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, Diciembre, 15(4), pp. 633-648.
- Pietra, D. y otros, 2015. Design of Base-Isolated Buildings: An Overview of International Codes. *New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 48(2).

- Pokhrel, A. y otros, 2016. Comparative Studies of Base Isolation Systems featured with Lead Rubber Bearings and Friction Pendulum Bearings. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 846, pp. 114-119.
- Ryan, K. L. & Chopra, A. K., 2004. Estimation of seismic demands on isolators in asymmetric buildings using non-linear analysis. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, pp. 395-418.
- Seguin, C. E., Almazán, J. L. & De la Llera, J. C., 2013. Torsional balance of seismically isolated asymmetric structures. *Engineering Structures*, Issue 46, pp. 703-717.
- SeismoSoft, 2016. *SeismoArtif*. USA: SeismoSoft.
- SeismoSoft, 2016. *SeismoMatch*. USA: SeismoSoft.
- Tena Colunga, A., 1997. Evaluación de un método de diseño estático para el aislamiento sísmico de estructuras de la costa Mexicana del Pacífico. *Ingeniería Sísmica*, pp. 1-34.
- Tena Colunga, A., 2003. *Espectros de diseño por desplazamiento para sistemas de aislamiento sísmico para las zonas D-I, C-I y B-I de la República Mexicana*. Guanajuato-León, México, s.n.
- Tena Colunga, A., 2008. *The new guidelines for the seismic design of base isolated structures in Mexico*. Beijing, China, s.n.
- Tena Colunga, A. & Escamilla Cruz, J., 2008. *Dynamic amplifications of torsionally unbalanced base-isolated structures*. Beijing, China, s.n.
- Tena Colunga, A. & Gómez, L. A., 2002. *Respuesta torsional de edificios con base aislada, debido a excentricidades simultáneas en el sistema de aislamiento y en la superestructura*. Puebla, México, Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C..
- Villagómez Molero, D., 2015. *Tesis: Lineamientos para el Análisis y Diseño de edificaciones sísmicamente aisladas en el Perú*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP).
- Warn, G. P. & Ryan, K. L., 2012. A Review of Seismic Isolation for Buildings: Historical Development and Research Needs. *Buildings - Open Access Journal from MDPI*, pp. 300-325.
- Watson-Lamprey, J. & Abrahamson, N., 2006. Selection of ground motion time series and limits on scaling. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Issue 26, pp. 477-482.
- Wolff, E., Ipek, C., Constantinou, M. & Morillas, L., 2014. Torsional response of seismically isolated structures revisited. *Engineering Structures*, pp. 462-468.