

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“EVALUACIÓN SÍSMICA DE ESTRUCTURAS CON MUROS
DE FLUIDO VISCOSO PARA LOGRAR UN DESEMPEÑO
SUPERIOR AL DE SEGURIDAD DE VIDA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

ELABORADO POR
EDY ROMAN ACUÑA MONTEZA
ID: 0009-0004-1321-0178

ASESOR
Dr. ROY ERICKSEN REYNA SALAZAR
ID: 0000-0003-1378-1769

LIMA- PERÚ
2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Acuña Monteza, Edy Roman

edy.acuna.m@uni.pe

969849586

DEDICATORIA

Me gustaría dedicar este trabajo a mis padres, quienes me dieron la vida y me han apoyado incondicionalmente. Agradezco sus sacrificios, sus sabios consejos y el esfuerzo que han dedicado a cada uno de sus hijos para ayudarnos a cumplir nuestras metas y sueños, como este momento tan importante en mi formación profesional.

A mi madre, por ser la mujer más importante en mi vida, por demostrar siempre su cariño y apoyo incondicional, sin importar las circunstancias. A mi padre, por su respaldo, sus consejos y el ejemplo que siempre admiraré y respetaré profundamente.

A mis hermanas, por ser una parte fundamental de mi vida, por su paciencia y por demostrarme su apoyo en cada paso. Y a mi novia, por estar siempre a mi lado, apoyándome en todas mis metas y celebrando mis logros con amor y entusiasmo.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Roy Ericksen Reyna Salazar por su tiempo y apoyo incondicional en el desarrollo de la presente tesis. A la Universidad Nacional de Ingeniería y a la FIC. Al Ing. Edison Moscoso Alcántara por su apoyo al inicio de esta investigación. A CDV Ingeniería Antisísmica por el soporte brindado y por ser parte importante en el desarrollo de mi formación profesional.

ÍNDICE

Resumen	4
Abstract	5
Prólogo	6
Lista de tablas	7
Lista de figuras	10
Lista de símbolos y siglas	14
Capítulo I. Introducción	16
1.1 Antecedentes Referenciales	16
1.2 Planteamiento de la realidad problemática	17
1.3 Objetivos	18
1.3.1 Objetivo general	18
1.3.2 Objetivos específicos	18
1.4 Formulación de la hipótesis	18
Capítulo II. Marco teorico	20
Capítulo III. Sistemas con protección sísmica	24
3.1 Sistemas con aislamiento de base	24
3.1.1 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo	26
3.1.2 Aisladores elastomérico de caucho natural	26
3.1.3 Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento	27
3.1.4 Aisladores friccionales pendulares	28
3.1.5 Deslizadores planos de PTFE.....	28
3.2 Sistemas con disipación de energía	29
3.2.1 Disipadores histeréticos	29
3.2.2 Disipadores viscoelásticos.....	30
3.2.3 Disipadores de fluido viscoso	30
3.2.3.1 Amortiguadores de fluido viscoso	31
3.2.3.2 Muros de fluido viscoso	31
Capítulo IV. Enfoque sismorresistente tradicional	33
4.1 Sistemas de reforzamiento tradicional	34
4.2 Enfoque sismorresistente con sistemas de protección sísmica.....	34
4.3 Principios de disipación de energía.....	35

4.4 Ventajas, desventajas y beneficios de los muros de fluido viscoso.....	36
Capítulo V. Comportamiento estructural de muros de fluido viscoso.....	39
5.1 Ecuación general.....	39
5.2 Respuesta del muro de fluido viscoso	41
5.3 Modelo analítico con muros de fluido viscoso	43
5.4 Comportamiento histerético	46
5.5 Efecto de los muros viscosos sobre el espectro de respuesta.....	49
5.6 Objetivos de desempeño	50
5.6.1 Nivel de desempeño de la estructura.....	51
5.6.2 Nivel de amenaza sísmica.....	53
Capítulo VI. Procedimiento de análisis aplicado a la realidad peruana	57
6.1 Metodología de diseño con muros de fluido viscoso	57
6.1.1 Determinación del sistema estructural.....	57
6.1.2 Determinación del control de la respuesta	58
6.1.3 Determinación de la demanda sísmica	58
6.1.4 Criterios de ubicación de los muros de fluido viscoso	59
6.1.5 Determinación de los parámetros de los muros de fluido viscoso	60
6.1.6 Determinación del nivel de amortiguamiento suplementario	61
6.1.7 Muros de fluido viscoso con comportamiento no lineal	61
6.1.8 Verificación del control de la respuesta.....	63
6.2 Esquema de algoritmo para estructuras con muros viscosos	63
6.3 Desarrollo de un código de programación.....	66
6.4 Factores de modificación de propiedades (λ).....	67
Capítulo VII. Propuesta de diseño de estructuras con muros de fluido viscoso	70
7.1 Descripción general.....	70
7.2 Análisis estructural del sistema sin reforzamiento	72
7.2.1 Análisis estático lineal o fuerzas laterales equivalentes.....	72
7.2.2 Análisis dinámico modal espectral.....	76
7.3 Análisis de la estructura con reforzamiento convencional.....	82
7.3.1 Análisis lineal estático y dinámico con reforzamiento mínimo	83
7.4 Análisis tiempo historia lineal sin muros de fluido viscoso.....	86
7.5 Análisis y diseño con muros de fluido viscoso	98
7.5.1 Cálculo de propiedades	98

7.5.2 Ubicación de los muros de fluido viscoso.....	101
7.5.3 Propiedades de los muros de fluido viscoso	104
7.6 Análisis tiempo historia no lineal con muros de fluido viscoso	104
7.6.1 Respuesta sísmica de la estructura con muros de fluido viscoso	105
7.6.2 Derivas de entrepiso	107
7.6.3 Aceleraciones de entrepiso.....	112
7.6.4 Fuerza y deformación de los muros de fluido viscoso	115
7.6.5 Balance de energía	117
7.6.6 Curvas histeréticas	118
7.6.7 Fuerza cortante en la base.....	119
7.7 Desempeño sismorresistente y curva de capacidad.....	120
7.7.1 Asignación de rótulas en muros, columnas y vigas	120
7.7.2 Curva de capacidad y desempeño sismorresistente del edificio.	123
Capítulo VIII. Análisis y resultados.....	131
8.1 Análisis comparativo convencional y con muros de fluido viscoso.....	131
8.1.1 Periodos y modos de vibración	131
8.1.2 Análisis comparativo de derivas de entrepiso	132
8.1.3 Análisis comparativo de aceleraciones máximas.....	134
8.1.4 Análisis comparativo de energía disipada	136
Conclusiones	138
Recomendaciones.....	139
Referencias bibliográficas.....	140
Anexos	142

RESUMEN

La presente investigación busca evaluar la reducción del daño a los componentes estructurales mediante la implementación de un sistema de amortiguamiento con Muros de Fluido Viscoso, el cual emplea un elemento altamente viscoso que modificará el nivel de amortiguamiento de la estructura sin alterar la rigidez del sistema, disminuyendo las deformaciones en los pórticos y concentrando las deformaciones en estos dispositivos mediante la disipación de energía con la finalidad de mejorar el desempeño de estructuras nuevas o existentes, garantizando la continuidad y el funcionamiento de la estructura luego de ocurrido un evento sísmico. Se estudiará las ventajas, desventajas y beneficios de emplear este sistema relativamente nuevo en el país, con la finalidad de difundir y tener nuevas alternativas de protección sísmica a las ya existentes, de manera que se puedan generar nuevas estructuras con estos sistemas de protección sísmica empleados en países altamente sísmicos como Japón, Chile, Nueva Zelanda y EEUU, dar pie a nuevas investigaciones empleando estos sistemas y contar con normativas propias en el país y posiblemente fabricar prototipos a escala que se puedan emplear diferentes tipos de estructuras.

En esta investigación se presentará un análisis numérico y cómo modelar analíticamente un sistema con muros de fluido viscoso, el análisis se realizará empleando un software de análisis estructural mediante una combinación de 7 pares de registros sísmicos y se estudiará la disminución de los desplazamientos y aceleraciones de la estructura sin emplear los muros de fluido viscoso y con muros de fluido viscoso mediante diferentes tipos de análisis lineales y no lineales, al final del análisis se presentará un comparativo con la respuesta de la estructura (periodo, desplazamientos, aceleración y fuerzas de corte) teniendo cuenta todos los análisis empleados y se mostrará la reducción alcanzada al incorporar al sistema los dispositivos sísmicos.

ABSTRACT

The present investigation seeks to evaluate the reduction of damage to structural components through the implementation of a damping system with Viscous Fluid Walls, which uses a highly viscous element that will modify the damping level of the structure without altering the rigidity of the system. reducing deformations in the frames and concentrating the deformations in these devices through energy dissipation with the purpose of improving the performance of new or existing structures, guaranteeing the continuity and functioning of the structure after a seismic event has occurred. The advantages, disadvantages and benefits of using this relatively new system in the country will be studied, with the purpose of disseminating and having new seismic protection alternatives to the existing ones, so that new structures can be generated with these seismic protection systems used. in highly seismic countries such as Japan, Chile, New Zealand and the USA, give rise to new research using these systems and have their own regulations in the country and possibly manufacture scale prototypes that can use different types of structures.

In this research, a numerical analysis will be presented and how to analytically model a system with walls of viscous fluid, the analysis will be carried out using structural analysis software through a combination of 7 pairs of seismic records and the decrease in displacements and accelerations of the structure without using viscous fluid walls and with viscous fluid walls through different types of linear and non-linear analysis, at the end of the analysis a comparison will be presented with the response of the structure (period, displacements, acceleration and shear forces) taking into account all the analyzes used, and the reduction achieved by incorporating the seismic devices into the system will be shown.

PRÓLOGO

En la actualidad el uso de los sistemas de protección sísmica en el Perú viene aplicándose de forma paulatina y creciente en nuestra realidad, sin embargo, aún existe una falta del conocimiento para el análisis y diseño de estructuras con estos sistemas de protección sísmica. Entre los diversos sistemas de protección sísmica, la presente investigación se enfoca en la evaluación de la reducción del daño mediante la implementación de un sistema de amortiguamiento con Muros de Fluido Viscoso en comparación con una estructura convencional. La tesis de Edy Acuña muestra el beneficio de usar este sistema de protección sísmica, así como también, su investigación servirá de referente para los estudiantes, profesionales y el desarrollo de la ingeniería sísmica en el Perú.

ASESOR

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Desempeño de una estructura	51
Tabla 2: Niveles de Desempeño según el ATC 40.....	52
Tabla 3: Niveles de Desempeño según el comité VISION 2000.....	52
Tabla 4: Probabilidad de excedencia y periodo de retorno.....	54
Tabla 5: Niveles de sismo considerados por el comité VISION 2000.....	55
Tabla 6: Límite de derivas establecidas por el comité VISION 2000	55
Tabla 7: Límite de aceleraciones establecidas por el comité VISION 2000.....	55
Tabla 8: Niveles de sismos para diseño de estructuras según el ATC 40	56
Tabla 9: Valores de λ en función del exponente de velocidad.....	62
Tabla 10: Ejemplo de Factores de modificación de propiedades	68
Tabla 11: Peso sísmico según la norma E.030 2018	72
Tabla 12: Evaluación del sistema estructural en la dirección X.....	73
Tabla 13: Evaluación del sistema estructural en la dirección Y.....	73
Tabla 14: Verificación de Irregularidad en altura.....	74
Tabla 15: Verificación de Irregularidad en planta.....	74
Tabla 16: Irregularidad estructural.....	75
Tabla 17: Parámetros sísmicos según E0.30 en dirección X e Y.....	76
Tabla 18: Periodos y porcentajes de participación modal de la estructura.....	78
Tabla 19: Factores de escala para el sismo dinámico.....	79
Tabla 20: Derivas de entrepiso máximas y permisibles en la dirección X.....	79
Tabla 21: Derivas de entrepiso máximas y permisibles en la dirección Y.....	80
Tabla 22: Aceleraciones de piso en la dirección X.....	81
Tabla 23: Aceleraciones de piso en la dirección Y.....	82
Tabla 24: Nuevos Parámetros sísmicos en la dirección X e Y.....	83
Tabla 25: Cortante estática, dinámica y factores de escala del Sistema reforzado. ..	84
Tabla 26: Verificación de derivas de entrepiso en la dirección X.....	84
Tabla 27: Verificación de derivas de entrepiso en la dirección Y.....	84
Tabla 28: Modos de vibración de la estructura con reforzamiento mínimo.....	86
Tabla 29: Datos de registros sísmicos empleados.....	87
Tabla 30: Derivas en la dirección XX a MCE.....	90
Tabla 31: Derivas en la dirección YY a MCE.....	91
Tabla 32: Derivas en la dirección XX a MCE.....	92
Tabla 33: Derivas en la dirección YY a MCE.....	93

Tabla 34: Aceleraciones de piso a tiempo historia lineal en la dirección XX a MCE..	94
Tabla 35: Aceleraciones de piso a tiempo historia lineal en la dirección YY a MCE..	94
Tabla 36: Aceleraciones de piso en la dirección XX a MCE.....	96
Tabla 37: Aceleraciones de piso en la dirección YY a MCE.....	97
Tabla 38: Cálculo de los factores de modificación de propiedades	104
Tabla 39: Límites de variación de propiedades superior e inferior.	104
Tabla 40: Derivas en la dirección X con muros de fluido viscoso a MCE.	107
Tabla 41: Derivas en la dirección Y con muros de fluido viscoso a sismo máximo..	108
Tabla 42: Derivas en la dirección X con muros de fluido viscoso a sismo de diseño.....	109
Tabla 43: Derivas en la dirección Y con muros de fluido viscoso a sismo de diseño.....	110
Tabla 44: Resumen de Derivas en la dirección X e Y con muros de fluido viscosos.....	111
Tabla 45: Aceleración en la dirección X con muros de fluido viscoso a sismo máximo.....	112
Tabla 46: Aceleración en la dirección Y con muros de fluido viscoso a sismo máximo.....	112
Tabla 47: Aceleración en la dirección X con muros de fluido viscoso a sismo de diseño.....	113
Tabla 48: Aceleración en la dirección Y con muros de fluido viscoso a sismo de diseño.....	114
Tabla 49: Resumen de Aceleraciones en la dirección X e Y muros de fluido viscoso.	115
Tabla 50: Propiedades de los elementos links del análisis con muros de fluido viscoso.	115
Tabla 51: Resumen de las propiedades por tipo de muros viscosos del análisis TH.....	116
Tabla 52: Porcentaje de disipación de energía en la estructura con los muros viscosos.....	117
Tabla 53: Curva bilineal y punto de desempeño sin reforzamiento a MCE según ASCE 41.....	123
Tabla 54: Parámetros del análisis por desempeño para MCE.....	124
Tabla 55: Curva bilineal y punto de desempeño sin reforzamiento a DBE según ASCE 41.....	125

Tabla 56: Parámetros del análisis por desempeño a DBE	125
Tabla 57: Curva bilineal y punto de desempeño con reforzamiento convencional a MCE según ASCE 41.	126
Tabla 58: Parámetros del análisis por desempeño con reforzamiento convencional a MCE.	126
Tabla 59: Curva bilineal y punto de desempeño con reforzamiento convencional a DBE según ASCE 41.	127
Tabla 60: Parámetros del análisis por desempeño con reforzamiento convencional a DBE.	127
Tabla 61: Curva bilineal y punto de desempeño con reforzamiento con MFV a MCE según ASCE 41.	129
Tabla 62: Parámetros del análisis por desempeño con reforzamiento con MFV a MCE.	129
Tabla 63: Curva bilineal y punto de desempeño con reforzamiento con MFV a DBE según ASCE 41.	130
Tabla 64: Parámetros del análisis por desempeño con reforzamiento con MFV a DBE.	130
Tabla 65: Modos de vibración de la estructura sin reforzamiento.	131
Tabla 66: Modos de vibración de la estructura con muros de fluido viscoso.	132
Tabla 67: Reducción de derivas en X a MCE con muros de fluido viscoso.	132
Tabla 68: Reducción de derivas en Y a sismo máximo con muros de fluido viscoso.	133
Tabla 69: Reducción de aceleraciones en X a sismo máximo.	134
Tabla 70: Reducción de aceleraciones en Y a sismo máximo.	135

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1: Componentes de un muro de fluido viscoso	20
Figura N° 2: Curva histerética de un muro de fluido viscoso	22
Figura N° 3: Clasificación de los dispositivos de protección sísmica	23
Figura N° 4: Estructura convencional y Estructura con aisladores de base.....	25
Figura N° 5: Aislador elastomérico con núcleo de plomo	26
Figura N° 6: Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento	27
Figura N° 7: Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento	27
Figura N° 8: Aisladores sísmico de péndulo de fricción	28
Figura N° 9: Deslizadores sísmicos de PTFE	29
Figura N° 10: Disipadores histeréticos tipo TADAS y ADAS	30
Figura N° 11: Deslizadores Visco elásticos.....	30
Figura N° 12: Amortiguadores de fluido viscoso	31
Figura N° 13: Ensayo a escala real de un Muro de fluido viscoso.....	32
Figura N° 14: Partes de un Muros de fluido viscoso.....	32
Figura N° 15: Sectorización para la Curva de capacidad	33
Figura N° 16: Sistemas con protección sísmicas con aislamiento de base y amortiguadores.....	35
Figura N° 17: Coeficiente de amortiguamiento vs velocidad	39
Figura N° 18: Fuerza viscosa en función de la velocidad en un muro viscoso	40
Figura N° 19: Muro de fluido viscoso instalado en una estructura de acero	42
Figura N° 20: Relación Velocidad vs Fuerza del Disipador	43
Figura N° 21: Representación matemática de un muro de fluido viscoso.....	44
Figura N° 22: Esquema de modelado de un muro viscoso para un análisis no lineal.....	44
Figura N° 23: Muro de fluido viscoso instalado en obra	45
Figura N° 24: Curva Histerética de un Amortiguador viscoso.....	46
Figura N° 25: Comportamiento de un amortiguador viscoso lineal, para distintos valores de C	47
Figura N° 26: Comportamiento de un amortiguador viscoso no lineal, para un C constante.....	47
Figura N° 27: Comportamiento de un amortiguador viscoso no lineal, para F constante, pero con valores de α y C variables	48
Figura N° 28: Comportamiento de un amortiguador viscoso lineal, considerando una velocidad límite	48

Figura N° 29: Variación del amortiguamiento con muros de fluido viscoso en el Espectro de Desplazamiento	49
Figura N° 30: Variación del amortiguamiento con muros de fluido viscoso en el Espectro de Aceleración	50
Figura N° 31: Objetivos de desempeño	50
Figura N° 32: Ubicación perimetral de muros viscosos como criterio estructural.	60
Figura N° 33: Parámetros para los muros de fluido viscoso.....	62
Figura N° 34: Parámetros de modelamiento en unidades SI.....	63
Figura N° 35: Algoritmo adaptado de Newmark para el análisis de estructuras equipadas con MFV.....	65
Figura N° 36: Diagrama de flujo, código de programa para muros de fluido viscoso.	66
Figura N° 37: Factor de variación por temperatura en muros viscosos	69
Figura N° 38: Modelo analítico de la estructura.	70
Figura N° 39: Configuración estructural en planta del 1er nivel del edificio.	71
Figura N° 40: Configuración estructural en planta del 2do nivel del edificio.	71
Figura N° 41: Espectro Inelástico de Pseudo-aceleraciones en XX	77
Figura N° 42: Espectro Inelástico de Pseudo-aceleraciones en YY	77
Figura N° 43: Evaluación de derivas en la dirección X.....	80
Figura N° 44: Evaluación de derivas en la dirección Y.....	81
Figura N° 45: Reforzamiento convencional con muros estructurales	82
Figura N° 46: Sistema de muros estructurales como reforzamiento convencional	83
Figura N° 47: Evaluación de derivas en la dirección X.....	85
Figura N° 48: Evaluación de derivas en la dirección Y	85
Figura N° 49: Espectro Elástico de Pseudo-aceleraciones a DBE.	88
Figura N° 50: Espectro Elástico de Pseudo-aceleraciones a MCE.....	89
Figura N° 51: Derivas en X mediante un Análisis TH Lineal a MCE	90
Figura N° 52: Derivas en Y mediante un Análisis TH Lineal a MCE.....	91
Figura N° 53: Derivas en X mediante un análisis TH Lineal a MCE	92
Figura N° 54: Derivas en Y mediante un análisis TH Lineal a MCE.	93
Figura N° 55: Aceleraciones en X, Análisis TH Lineal a MCE sin reforzamiento	95
Figura N° 56: Aceleraciones en Y, Análisis TH Lineal a MCE sin reforzamiento	95
Figura N° 57: Aceleraciones en X, Análisis TH Lineal a MCE con reforzamiento	96
Figura N° 58: Aceleraciones en Y, Análisis TH Lineal a MCE con reforzamiento	97
Figura N° 59: Función Pulso para ambas direcciones.....	99

Figura N° 60: Δ vs t para los casos de pulso en cada dirección.	99
Figura N° 61: Disposición de muros viscosos en la dirección X, pórtico 2.	101
Figura N° 62: Disposición de muros viscosos en la dirección X, pórtico 6.	102
Figura N° 63: Disposición de muros viscosos en la dirección Y, pórtico E.	102
Figura N° 64: Disposición de muros viscosos en la dirección Y, pórtico F.	103
Figura N° 65: Modelo matemático con el sistema de muros de fluido viscoso.	103
Figura N° 66: Caso de carga para el análisis modal no lineal FNA.	105
Figura N° 67: Pares de registros sísmicos para el análisis tiempo historia.	106
Figura N° 68: Registros sísmicos escalados a sismo máximo (MCE).	106
Figura N° 69: Registros sísmicos escalados a sismo de diseño (DBE).	107
Figura N° 70: Derivas a MCE a TH con muros de fluido viscoso.	108
Figura N° 71: Derivas XX a MCE a TH con muros de fluido viscoso.	109
Figura N° 72: Derivas en XX a DBE a TH con Muros de fluido viscoso.	110
Figura N° 73: Derivas en YY a DBE a TH con Muros de fluido viscoso.	111
Figura N° 74: Aceleraciones en X e Y a sismo máximo a TH con muros de fluido viscoso.	113
Figura N° 75: Aceleraciones en X e Y a sismo de diseño a TH con muros de fluido viscoso.	114
Figura N° 76: Balance de energía disipada por los muros de fluido viscoso.	117
Figura N° 77: Curva histerética del disipador K5 a sismo máximo.	118
Figura N° 78: Curva histerética del disipador K19 a sismo máximo.	118
Figura N° 79: Asignación de rótulas en los elementos estructurales sin reforzamiento.	120
Figura N° 80: Asignación de rótulas en los elementos estructurales con reforzamiento convencional.	121
Figura N° 81: Asignación de rótulas en los elementos estructurales con reforzamiento con MFV	121
Figura N° 82: Formación de rótulas plásticas en la estructura sin reforzamiento	121
Figura N° 83: Formación de rótulas plásticas en la estructura con reforzamiento convencional	122
Figura N° 84: Formación de rótulas plásticas en la estructura con reforzamiento con MFV	122
Figura N° 85: Curva de capacidad sin reforzamiento	123
Figura N° 86: Nivel de desempeño sin reforzamiento a MCE (Tr 2475 años según ASCE 41 -13.	124

Figura N° 87: Nivel de desempeño sin reforzamiento a DBE (Tr 475 años) según ASCE 41-13.....	125
Figura N° 88: Curva de capacidad con reforzamiento convencional.	126
Figura N° 89: Nivel de desempeño con reforzamiento convencional a MCE (Tr 2475 años) según ASCE 41.....	127
Figura N° 90: Curva de capacidad con reforzamiento convencional a DBE (Tr 475 años) según ASCE 41.....	128
Figura N° 91: Curva de capacidad con reforzamiento con MFV.....	128
Figura N° 92: Curva de capacidad con reforzamiento con MFV a MCE (Tr 2475 años) según ASCE 41.....	129
Figura N° 93: Curva de capacidad con reforzamiento con MFV a DBE (Tr 475 años) según ASCE 41.....	130
Figura N° 94: Reducción de derivas en X a sismo máximo.....	133
Figura N° 95: Reducción de derivas en Y a sismo máximo.....	134
Figura N° 96: Reducción de aceleraciones en X a sismo máximo.	135
Figura N° 97: Reducción de aceleraciones en Y con muros de fluido viscoso a sismo máximo.....	136
Figura N° 98: Disipación de energía a sismo máximo con muros de fluido viscoso.	137
Figura N° 99: Disipación de energía a sismo de diseño con muros de fluido viscoso.	137

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

A	Amplitud, área de la sección transversal
α	Coefficiente para muros de fluido viscoso
B	Factor de reducción de amortiguamiento
β	Amortiguamiento
β_{ef}	Amortiguamiento efectivo
β_i	Amortiguamiento inherente
β_v	Amortiguamiento viscoso
ξ_i	Amortiguamiento crítico modal
C	Constante de amortiguamiento
C	Factor de amplificación sísmica
DBE	Sismo de Diseño
\hat{D}_i	Deriva máxima modal de entrepiso
E_c	Módulo de Elasticidad del concreto
E_d	Vector de influencias conteniendo de los desplazamientos
ED	La energía mecánica disipada los muros de fluido viscoso
E_ξ	Energía de amortiguamiento
E_h	Energía histerética
E_l	Energía inelástica
E_k	Energía cinética
E_s	Energía elástica de deformación
ET	Energía total
FAD	Factor de amplificación dinámica
F_e	Vector de la carga sísmica aplicada
$F_{e_{t+\Delta t}}$	Vector de carga sísmica aplicada
F_i	Fuerzas laterales de diseño
F_{MFV}	Fuerza en el muro de fluido viscoso
$F_{VWD_{t+\Delta t}}$	Fuerza viscosa del amortiguador
f'_c	Resistencia máxima del concreto
G_c	Módulo de corte
g	Aceleración de la gravedad
GDL	Grado de libertad
I_a	Irregularidad estructural en altura

I_p	Irregularidad estructural en planta
K	Rigidez del amortiguador
m	Masa
M	Matriz de masa
MCE	Sismo máximo considerado
ϕ_i^t	Modo i transpuesto
$q_i(t)$	Coordenada modal
R	Coeficiente de reducción de solicitaciones sísmicas
R_o	Coeficiente básico de reducción
S	Factor de suelo
Sa	Espectro de pseudo-aceleración
S_{Di}^d	Espectro de desplazamientos relativos del modo i
t	Tiempo
T	Periodo de la estructura
T_R	Periodo de retorno
T°	Temperatura
Γ_i^d	Factor de participación modal
\hat{u}_i	Desplazamientos modales máximos
\ddot{u}	Vector de aceleración.
$\ddot{u}_g^d(t)$	Aceleración de base media
$u_{t+\Delta t}$	Desplazamiento del sistema
$\dot{u}_{t+\Delta t}$	Velocidad del sistema
U	Categoría de la edificación
V_{mfv}	Velocidad relativa en el amortiguador
V	Fuerza de corte en la base
V_{min}	Fuerza de corte mínima en la base
ω	Frecuencia angular de vibración
λ_i	Vector del problema de valores propios
λ	Factores de modificación de propiedades
Z	Factor de zona sísmica

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES REFERENCIALES

La filosofía de diseño de la mayoría de las normas sísmicas en el mundo se basa en no aceptar daños ante sismos frecuentes, aceptar daños moderados ante sismos más severos y evitar el colapso de las estructuras ante los grandes terremotos. Sin embargo, las pérdidas económicas que han ocurrido producto de terremotos que han afectado zonas muy pobladas y económicamente muy activas han llevado a desarrollar nuevas tecnologías y revisar dicha filosofía de diseño. Es en este contexto, el uso de sistemas de protección sísmica con el objetivo de no sólo evitar el colapso, sino que, para mejorar el desempeño y el confort de los usuarios, ha tenido un gran impacto, con el desarrollo de diversos sistemas de protección sísmica.

Desde que se comenzó a difundir e implementar el uso de disipadores como alternativa de protección sísmica en edificaciones, en distintas partes del mundo como Japón, EE. UU., Nueva Zelanda, Chile, México y Perú, se han realizado distintos estudios y análisis sobre el comportamiento sísmico con estas nuevas alternativas de protección sísmica en diferentes estructuras con la finalidad de mejorar el desempeño de las estructuras ante sismos futuros y plantear nuevas metodologías de diseño.

Las estructuras ubicadas en zonas con un alto riesgo sísmico como es el caso de Perú y con un cierto nivel de importancia como los centros hospitalarios, clínicas, institutos, centros de educación, laboratorios, etc., deben ser diseñadas con un adecuado nivel de desempeño mayor al de seguridad de vida para garantizar el funcionamiento de la estructura luego de la ocurrencia de un evento sísmico, por lo cual es importante tener un control estructural muy riguroso para garantizar la capacidad y desempeño de la estructura durante y después de un evento sísmico, la incorporación de dispositivos de protección sísmica, no sólo desde su concepción en el diseño sino como una alternativa de reforzamiento posterior a su construcción para lograr un mejoramiento en el comportamiento estructural y además incrementar la capacidad de disipación de energía de la estructura. Otro factor importante a considerar en las estructuras de mayor importancia es que contienen equipos u objetos que son sensibles ante las vibraciones y poseen un

gran valor económico, si no se tiene en cuenta las aceleraciones de piso de una estructura convencional, puede ocasionar un deterioro e inoperatividad de dichos equipamientos; frente a este escenario se propone como alternativa el uso de muros de fluido viscoso para verificar el comportamiento estructural teniendo en cuenta estos criterios ya mencionados.

Los muros de fluido viscoso son una alternativa de protección sísmica no difundida en el Perú y que mediante la presente investigación se busca dar a conocer esta tecnología, sus ventajas y desventajas, así como sus beneficios y presentarla como una alternativa adicional a las tecnologías ya existentes en el Perú, para mejorar el comportamiento sísmico de estructuras nuevas y existentes y lograr un mejor desempeño estructural. Adicional a ello hacer hincapié en la necesidad de contar con una norma propia enfocada en el diseño con disipadores sísmicos teniendo en cuenta la realidad sísmica del Perú.

1.2 PLANTEAMIENTO DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

Los sistemas de protección sísmica aplicados en otros países han proporcionado sistemas confiables y económicos con un rendimiento estructural y no estructural mejorado. Los muros de fluido viscoso, desarrollados originalmente en Japón, se utilizaron por primera vez en un proyecto en EE. UU, para proporcionar amortiguamiento adicional y permitir que un nuevo hospital de 15 pisos en San Francisco, California, logre objetivos de rendimiento estrictos.

Las experiencias recientes de sismos de gran intensidad evidencian el alto grado de vulnerabilidad de las estructuras importantes como Hospitales, Colegios, Laboratorios, etc. Frente a este escenario y sobre todo a la consideración de acciones provenientes de desastres naturales como los sismos, para mejorar la respuesta sísmica y la capacidad de las estructuras de disipar la energía proveniente del sismo, las estructuras deben contar con un adecuado sistema de protección sismorresistente que no sólo considere la seguridad de sus ocupantes sino que garantice la funcionalidad de la estructura después de un evento sísmico de acuerdo a las condiciones planteadas desde su concepción como diseño o de adecuado reforzamiento planteado para que cumpla con las exigencias deseadas.

Este documento busca investigar la efectividad de los dispositivos de los Muros de fluido viscoso como un sistema de protección sísmica y el nivel de desempeño que se logra con estos dispositivos, además se busca implementar una metodología de diseño mediante el uso de los muros de fluido viscoso en el reforzamiento de una estructura esencial, se busca investigar la reducción de las aceleraciones de piso, comprobar la efectividad y los niveles de desempeño que se puede alcanzar con estos dispositivos de acuerdo a la realidad peruana y la sismicidad del país.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

Objetivo Principal: Analizar y verificar el comportamiento y respuesta sísmica mediante el análisis con muros de fluido viscoso de una estructura y establecer una metodología de diseño.

1.3.2 Objetivos específicos

Además, se presenta lo siguientes objetivos específicos:

- a) Estudiar los efectos de los sistemas con muros de fluido viscoso sobre la respuesta sísmica de las estructuras de baja y mediana altura.
- b) Evaluar el uso de muros de fluido viscoso como alternativa de protección sísmica en estructuras esenciales.
- c) Analizar la respuesta sísmica de la estructura mediante la reducción de la aceleración y derivas para minimizar el daño relacionado a los elementos estructurales y no estructurales.

1.4 FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

El enfoque convencional nos da los requerimientos mínimos para el diseño de estructuras con la capacidad necesaria de resistir cargas y una limitada capacidad de disipación de energía mediante la ductilidad de sus elementos, las estructuras confían en su propia rigidez para resistir la fuerza que generan los eventos sísmicos y el poco amortiguamiento de sus materiales para disipar la energía sísmica. Existen muchas estructuras diseñadas con poca capacidad de disipar

energía y deben asegurar un comportamiento adecuado de sus elementos estructurales durante un evento sísmico, entre ellas son las estructuras con un nivel de importancia alto, las cuales deben lograr un nivel de desempeño superior al enfoque convencional.

Este estudio está enfocado en evaluar la hipótesis de que una estructura diseñada o reforzada con muros de fluido viscoso tendrá una mayor probabilidad de desarrollar un mejor comportamiento sísmico y una mejor capacidad de disipación de energía a través de estos dispositivos, al incrementar el amortiguamiento de la estructura para lograr reducir los desplazamientos laterales causados por eventos sísmicos y efectos del viento, para así lograr mejorar el desempeño de la estructura y asegurar que otros elementos de la estructura no sean sobre esforzados, evitando daños a la estructura.

CAPÍTULO II. MARCO TEORICO

Los muros de fluido viscoso es un sistema de amortiguamiento, que utiliza un líquido de alta viscosidad como amortiguador. Este sistema consta de un tanque de acero rígido lleno de un fluido viscoso y una o más paletas de acero que se extienden dentro del tanque con el fluido, este fluido viscoso no es tóxico, es inodoro y transparente con una viscosidad de 90,000 poises como se observa en la Figura N° 1. Los desplazamientos relativos y la velocidad dan como resultado el movimiento en el plano de la paleta de acero dentro del tanque. El esfuerzo a corte del fluido en relación con la pared del tanque y la paleta proporcionan amortiguamiento y disipación de energía. Los muros de fluido viscoso también se pueden construir con 2 álabes (paletas). En el caso de la compuerta de doble paleta hay 3 placas que forman el tanque. Un muro viscoso de doble paleta proporciona el doble de fuerza de amortiguamiento con solo un pequeño aumento en el tamaño del plano. Los sistemas con muros de fluido viscoso disiparán la mayor parte de la energía del sismo o efectos de viento y una menor parte se transferirá a los otros componentes estructurales.

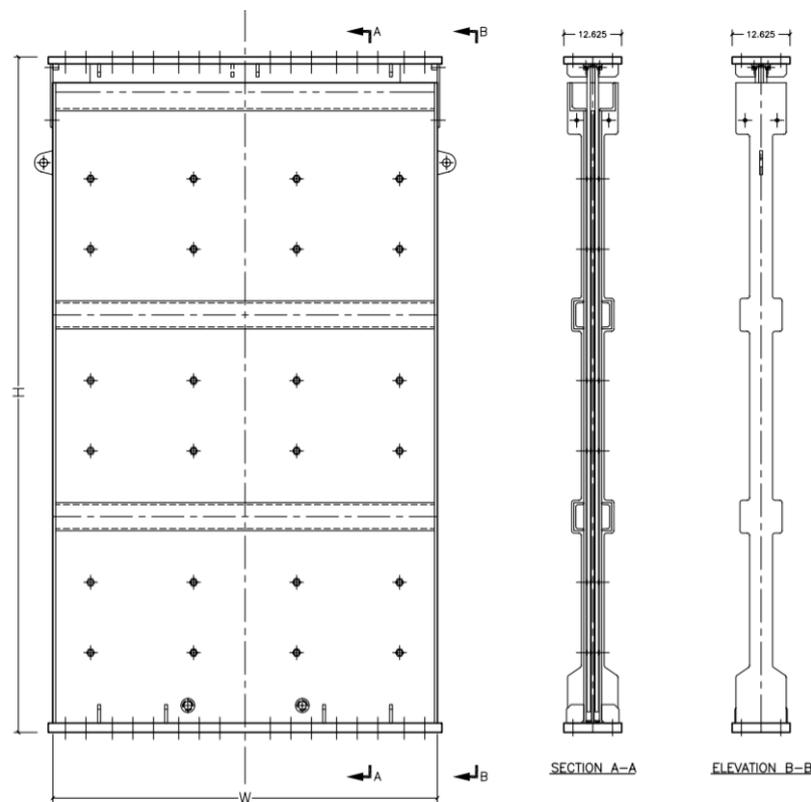


Figura N° 1 Componentes de un muro de fluido viscoso (Fuente: DIS)

En contraste con un amortiguador de fluido viscoso tipo pistón, un muro de fluido viscoso tiene solo unas pocas partes: un tanque de acero rectangular, que se fija a una viga del piso, y una o dos placas de acero o paletas, que se extienden hacia abajo. El tanque está lleno de un fluido viscoso llamado poliisobutileno, que tiene la consistencia de un chicle. A medida que el haz superior se mueve en relación con el haz inferior, el fluido dentro del tanque amortigua el movimiento inducido por el terremoto o por efectos de viento y disipa la energía. Los muros de fluido viscoso funcionan proporcionando una fuerza de resistencia sólo cuando se encuentran en movimiento. No aportan rigidez a la estructura y no soportan ninguna carga estática. Cuanto mayor es la velocidad, mayor es la fuerza de resistencia que se produce.

La respuesta sísmica de los muros de fluido viscoso se puede obtener mediante un análisis tiempo historia de respuesta no lineal y se puede modelar fácilmente utilizando elementos no lineales existentes en software de análisis estructural. El modelo consta de un resorte lineal, K , en serie con un amortiguador exponencial caracterizado por C (coeficiente de amortiguamiento) y α (coeficiente exponencial para muros de fluido viscoso), de modo que la fuerza en el amortiguador está relacionada con la velocidad (V) a través de la relación: $F = C V^\alpha$.

Los dispositivos de fluido viscoso poseen la capacidad de reducir los desplazamientos sin rigidizar la estructura debido a que la fuerza del dispositivo sólo varía con la velocidad y adicionan amortiguamiento a la estructura lo que conlleva a disminuir los desplazamientos y esfuerzos en los elementos estructurales, en el caso de los disipadores de plastificación, fricción y visco-elásticos, algunos adicionan amortiguamiento a la estructura, pero a cambio también rigidizan la estructura aumentando los esfuerzos en el sistema estructural al disminuir el periodo de la estructura. Esto se debe a que el comportamiento histérico de estos dispositivos no sólo depende de la velocidad sino de otros parámetros.

La curva que describe el comportamiento histérico de un muro de fluido viscoso es generalmente de geometría elíptica, alcanzando los valores máximos de fuerza para desplazamientos nulos. La Figura N° 2 muestra la relación entre la fuerza y el desplazamiento cuando el muro de fluido viscoso se somete a un movimiento esperado durante un movimiento sísmico. Los valores de diseño obtenidos de un modelo matemático se correlacionan bien con las mediciones obtenidas de los

ensayos que indican un rendimiento estable. El bucle de histéresis de los muros de fluido viscoso produce una curva suave, los resultados de los ensayos muestran que se logra una amortiguación estable durante el movimiento.

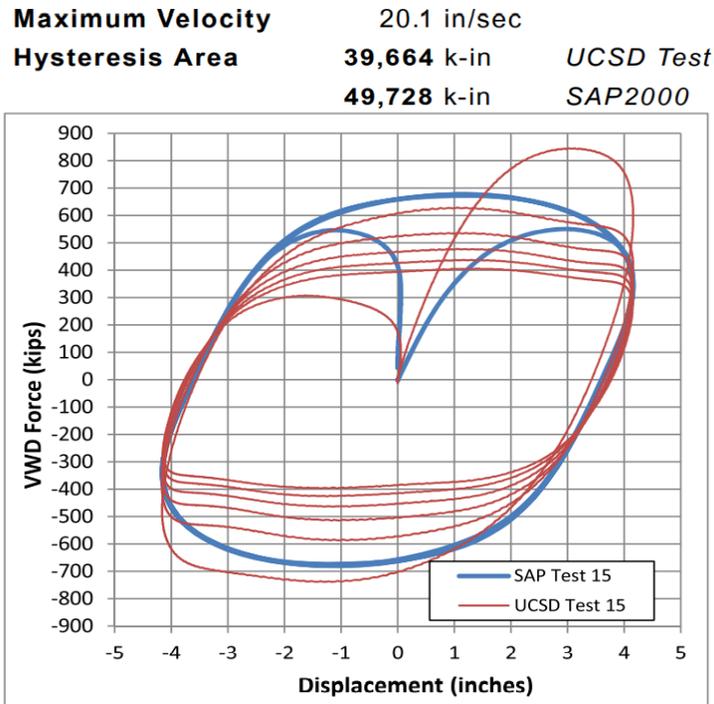


Figura N° 2 Curva histerética de un muro de fluido viscoso (Fuente: DIS)

Los alcances de esta investigación están enfocados principalmente en sistemas con protección sísmica empleando Muros de Fluido Viscoso. Sin embargo, los dispositivos de protección sísmica se clasifican por lo general por la forma como funcionan para controlar cualquier acción estructural, como se muestra en la Figura N° 3.

CONTROL PASIVO ^(a)	Aislamiento sísmico	Mecanismos deslizantes o de rodillos	Placas deslizantes, basculantes Capas de desplazamiento (del suelo) Soportes de rodamientos Otros
		Elemento flexible	Elastómero de multi-capas Soportes flexibles Otros
	Disipación de energía	Tipo histerético	Acero Plomo Otros
		Tipo friccionante	
		Tipo fluido	Hidráulico Viscoso Otros
		Tipo visco elástico	
	Efecto de masa adicional	Tipo masa y rigidez	
Tipo péndulo Vibración de líquido Otros			
Otros			
CONTROL SEMIACTIVO ^(b)	Control de amortiguamiento	Variación de amortiguamiento	Tipo hidráulico Otros
	Control de rigidez	Variación de rigideces	Tipo Arriostres Otros
	Otros		
CONTROL ACTIVO E HIBRIDO ^(c)	Efectos adicionales de masa	Amortiguamiento activo de masa	
		Amortiguamiento híbrido de masa Otros	
	Control de fuerza	Tendón activo Otros	
Otros			

Figura N° 3 Clasificación de los dispositivos de protección sísmica. (Fuente: Higashino, 2006)

Los sistemas de control estructural se clasifican en:

- a) **Sistemas de control pasivo**, estos sistemas reducen la respuesta estructural empleando dispositivos que no requieren consumir energía para mejorar el desempeño estructural, además estos dispositivos se adaptan al comportamiento de la estructura.
- b) **Sistemas de control semiactivo**, estos sistemas reducen la respuesta estructural empleando dispositivos que modifican las propiedades de la estructura como la rigidez y el amortiguamiento, además requieren consumir energía relativamente pequeña para mejorar el desempeño estructural.
- c) **Sistemas de control activo**, estos sistemas reducen la respuesta estructural empleando dispositivos y sensores de monitoreo en tiempo real que detectan movimientos y los contrarrestan aplicando fuerzas o reduciendo las inercias de los elementos estructurales mediante algoritmos de control, estos sistemas son complejos y necesitan consumir energía considerable para mejorar el desempeño estructural.

CAPÍTULO III. SISTEMAS CON PROTECCIÓN SÍSMICA

3.1 SISTEMAS CON AISLAMIENTO DE BASE

El aislamiento sísmico es un sistema de control pasivo o combinada con sistemas de amortiguamiento u otras técnicas de control, conocida como aislamiento inteligente. En la actualidad el aislamiento sísmico, es muy aplicada en diferentes estructuras con resultados muy favorables en países con alta sismicidad, además se ha comprobado su desempeño en eventos reales como experimentales.

El aislamiento sísmico crea una interfaz entre el suelo y la estructura, colocando un mecanismo flexible entre la cimentación y la superestructura. Este sistema tiene una configuración muy flexible en la dirección horizontal; pero, con una rigidez muy elevada en la dirección vertical, debido a esto los edificios de pequeña a mediana altura experimentan grandes desplazamientos en su base; sin embargo, los desplazamientos en la superestructura se mantienen en el rango elástico con deformaciones mínimas. De esta manera, los edificios con aislamiento sísmico logran tener un comportamiento estructural superior al de los edificios convencionales, es decir, luego de un evento sísmico los edificios pueden ser habilitados inmediatamente, ya que la estructura no sufrirá mayores daños. Esto es muy importante si se aplica en el caso de hospitales, centros de comunicación, instituciones educativas, museos o industrias donde a veces el contenido al interior supera el precio de la estructura.

En la Figura N° 4 en el lado izquierdo se puede apreciar como en una estructura convencional las deformaciones se dan mayormente en la estructura. En cambio, en la figura de la derecha, las deformaciones se dan casi en su totalidad en la base de la estructura, con mínimas deformaciones en la superestructura.

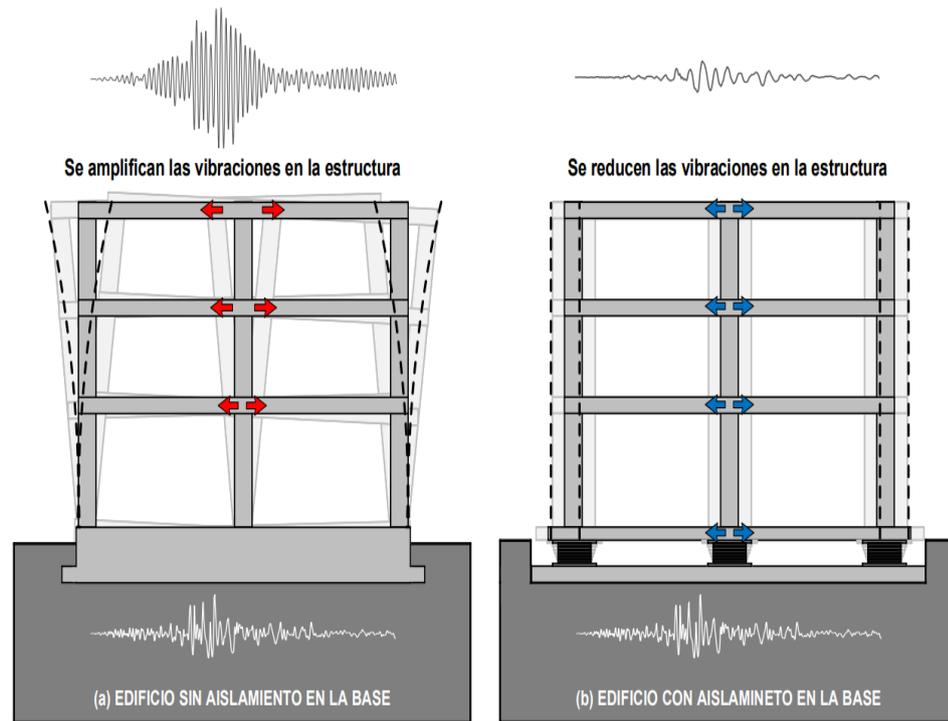


Figura N° 4 Estructura convencional y Estructura con aisladores de base (Fuente: Beer, 2015)

Actualmente existen una gran variedad de aisladores, inclusive en Latinoamérica ya se cuenta con empresas dedicadas al diseño, fabricación e importación de estos dispositivos de acuerdo con las características dinámicas de la estructura.

Dentro de la variedad de aisladores principalmente están los aisladores elastoméricos de caucho el cual presenta 3 variantes:

- LRB (Lead Rubber Bearing) aisladores elastoméricos de caucho natural con núcleo de plomo.
- LDRB (Low Damping Rubber Bearing) aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento.
- HDRB (High Damping Rubber Bearing) aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento.

Los sistemas de péndulo de fricción invertido y los aisladores friccionales deslizantes son ampliamente usados y aceptados en el diseño sismo-resistente alrededor del mundo.

3.1.1 Aisladores elastoméricos con núcleo de plomo

Los aisladores con núcleo de plomo (LRB) son aisladores elastoméricos con planchas de goma y acero intercalados con un núcleo de plomo como se muestra en la Figura N° 5, ubicado en el centro del aislador, manteniendo una rigidez inicial que permite aumentar el nivel de amortiguamiento del sistema hasta niveles cercanos al 25 - 30%. Al deformarse lateralmente el aislador durante la acción de un sismo, el núcleo de plomo fluye, incurriendo en deformaciones plásticas y disipando energía en forma de calor. Al término de la acción sísmica, la goma del aislador retorna la estructura a su posición original, mientras el núcleo de plomo recristaliza.

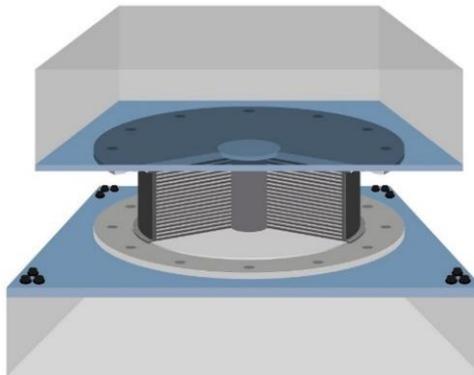


Figura N° 5 Aislador elastomérico con núcleo de plomo (Fuente: CDV Ingeniería antisísmica)

3.1.2 Aisladores elastomérico de caucho natural

Son los dispositivos más simples dentro del grupo de los aisladores elastoméricos, se empezaron a usar en Japón en la década de los 70's, en un inicio eran elaborados sólo a base de neopreno, pero posteriormente se mejoró su rigidez vertical adicionando planchas de acero que además de aportar estabilidad ante cargas laterales no afectaban su rigidez horizontal, ver Figura N°6. Su ventaja radica en su facilidad de manufactura, fabricación y su óptimo desempeño se da al utilizarse en conjunto con aisladores con núcleo de plomo y dispositivos friccionales.

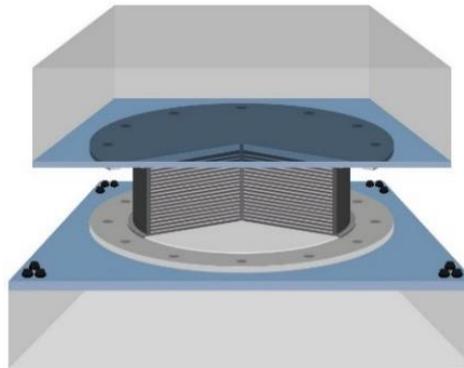


Figura N°6 Aisladores elastoméricos de bajo amortiguamiento (Fuente: CDV Ingeniería antisísmica)

3.1.3 Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento

Estos aisladores están formados por láminas delgadas de acero interna vulcanizadas con caucho y unidos a través de una operación simple bajo presión y temperatura en un molde como se observa en la Figura N°7. Las láminas de acero previenen el abultamiento lateral del caucho y provee de una alta rigidez vertical al aislador. La rigidez horizontal del aislador es controlada por el bajo módulo de corte del caucho. El amortiguamiento es incrementado por la adición de carbón extrafino, aceites, resinas y otros. El amortiguamiento se logra incrementar a niveles del 10% al 20%. Para grandes deformaciones el módulo de corte se incrementa debido al proceso de cristalización por deformación del caucho lo cual va acompañado con un incremento en la energía disipada. Este incremento en rigidez y amortiguamiento ha sido dirigido para producir un sistema que será rígido para pequeñas sollicitaciones, casi lineal y flexible y que puede limitar los desplazamientos para niveles de sollicitación mayor.

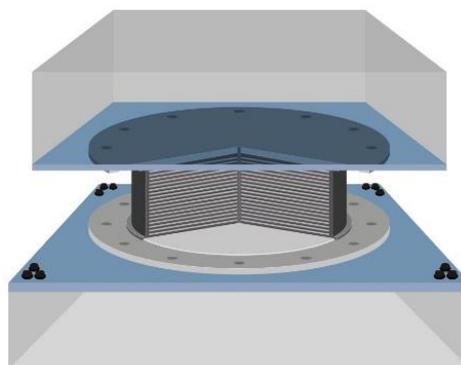


Figura N°7 Aisladores elastoméricos de alto amortiguamiento (Fuente: CDV Ingeniería antisísmica)

3.1.4 Aisladores friccionales pendulares

Los aisladores metálicos de péndulo de fricción son dispositivos cuya disipación de energía se basa en la fricción entre superficies. Estos dispositivos permiten un amortiguamiento alrededor del 30%. El sistema de péndulo de fricción originado en los apoyos de tipo deslizante se desarrolló introduciendo una interfaz friccionante esférica que suministra la rigidez que restaura el sistema en su posición original, mientras que la fricción entre las superficies deslizantes contribuye con la disipación de energía. Como resultado, el FPS es funcionalmente equivalente a los LRB y HDRB ya que aumenta el periodo fundamental de la estructura. Dentro de estos tipos de aisladores metálicos existen de péndulo simple, doble o triple; todos basados en metal con diferentes formas o mecanismos de funcionamiento, ver Figura N°8.



Figura N°8 Aisladores sísmico de péndulo de fricción (Fuente: FPS)

3.1.5 Deslizadores planos de PTFE

También conocidos como deslizadores o Sliders. Se emplean como elementos complementarios al sistema de aislamiento conformado por aisladores elastoméricos, que pueden ser LRB o HDR, ver Figura N° 9; generalmente ubicados en las zonas de menor carga de la estructura. Por sí mismos no pueden conformar un sistema de aislamiento puesto que no tienen capacidad de retorno.

Están conformados básicamente por dos superficies que se apoyan entre sí, una superficie deslizante y una superficie de deslizamiento.

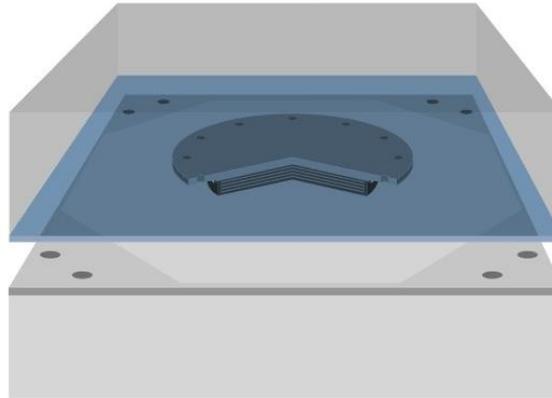


Figura N° 9 Deslizadores sísmicos de PTFE (Fuente: CDV Ingeniería Antisísmica)

3.2 SISTEMAS CON DISIPACIÓN DE ENERGÍA

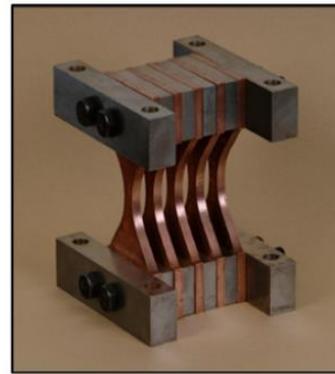
Los disipadores de energía son dispositivos de control pasivo, es decir, no alteran la energía de entrada a la estructura, su eficiencia se manifiesta absorbiendo gran parte de la energía sísmica, es decir, disipan la energía convirtiéndola en calor o por la transferencia de energía entre modos de vibración, se clasifican en tres categorías:

3.2.1 Disipadores histeréticos

Uno de los sistemas efectivos para la disipación de energía inducida en una estructura por un evento sísmico es mediante la deformación inelástica de metales. Estos disipadores dependen de los desplazamientos de la estructura, es decir, se basan en la plasticidad del acero a partir de los esfuerzos de corte, flexión, torsión o extrusión, obteniendo una gran capacidad de amortiguamiento. Algunos de los disipadores más empleados son las placas a flexión, los amortiguadores torsionales de barras, los anillos amortiguadores de fluencia y las riostras metálicas. En la Figura N° 10, muestra un disipador de placas a flexión tipo ADAS, formado por un conjunto de placas en forma de I dispuestas a flexión fuera de su plano donde concentran la energía por deformación plástica en la zona delgada.



Disipador tipo TADAS



Disipador tipo ADAS

Figura N° 10 *Disipadores histeréticos tipo TADAS y ADAS (Fuente: Disipa Ingenieros)*

3.2.2 Disipadores viscoelásticos

Este tipo de disipadores están formados por planchas metálicas unidas por un material visco elástico como se muestra en la Figura N° 11, el material viscoso genera fuerzas opuestas al movimiento del sistema generando unas curvas histeréticas de forma elíptica, estos dispositivos se emplearon en edificios para el control de vibraciones frente a la acción del viento. Son materiales industriales modernos, muy estables ante ciclos repetidos de carga y descarga, pero cuyas propiedades sufren variaciones con la temperatura.

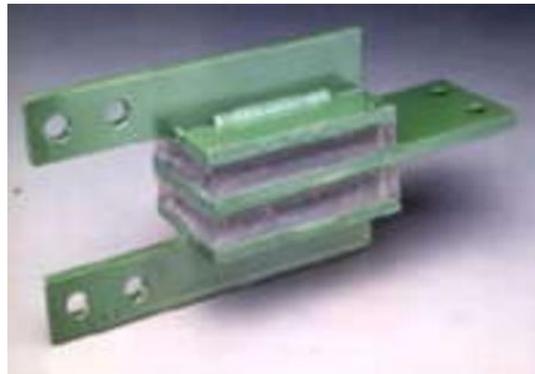


Figura N° 11 *Deslizadores Visco elásticos (Fuente: CDV Ingeniería Antisísmica)*

3.2.3 Disipadores de fluido viscoso

Este tipo de disipadores funcionan empleando un elemento de fluido viscoso, el cual está inmerso en un sistema que genera fuerzas opuestas al movimiento del elemento, la fuerza generada en el dispositivo es proporcional a la velocidad. Estos dispositivos se pueden definir dos tipos:

3.2.3.1 Amortiguadores de fluido viscoso

Esta tecnología fue desarrollada principalmente para la industria militar y para la industria pesada. Un amortiguador de fluido viscoso disipa la energía a través del cambio del fluido viscoso mediante un sistema de cámaras interconectadas mediante orificios, generando una presión interna que crea una fuerza proporcional a la velocidad, incrementando el nivel de amortiguamiento de la estructura sin incrementar la rigidez del sistema, pero que se debe tener un detallado revisión rigurosa de las conexiones, ya que las fuerzas de diseño generalmente conlleva a tener unas conexiones entre unión viga-columna considerables. Estos dispositivos son fabricados de acero inoxidable y el líquido de amortiguamiento es aceite de silicona. La acción de amortiguamiento es proporcionada por el flujo del fluido o a través de la cabeza del pistón. La cabeza del pistón es introducida con una holgura entre el interior del cilindro y el exterior de la cabeza del pistón, el cual forma un orificio anular, tal como se observa en la Figura N° 12.



Figura N° 12 Amortiguadores de fluido viscoso (Fuente: Taylor Devices)

3.2.3.2 Muros de fluido viscoso

Los Muros de Fluido Viscoso proporcionan amortiguamiento a una estructura disminuyendo los desplazamientos laterales a causa de los movimientos o efectos de viento al absorber parte de la energía transmitida a la estructura. Cuando se reducen los desplazamientos laterales, las tensiones en la superestructura se reducen en más del 50%. Cada muro viscoso consta de un tanque de acero estrecho conectado al piso inferior, una placa de acero interna (paleta) conectada

al piso superior y un fluido viscoso en el pequeño espacio entre ellos (ver Figura N° 13 y Figura N° 14).

Durante la excitación sísmica, el movimiento relativo del suelo hace que la paleta se mueva a través del fluido viscoso. La fuerza de amortiguación generada debido a la acción de cizallamiento del fluido depende de la velocidad y del desplazamiento relativo. Los muros de fluido viscoso se utilizan para reducir las aceleraciones sísmicas y las derivas de entre piso en más del 30%, así como para reducir la vibración inducida por el viento.



Figura N° 13 Ensayo a escala real de un Muro de fluido viscoso (Fuente: DIS)

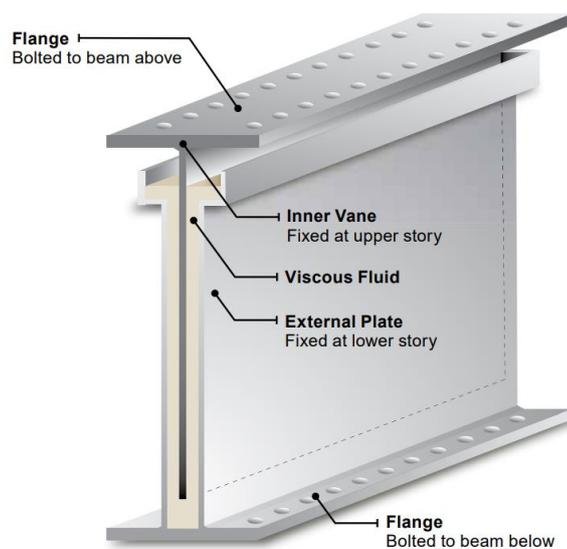


Figura N° 14 Partes de un Muros de fluido viscoso (Fuente: DIS)

CAPÍTULO IV. ENFOQUE SISMORRESISTENTE TRADICIONAL

El enfoque tradicional del diseño Sismorresistente está basado en la capacidad que tiene la estructura de disipar la energía inducida por el sismo a través de una combinación de propiedades conocidas como ductilidad, resistencia y rigidez.

Es de esperar que la estructura tenga un comportamiento elástico ante sismos leves y un comportamiento inelástico cuando esté sujeto a sismos moderados o raros. Este comportamiento inelástico se caracteriza por la disipación de energía a través de deformaciones no recuperables que se agravan conforme la deriva de entrepiso se incrementa; teniendo como consecuencia daño estructural y no estructural cuantioso.

Este enfoque convencional del diseño sismorresistente ha llevado a los ingenieros a desarrollar las estructuras con mecanismos que alerten la posible falla en la estructura antes del colapso, para ello se detalla las estructuras con suficiente ductilidad para prevenir fallas repentinas y catastróficas conforme la estructura va entrando en el rango inelástico. La Figura N° 15 muestra la curva capacidad de una estructura y sus correspondientes niveles de desempeño conforme aumenta el desplazamiento del último nivel.

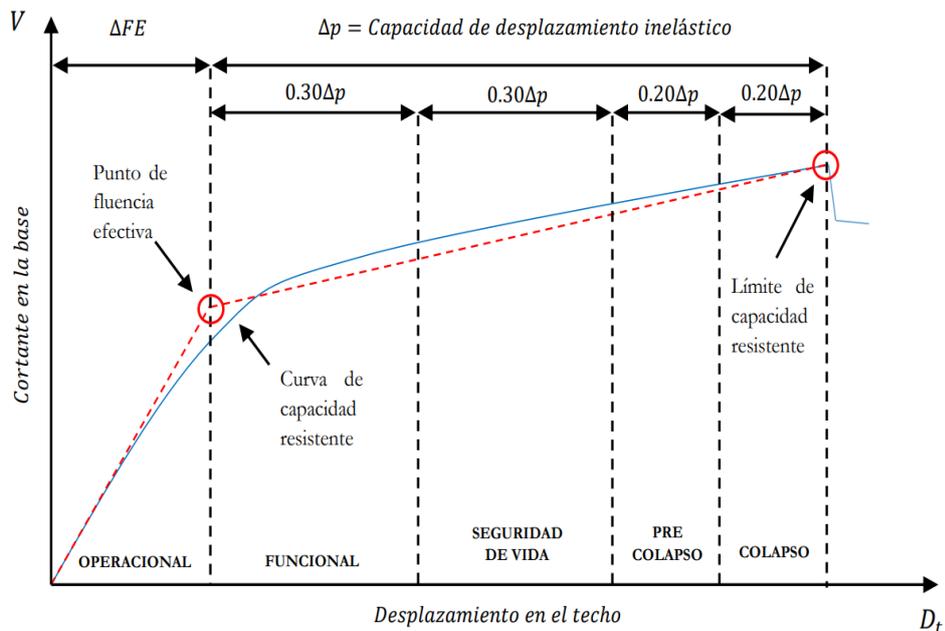


Figura N° 15 Sectorización para la Curva de capacidad. (Fuente: SEAOC VISION 2000)

4.1 SISTEMAS DE REFORZAMIENTO TRADICIONAL

El objetivo principal del reforzamiento es restaurar y mejorar la capacidad de una estructura ante ello el reforzamiento tradicional plantea la modificación de algunas propiedades principales de la estructura como la resistencia, ductilidad, rigidez, desplazamientos y capacidad de disipación de energía, lo que permitirá que la estructura cumpla con las condiciones mínimas normativas garantizando la seguridad de vida de sus ocupantes. Así mismo, las estructuras con un sistema de reforzamiento tradicional seguirán presentando daños frente a sismos severos. El reforzamiento estructural es el proceso de incrementar la capacidad de la estructura con el fin de conseguir una respuesta aceptable ante un evento externo buscando incrementar el desempeño estructural por encima de su desempeño original.

4.2 ENFOQUE SISMORRESISTENTE CON SISTEMAS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

El diseño sísmico puede plantearse de dos formas para garantizar el nivel de desempeño de una estructura luego de un evento sísmico.

El primero denominado diseño Sismorresistente convencional, el cual se basa en crear estructuras suficientemente rígidas con la capacidad de deformarse e incursionar en el rango inelástico (estructuras dúctiles). Para lograr un nivel de ductilidad adecuado nos apoyamos en la ductilidad inherente de los sistemas estructurales para permitir cierto nivel de daño en la estructura, evitando el colapso, pero garantizando la seguridad de vida como nivel de desempeño. Para ello se emplean distintos sistemas sísmicos como los sistemas aporticado, sistemas con muros estructurales, sistemas duales, marcos rígidos arriostrados y armaduras de acero de tal forma que sean capaces de resistir las cargas laterales generadas debido a la excitación sísmica. Es importante tener en cuenta el tipo de material y sus propiedades a emplear en el diseño de la estructura.

La segunda forma de enfrentar las amenazas sísmicas a las que están expuestas las estructuras es emplear sistemas con protección sísmica con la capacidad de disipar energía, como por ejemplo los sistemas empleados en la Figura N° 16. Estos se instalan en la estructura con el objetivo de disminuir la respuesta dinámica

de la misma, es decir, disminuir el desplazamiento, velocidad y aceleración que esta pueda experimentar debido al evento sísmico y de esta forma disminuir el daño en la estructura debido a un evento sísmico.

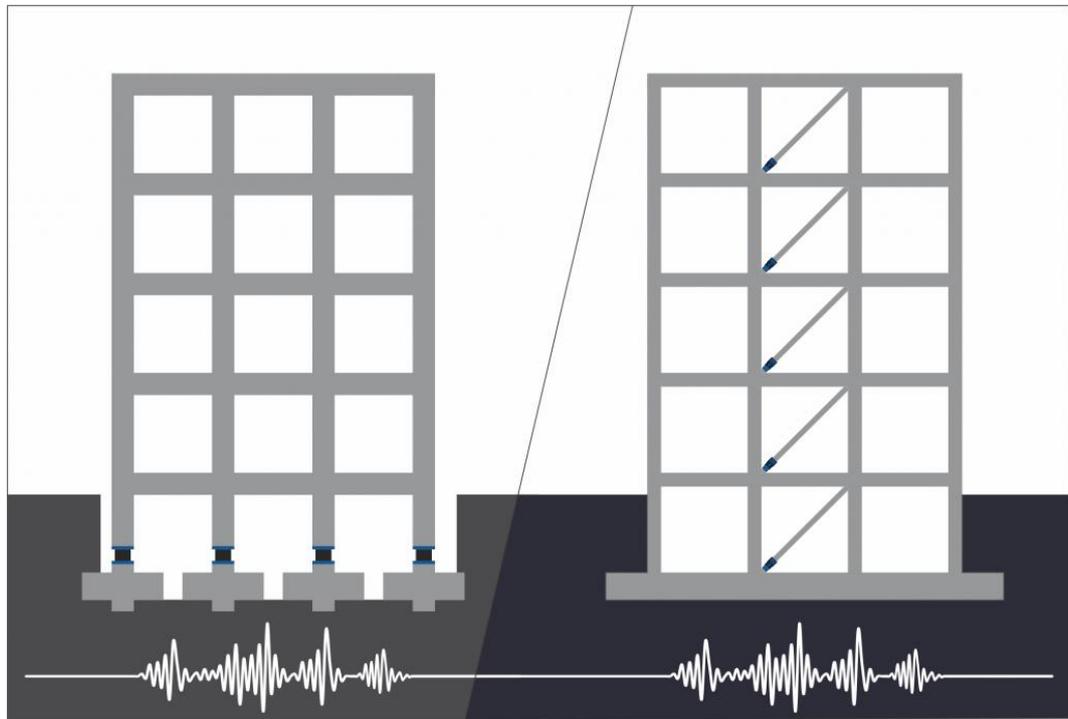


Figura N° 16 Sistemas con protección sísmicas con aislamiento de base y amortiguadores (Fuente Quaketek)

4.3 PRINCIPIOS DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA

En un sismo o terremoto, el sismo transmite energía a la estructura, esta energía se transforma en energía elástica de movimiento y deformación. La energía elástica a su vez está formada por energía elástica no disipada o recuperable (ES) y energía cinética (Ek). La energía disipada está formada por la energía de amortiguamiento (Eξ). El desempeño de una estructura frente a sismos mejora cuando parte de esta energía es absorbida por un dispositivo suplementario, el cual se observa en la ecuación de la conservación de la energía. La energía que se introduce en un sistema se transforma, y eventualmente se disipa:

$$E_T = E_I + E_K + E_S + E_\xi$$

Ec. 1

Donde:

- ET: Energía total que un agente externo (Sismo o Viento) introduce a un sistema
- EI: Energía inelástica, es la energía relacionada con la deformación inelástica de los elementos del sistema.
- Ek: Energía cinética, es la energía total que se transforma en movimiento.
- Es: Energía elástica, es la energía generada por la deformación de los elementos estructurales.
- Eξ: Energía generada por amortiguamiento, es la energía disipada por elementos de amortiguamiento.

Se puede aumentar la capacidad de disipar la energía para reducir la amplitud de las vibraciones. Para ello se puede transformar parte de la energía cinética EK en calor (aumentar Eξ). Para ello se puede emplear dispositivos que transforman la energía en calor:

- Disipadores por deformación (metálicos)
- Disipadores de comportamiento viscoelástico
- Disipadores de comportamiento viscoso

El objetivo principal de añadir amortiguadores a construcciones nuevas o existentes es para disipar parte de la energía inducida por el terremoto en elementos que no forman parte del sistema estructural convencional como los amortiguadores.

4.4 VENTAJAS, DESVENTAJAS Y BENEFICIOS DE LOS MUROS DE FLUIDO VISCOSO

Los muros de fluido viscoso son amortiguadores especialmente adaptados para poder instalarlos entre los pisos de los edificios de forma sencilla. Los módulos internos de los disipadores basan su accionar en la fuerza viscosa generada por placas planas paralelas y proveen una fuerza viscosa horizontal según una relación constitutiva fuerza-velocidad no lineal.

A continuación, se presentan las siguientes ventajas, desventajas y beneficios de diseñar y construir una edificación con estos dispositivos:

a) Ventajas

- ✓ El proceso de montaje de estos dispositivos es sencillo, no contando con piezas mecánicas sofisticadas ni complejas de fabricar en obra para su instalación.
- ✓ El sistema de funcionamiento resulta confiable en base a la sencillez de esta, no hay mecanismos sofisticados, válvulas o sellos que hagan complejo el sistema para su evaluación o control.
- ✓ La disipación viscosa en el dispositivo no genera abrasión, desgaste ni rozamiento. A diferencia de los disipadores basados en materiales con comportamiento viscoelástico, la capacidad de disipación de energía resulta alta y comparable con otros sistemas de disipación actuales.
- ✓ El mecanismo de disipación de energía es totalmente estable en el tiempo, no necesita mantenimiento ni reparaciones después de un evento sísmico ya que los muros viscosos no tienen partes móviles ni sellos, no están sometidos a presión interna por lo que no requieren mantenimiento.
- ✓ Los muros viscosos son una alternativa eficiente para proteger edificios bajos de mediana y gran altura, para controlar efectos debido a sismos y viento.

b) Beneficios

- ✓ Los muros de fluido viscoso aumentan el nivel de amortiguamiento de la estructura, reduciendo los esfuerzos, aceleraciones y deformaciones.
- ✓ Los esfuerzos, aceleraciones y deformaciones inducidos por un sismo en una estructura, se pueden reducir entre un 15 a 40% menos que los correspondientes a una estructura sin muros viscoso, logrando reducir el daño producido a elementos estructurales y no estructurales.
- ✓ Alta capacidad de disipación de energía que se mantiene con los ciclos de trabajo y perdura con los años, elevada estabilidad de los componentes incluyendo el medio viscoso.
- ✓ Las fuerzas viscosas se incrementan continuamente con la demanda (velocidad).

- ✓ Disminución de los costos de reparación de daños, luego de un evento sísmico, dado que se reducen los daños estructurales, daños de componentes y sistemas no estructurales.
- ✓ Los muros viscosos reducen el peso de acero estructural requerido y reducir el costo total del edificio.
- ✓ Al reducir la deriva entre pisos, los muros viscosos brindan una protección sísmica superior a la estructura y su contenido.

c) Desventajas

- ✓ Interferencia con la arquitectura de la edificación en caso se instalen estos dispositivos en la fachada de esta.
- ✓ Evaluación del costo beneficio de los dispositivos comparado con otras tecnologías, debido a la poca demanda del sistema en el mercado peruano.
- ✓ Falta de disponibilidad de ofertas (nulas) en el mercado nacional, se debe contemplar los tiempos de fabricación, ensayos y entrega en obra por fabricantes internacionales.
- ✓ Falta de una normativa nacional que regule el diseño, evaluación y control de calidad de los dispositivos, para ella se deben emplear normativas extranjeras ajenas a realidad sísmica nacional.
- ✓ Falta de conocimiento y difusión entre profesionales que implementen los beneficios de diseñar y construir edificaciones con este tipo de sistemas de protección sísmica.
- ✓ Poca información nacional sobre ensayos o análisis con este tipo de tecnologías, deficiencia en los laboratorios nacionales para elaborar ensayos a escala con este tipo de dispositivos.

CAPÍTULO V. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE MUROS DE FLUIDO VISCOSO

5.1 ECUACIÓN GENERAL

Los muros de fluido viscoso funcionan proporcionando una fuerza de resistencia sólo cuando se encuentran en movimiento. No aportan rigidez a la estructura y no soportan ninguna carga estática. Cuanto mayor es la velocidad, mayor es la fuerza de resistencia que se produce. Esta relación se caracteriza típicamente por la siguiente ecuación:

$$F_{MFV} = CV^\alpha \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

- F_{MFV} : Fuerza en el muro de fluido viscoso.
- C: Constante de Amortiguamiento.
- V: Velocidad relativa en el amortiguador.
- α : Coeficiente para muros de fluido viscoso se recomienda 0.5 para edificaciones.

La fuerza en el muro de fluido viscoso se encuentra relacionado directamente con la velocidad y el coeficiente de amortiguamiento C que varía linealmente la velocidad, según la Figura N° 17.

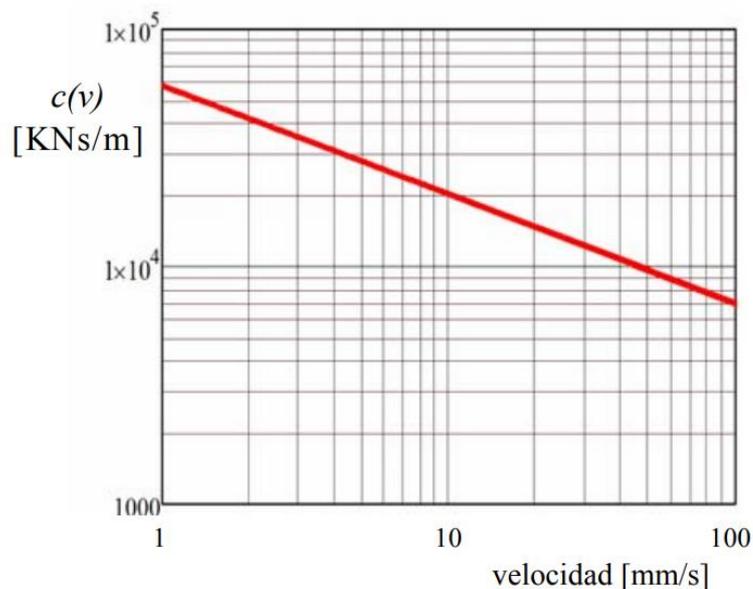


Figura N° 17 Coeficiente de amortiguamiento vs velocidad (Fuente: Asociación Argentina de Mecánica Computacional)

La fuerza viscosa generada en función de la velocidad se puede reflejar en la Figura N° 18, de acuerdo con el exponente α se observa que la fuerza siempre crece cuando aumenta la velocidad.

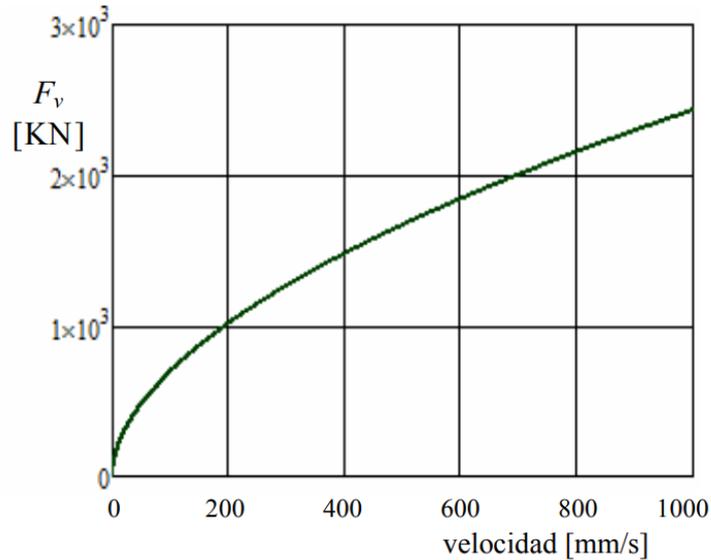


Figura N° 18 Fuerza viscosa en función de la velocidad en un muro viscoso (Fuente: Asociación Argentina de Mecánica Computacional)

Se plantea la ecuación de equilibrio dinámico en coordenadas modales correspondiente al modo i de un sistema estructural excitado en su base:

$$\ddot{q}_i(t) + 2\xi_i w_i \dot{q}_i(t) + \lambda_i q_i(t) = -\Gamma_i^d \ddot{u}_g^d(t) \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

- $q_i(t)$: Es la coordenada modal.
- ξ_i : Es la relación de amortiguamiento crítico modal.
- λ_i : Es el auto vector del problema de valores propios asociado
- $\ddot{u}_g^d(t)$: Es la aceleración de base medida en una dirección determinada $d = (x, y, z)$
- Γ_i^d : Es el factor de participación modal definido por:

$$\Gamma_i^d = \Phi_i^t M E^d \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

- Φ_i^t : Es el modo i transpuesto
- M : Es la matriz de masa

- Ed: Es el vector de influencias conteniendo los desplazamientos en las coordenadas geométricas resultantes de un desplazamiento unitario en la base en la dirección d considerada.

Los desplazamientos máximos modales \hat{u}_i pueden ser calculados como:

$$\hat{u}_i = \phi_i \sum_d \Gamma_i^d S_{Di}^d \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

- $S_{Di}^d(\xi_i, T_i)$: Es el espectro de desplazamientos relativos del modo i, en la dirección d, calculado a partir del espectro de pseudo-aceleraciones Sa.

De manera que una primera aproximación lineal de la variable de control, en este caso la deriva máxima modal de entrepiso \hat{D}_i , puede ser estimada con el esquema actual propuesto de la siguiente forma:

$$\hat{D}_i = D_{\phi_i} \sum_d \Gamma_i^d S_{Di}^d \quad \text{Ec. 6}$$

Finalmente, los máximos finales en la historia del tiempo de las variables en cuestión pueden ser aproximados por el método SRSS o con mejores resultados con el método CQC. La reducción de la respuesta espectral modal en función del amortiguamiento ha sido objeto ya de varias aproximaciones, entre ellas se destaca el factor de reducción B a aplicar sobre un espectro de amortiguamiento ξ_0 para pasar a otro espectro de amortiguamiento ξ_1 , dada por (Newark and Hall, 1981).

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln \xi_1}{2.31 - 0.41 \ln \xi_0} \quad \text{Ec. 7}$$

De esta manera, es posible asociar una reducción del perfil en altura de la variable de control del edificio con una necesidad de incremento de amortiguamiento modal.

5.2 RESPUESTA DEL MURO DE FLUIDO VISCOSO

La Figura N° 19 muestra un Muro de Fluido Viscoso instalado en una estructura de acero con un sistema de pórticos especiales a momento.



Figura N° 19 Muro de fluido viscoso instalado en una estructura de acero (Fuente: DIS)

La deformación del sistema estructural con muros de fluido viscoso ante un evento sísmico generará desplazamientos relativos, lo que provocará que en la parte superior e inferior del muro de fluido viscoso movimientos, velocidades y aceleraciones diferentes. Esta diferencia relativa de movimiento generará en el amortiguador una fuerza y a la vez será una fuente de disipación de energía. La fuerza transmitida y la energía disipada por el muro de fluido viscoso está representada por la ecuación 2 y por la ecuación 8 respectivamente.

$$ED = \int |F_{WVF}| dx \quad Ec. 8$$

Cuando el exponente (α) de la ecuación 2 es igual a la unidad, se tendrá un amortiguador viscoso con una relación lineal entre la fuerza y la velocidad, denominado amortiguador viscoso lineal. Cuando el valor de (α) es diferente de uno, el dispositivo se le denomina amortiguador viscoso no lineal.

La Figura N° 20 muestra la relación entre la fuerza y la velocidad de los amortiguadores descritos anteriormente. Se puede observar en la figura que el dispositivo viscoso no línea ($\alpha=n < 1$) es más eficiente con respecto a los otros dos sistemas ya que la fuerza es menor conforme se incrementa la velocidad.

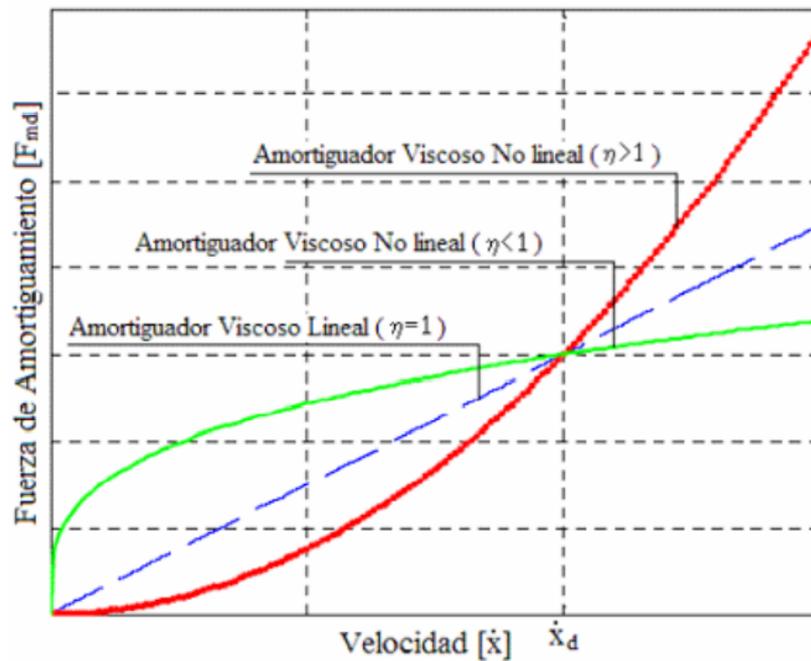


Figura N° 20 Relación Velocidad vs Fuerza del Disipador (Fuente: Cundumi, 2005)

Los amortiguadores viscosos tienen la capacidad de reducir los desplazamientos sin incrementar la rigidez de la estructura, manteniendo el comportamiento modal de la estructura, sin alterar la rigidez o el periodo del sistema esto es debido a que la fuerza del amortiguador varía sólo con la velocidad, adicional a ellos los amortiguadores viscosos proporcionan un nivel de amortiguamiento al sistema, esto genera una disminución en la curva de aceleración espectral manteniendo el mismo periodo del sistema con lo cual tendremos una fuerza de corte de diseño menor, el efecto es similar en el desplazamiento ya que al incrementar el amortiguamiento la curva de desplazamiento espectral disminuye lo que nos proporciona menores desplazamientos del sistema, todo lo mencionado lo estudiaremos más adelante.

5.3 MODELO ANALÍTICO CON MUROS DE FLUIDO VISCOSO

La respuesta sísmica de los muros de fluido viscoso se puede representar matemáticamente utilizando elementos no lineales. Los muros de fluido viscoso se representan mejor en un modelo de amortiguador exponencial Maxwell, como se muestra en la Figura N° 21.

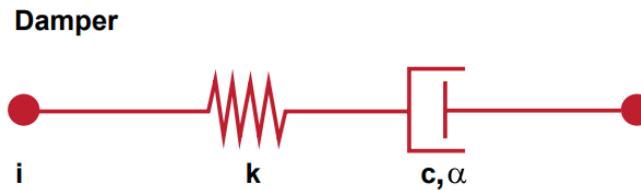


Figura N° 21 Representación matemática de un muro de fluido viscoso (Fuente: DIS)

El modelo consta de un resorte lineal, K , en serie con un amortiguador exponencial caracterizado por un coeficiente de amortiguamiento C y un exponente α , de tal manera que la fuerza en el dispositivo está relacionada con la velocidad a través del amortiguador mediante la ecuación 2.

Los muros de fluido viscoso se conectan a viga superior e inferior. Por lo que, para poder utilizar el elemento de 2 nodos presentado en la Figura N° 21, se debe modelar una trama típica que contenga el muro de fluido viscoso tal como se muestra en el modelo matemático presentado en la Figura N° 22.

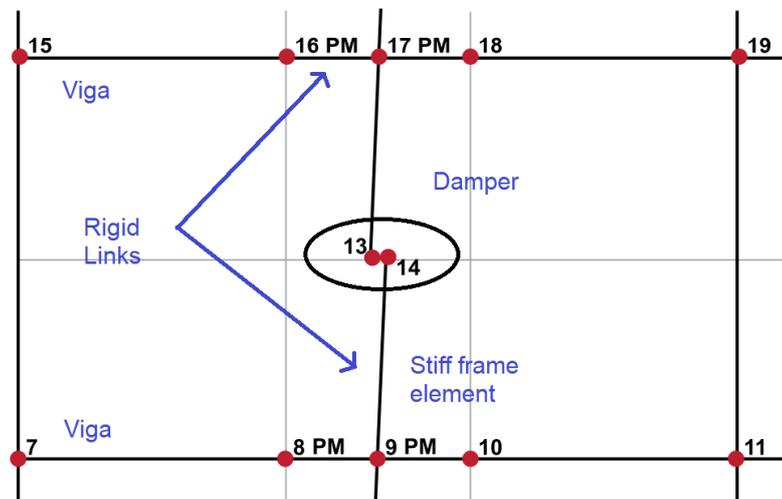


Figura N° 22 Esquema de modelado de un muro viscoso para un análisis no lineal (Fuente: DIS)

La deriva entre el piso superior e inferior generará un desplazamiento relativo entre los dos nodos del enlace activando el esquema que representa al muro de fluido viscoso. La rigidez de los componentes de la paleta y del tanque del muro de fluido viscosos están incluidos en el modelo generado.

Para poder definir e incluir estos dispositivos en el sistema estructural tal cual se está planteando en la Figura N° 22, se debe realizar por medio de los elementos Enlace. Para este caso presentaremos algunos tipos de links empleados en el programa ETBAS:

- Linear
- MultiLinear Elastic
- MultiLinear Plastic
- Damper exponencial
- Gap
- Hook
- Plastic (Wen)
- Rubber Islotar
- Friction Islotar

El elemento que utilizar para poder modelar el comportamiento del dispositivo de disipación de energía del tipo viscoso es el elemento Damper exponencial, el cual representa matemáticamente junto con el arreglo indicado en la Figura N° 22, el comportamiento dinámico del muro de fluido viscoso real tal cual se muestra en la Figura N°23.



Figura N°23 Muro de fluido viscoso instalado en obra. (Fuente OILES)

5.4 COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO

El comportamiento histórico de un muro de fluido viscoso se describe mediante una curva de geometría elíptica mediante la relación fuerza - desplazamiento, la fuerza máxima se alcanza cuando los desplazamientos son nulos como se muestra en la Figura N° 24.

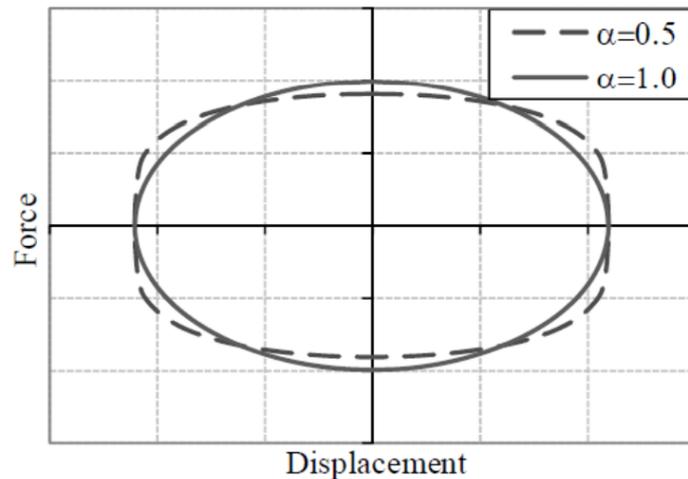


Figura N° 24 Curva Histerética de un Amortiguador viscoso (Fuente: Kelly, 2001)

Los máximos esfuerzos en los elementos estructurales como las columnas se presentan cuando la estructura se encuentra en su máxima posición de deformación respecto a su posición de reposo o equilibrio, a partir de ese instante la estructura retorna a su posición original cambiando de dirección. Si incorporamos en el sistema un Muro de Fluido Viscoso presentará una fuerza de amortiguamiento nulo ya que en esta posición la velocidad es nula para el instante de desplazamiento máximo.

En el momento en que la estructura retorna a su posición de equilibrio la fuerza de amortiguamiento en el muro de fluido viscoso es máxima y el desplazamiento y los esfuerzos en los elementos estructurales es mínimo, esto debido a que en esta posición la velocidad de la estructura es máxima y no se encuentra deformada, adicional a ello los muros de fluido viscoso no transmiten esta fuerza viscosa directamente a la unión viga columna ya que es un sistema que va directamente conectado a la viga del pórtico, lo que genera una disminución de los esfuerzos en las zonas críticas de la estructura a comparación con otros sistemas.

La Figura N° 25, muestra el efecto de la variación del coeficiente de amortiguamiento C manteniendo las variables de la velocidad y el exponente α constantes, si se tienen en cuenta lo mencionado entonces la fuerza es directamente proporcional al coeficiente de amortiguamiento y la curva que representa el compartimiento fuerza – desplazamiento será elíptica.

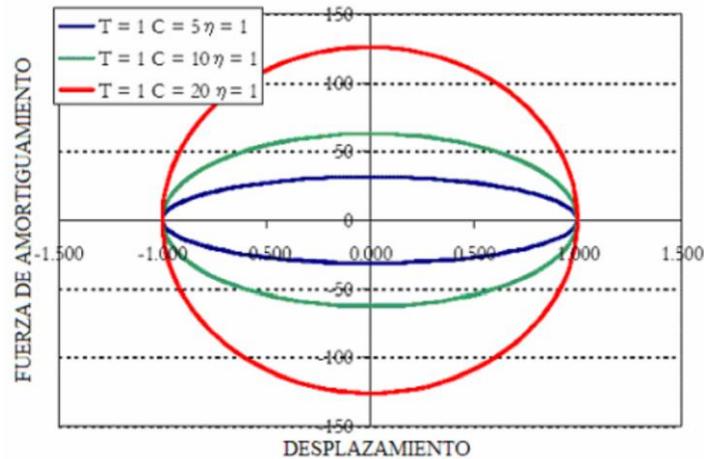


Figura N° 25 Comportamiento de un amortiguador viscoso lineal, para distintos valores de C (Fuente: Kelly, 2001)

En la Figura N° 26, se trabajará con un coeficiente de amortiguamiento C constante y haremos variar el exponente α entre 0,3 a 1,0. Al reducir α de 1,0 a 0,3 la curva fuerza – desplazamiento tiende a cambiar de una forma elíptica a una forma rectangular. Los valores de α más empleados en los diseños varían de 0.30 a 0.50, para el caso de muros de fluido viscoso se suelen emplear valores de α de 0.5.

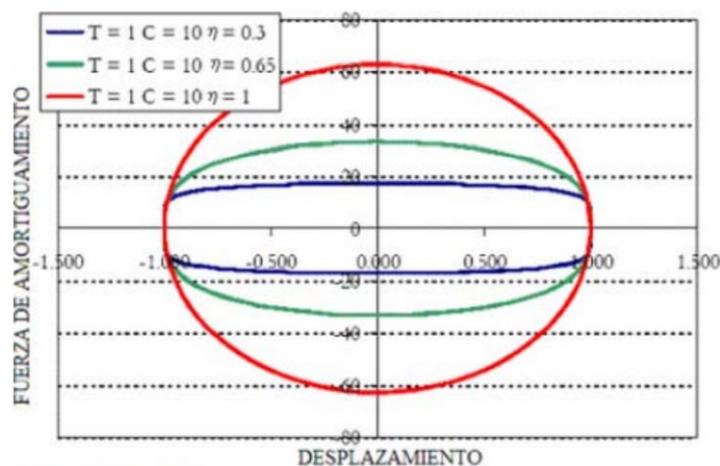


Figura N° 26 Comportamiento de un amortiguador viscoso no lineal, para un C constante (Fuente: Kelly, 2001)

En la Figura N° 27, se trabajará variando el exponente α , pero el coeficiente de amortiguamiento C variará de tal forma que la fuerza de amortiguamiento sea constante. Como aplicación iniciaremos con un exponente $\alpha=1$, luego reduciremos α a 0,3 para ello el coeficiente de amortiguamiento se debe incrementar de 5,5 a 20. La curva fuerza - desplazamiento muestra un cambio pasando de su forma elíptica a una curva rectangular al disminuir el exponente α .

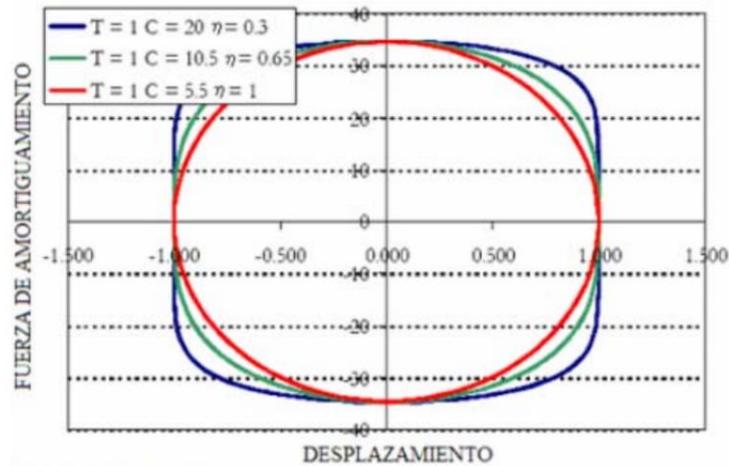


Figura N° 27 Comportamiento de un amortiguador viscoso no lineal, para F constante, pero con valores de α y C variables (Fuente: Kelly, 2001)

La Figura N° 28, nos permite visualizar los resultados de trabajar con la velocidad máxima, la cual se observa que limita la fuerza del amortiguador a valor de 50, luego de variar el valor de C de 5 a 20. Reduciendo el exponente se logra el mismo efecto, la forma de la elipse se vuelve rectangular.

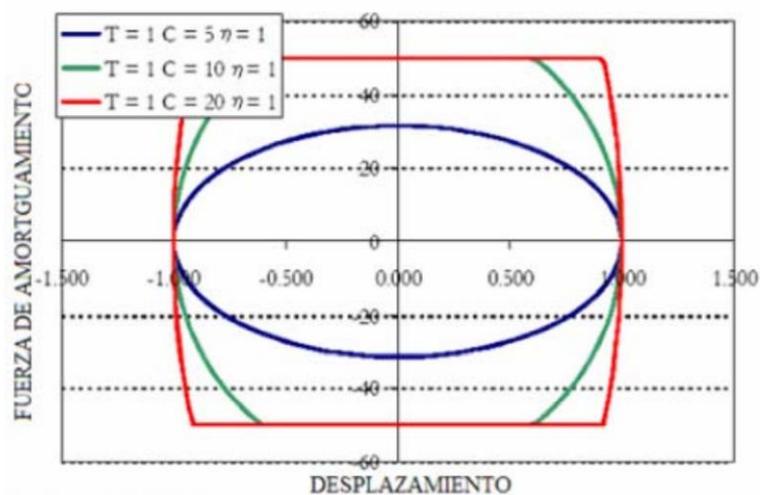


Figura N° 28 Comportamiento de un amortiguador viscoso lineal, considerando una velocidad límite (Fuente: Kelly, 2001)

5.5 EFECTO DE LOS MUROS VISCOSOS SOBRE EL ESPECTRO DE RESPUESTA

En la figura N° 29 se puede observar el espectro de desplazamiento para una determinada estructura. Teniendo en cuenta que el periodo fundamental de la estructura convencional es (T_A) sin dispositivos de fluido viscoso. Además, se emplea un amortiguamiento del 5% del amortiguamiento crítico y se le asocia un desplazamiento espectral (d_A), bajo estas consideraciones se define el punto A.

Ahora para disminuir el desplazamiento espectral de la estructura desde “ d_A ” a “ d_B ” o desde el punto A al punto B, una alternativa es incrementar la rigidez de la estructura ya sea incrementando las secciones de los elementos estructurales o adicionando nuevos elementos, al aumentar la rigidez lograremos disminuir el periodo fundamental de la estructura lo que generará una disminución en el desplazamiento espectral, pero como consecuencia de incrementar la rigidez se incrementa la aceleración en la estructura (punto “B”).

Una segunda alternativa para llegar al mismo nivel del punto B es incrementar el nivel de amortiguamiento de la estructura para ellos se implementará cierta cantidad de muros de fluido viscoso, en la Figura N° 29, se observa que no se modifica la rigidez de la estructura sólo incrementa el nivel de amortiguamiento manteniendo el periodo de la estructura, lo que disminuirá el desplazamiento espectral y la aceleración sobre la estructura desde “A” a “C” (punto “C”) tal como se muestra en la Figura N° 30 .

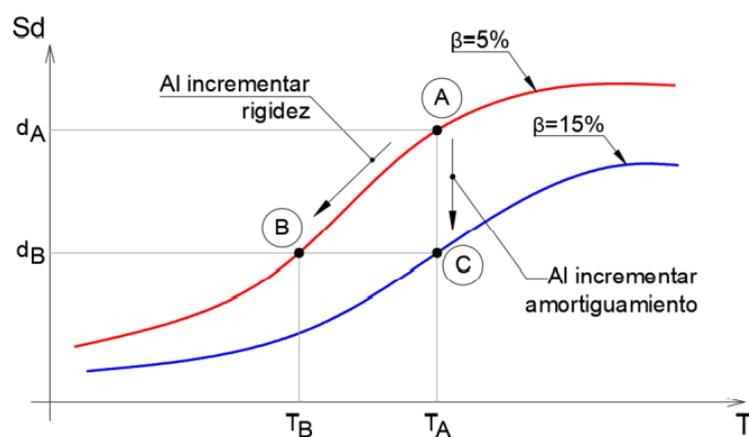


Figura N° 29 Variación del amortiguamiento con muros de fluido viscoso en el Espectro de Desplazamiento (Hart y Wong, 2000)

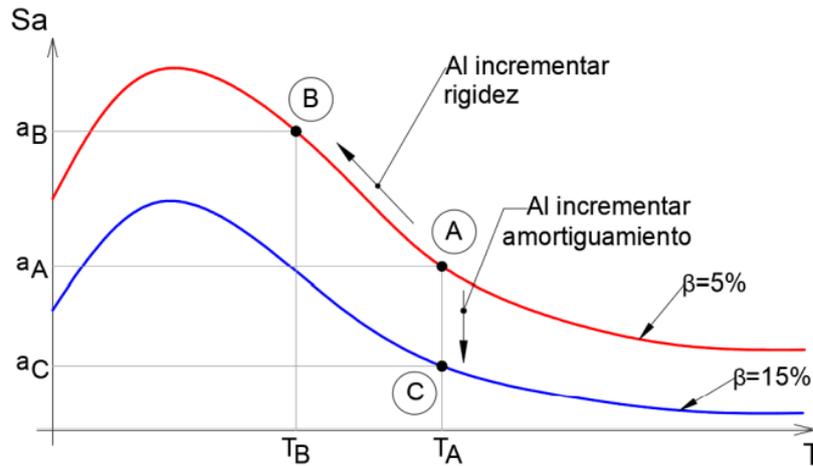


Figura N° 30 Variación del amortiguamiento con muros de fluido viscoso en el Espectro de Aceleración (Fuente: Hart y Wong, 2000)

5.6 OBJETIVOS DE DESEMPEÑO

En la Figura N° 31 se puede observar los objetivos de desempeño en relación con los niveles de sismo, las líneas diagonales representan los criterios de diseño que el cliente o dueño del proyecto podrá imponer sobre la estructura. Por ejemplo, el diseño más rentable para una vivienda podría ser el criterio “básico”, mientras que un fabricante de alta tecnología podría querer reducir el riesgo mediante el criterio “esencial/peligroso”. Proyectos del estado, en cambio, podría requerir por ejemplo que los hospitales cumplan con el criterio “seguridad crítica”. Esta figura fue desarrollada por la SEAO Vision 2000 y el proyecto FEMA 273.

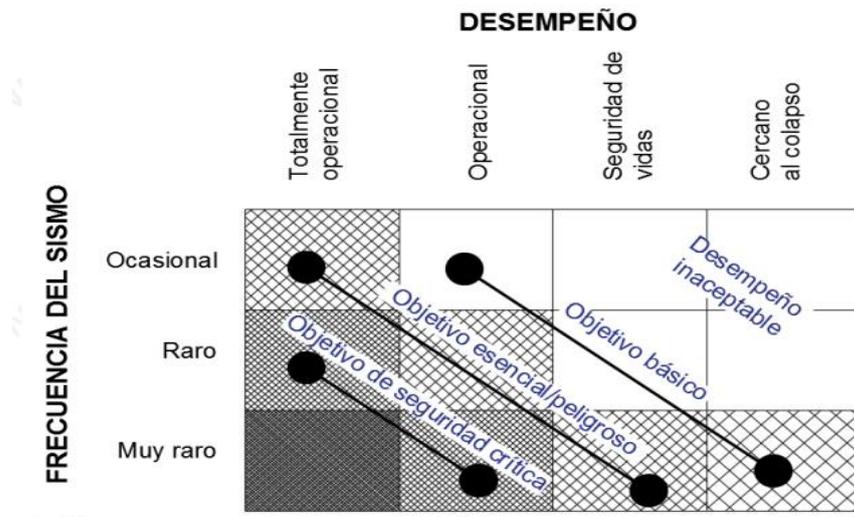


Figura N° 31 Objetivos de desempeño. (Fuente: Adaptación SEACE Visión 2000)

5.6.1 Nivel de desempeño de la estructura

Es el máximo nivel de daño permitido para un nivel de diseño sísmico determinado (nivel de demanda). Representa una condición límite de daño establecida en base a tres aspectos principales: todos los daños posibles generados en los componentes estructurales y no estructurales, el nivel de amenaza generada sobre la seguridad de los habitantes de la estructura inducida por estos daños y la funcionalidad de la edificación posterior al evento sísmico. Está conformado por un nivel de desempeño estructural y un nivel de desempeño no estructural como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1 Desempeño de una estructura (Fuente: Propia)

NIVEL DE DESEMPEÑO DE LA ESTRUCTURA	=	NIVEL DE DESEMPEÑO ESTRUCTURAL	+	NIVEL DE DESEMPEÑO NO ESTRUCTURAL
---	---	--------------------------------------	---	---

El Nivel de Desempeño Estructural describe el estado límite de daño del sistema estructural principal, mientras que el Nivel de Desempeño No Estructural, describe el estado límite de daño de componentes no estructurales donde se incluyen los cerramientos. Estos niveles están referidos a puntos discretos en una escala continua, describiendo el comportamiento esperado de la estructura, o alternativamente, cuánto daño y pérdidas económicas pueden ocurrir.

A continuación, describiremos a modo de resumen dos de los documentos más importantes sobre los niveles de desempeño: el ATC-40 y el comité VISION 2000.

- ✚ Propuesta del ATC-40: El ATC establece niveles de desempeño teniendo en cuenta una combinación de los niveles empleados para elementos estructurales y no estructurales de forma independiente, según la Tabla 2.

Tabla 2 Niveles de Desempeño según el ATC 40. (Fuente: Visión 2000 y ATC 40)

NIVELES PARA LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES	NIVELES PARA LOS ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES
<p>Se define tres niveles o estados de daño discretos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ocupación inmediata • Seguridad • Estabilidad estructural <p>Estos tres niveles pueden ser utilizados directamente para definir criterios técnicos en los procesos de evaluación y rehabilitación de estructuras. Adicionalmente, se establecen dos rangos intermedios:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Daño controlado • Seguridad limitada <p>Estos rangos intermedios permiten discriminar, de una forma más adecuada y útil, el nivel de desempeño de la estructura. Esto es de gran utilidad en el caso de ser necesaria una evaluación o reforzamiento de una estructura en particular. Estos niveles se identifican por la abreviación, SP-n (SP son las siglas de Structural Performance y n es un número que varía entre 1 y 6).</p>	<p>Se consideran 4 niveles de desempeño correspondientes a estados discretos de daño para los elementos no estructurales:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Operacional • Ocupación inmediata • Seguridad • Amenaza reducida <p>Estos niveles se representan con la abreviación NP-n. NP son las siglas de Nonstructural Performance, y n es una letra que toma valores entre A y E.</p>

✚ Propuesta del comité VISION 2000: Este comité definió cuatro niveles de desempeño de acuerdo con la Tabla 3.

Tabla 3 Niveles de Desempeño según el comité VISION 2000. (Fuente: Visión 2000)

TOTALMENTE OPERACIONAL	OPERACIONAL
<ul style="list-style-type: none"> • La estructura no presenta daños. • La estructura se mantiene en un comportamiento elástico. • La estructura se mantiene en funcionamiento y con una operatividad continua, • Se garantiza la seguridad de las personas. • La estructura no requiere reparaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> • La estructura presenta daños moderados. • Presenta daños en los elementos no estructurales y en el contenido. • Presenta daños leves en los elementos estructurales. • El daño es mínimo y no compromete la seguridad de la estructura. • La estructura puede ser ocupada inmediatamente después del sismo.

SEGURIDAD	PRÓXIMO AL COLAPSO
<ul style="list-style-type: none"> • Está relacionado con la ocurrencia de daños moderados en elementos estructurales y no estructurales. • La rigidez y la capacidad de resistencia lateral se ven reducidas en un gran porcentaje. • La estructura mantiene un margen de seguridad ante el colapso. • Los daños generados posiblemente impidan que la estructura sea ocupada inmediatamente después del sismo. • De ser necesario se deberá proceder a su rehabilitación si el análisis lo justifica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Existe una degradación de la rigidez y la capacidad resistente lateral del sistema. • La estabilidad de la estructura está aproxima al colapso. • El sistema de evacuación puede verse afectado por fallas locales. • La estructura es insegura para sus ocupantes. • Posiblemente el costo de reparación o rehabilitación sea muy elevado.

5.6.2 Nivel de amenaza sísmica

La amenaza sísmica generada debido al movimiento del terreno debe contemplar las fallas que existan con respecto a la ubicación del edificio y las características geológicas locales e in situ. Estas amenazas sísmicas dependen de ciertos parámetros como la magnitud del sismo, la dirección de propagación de la ruptura de falla, la distancia a la fuente y las características geológicas. El efecto de cada uno de estos factores debe ser considerado e investigado. Por ello, es necesario seleccionar un conjunto de registros sísmicos adecuados y que representen el nivel de peligro sísmico de acuerdo con las condiciones reales de la estructura para evaluar el comportamiento y el nivel de desempeño que se desea lograr. Estos eventos sísmicos llamados sísmicos de diseño cuya definición varía de acuerdo con la ubicación de la estructura, la cual depende tanto de la sismicidad de la zona en la que está ubicada la estructura, como de los niveles tanto sociales como económicos para definir el nivel de desempeño y los niveles aceptables del daño por parte de las instituciones responsables, los propietarios y usuarios de las estructuras.

- ✚ La normativa ASCE 41-17 utiliza niveles de amenaza sísmica probabilísticos al describir los movimientos del terreno para los cuales se realiza la evaluación de la edificación, excepto en ciertas áreas donde se imponen situaciones determinísticas. Tales movimientos del terreno son identificados como la probabilidad de excedencia en un período específico de tiempo, como el 20% de probabilidad de

excedencia en 50 años, o como un período de retorno de dicho movimiento del terreno, como 225 años. La Tabla 4 que se muestra a continuación expone las probabilidades de excedencia del movimiento del terreno y su correspondiente período de retorno, propuestos por la normativa en estudio.

Tabla 4 Probabilidad de excedencia y periodo de retorno. (Fuente: ASCE 41-17)

PERIODO DE RETORNO	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA
43 años	50% en 30 años
72 años	50% en 50 años
225 años	20% en 50 años
475 años	10% en 50 años
975 años	5% en 50 años
2475 años	2% en 50 años

- Propuesta del comité VISION 2000: Los movimientos sísmicos de diseño son expresados en términos de un intervalo de recurrencia medio o de una probabilidad de excedencia. El intervalo de recurrencia medio, por ejemplo 475 años, es una expresión del período promedio de tiempo, expresado en años, que transcurre entre la ocurrencia de un sismo que produce daños de una severidad igual o superior a una determinada. La probabilidad de excedencia, de 10% en 50 años, es una representación estadística de la posibilidad de que el efecto de un sismo exceda una cierta severidad durante un período de tiempo determinado expresado en años. El período de retorno T_R (intervalo de recurrencia) puede relacionarse directamente con una probabilidad de excedencia p_e para un número específico t de años, mediante la siguiente ecuación:

$$T_R = \frac{t}{\ln(1-p_e)} \quad \text{Ec. 9}$$

A continuación, se muestra en la Tabla 7 el periodo de retorno o los intervalos de recurrencia, así como las probabilidades de excedencia para los cuatro niveles de sismos considerados por el comité VISION 2000.

Tabla 5 Niveles de sismo considerados por el comité VISION 2000. (Fuente: Visión 2000)

NIVEL DE SISMO	PERIODO DE RETORNO	PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA
Frecuente	43 años	50% en 30 años
Ocasional	72 años	50% en 50 años
Raro	475 años	10% en 50 años
Muy raro	950 años	5% en 50 años

La Tabla 8 y Tabla 9, muestra los límites de aceleraciones y derivas con relación a los niveles de desempeño establecido por el comité VISION 2000.

Tabla 6 Límite de derivas establecidas por el comité VISION 2000. (Fuente: Visión 2000)

SISMO DE DISEÑO	DISTORSIÓN
Totalmente Operacional	0.0020
Operacional	0.0050
Seguridad	0.0150
Próximo al colapso	0.0250

Tabla 7 Límite de aceleraciones establecidas por el comité VISION 2000. (Fuente: Visión 2000)

SISMO DE DISEÑO	ACELERACIÓN (g)	NIVEL DE DESEMPEÑO	COMPORTAMIENTO ESPERADO
Frecuente	0.23 g	Totalmente Operacional	Perfectamente elástico
Ocasional	0.28 g	Operacional	Prácticamente elástico
Raro	0.45 g	Seguridad	IncurSIONES inelásticas con pérdidas de resistencia y rigidez. La estructura es reparable. La estructura es reparable.
Muy raro	0.675 g	Próximo al colapso	Severas incurSIONES inelásticas, pérdida casi total de la rigidez y resistencia. No es práctico reparar la estructura.

- Propuesta del ATC-40: El ATC-40 utiliza tres niveles de movimientos sísmicos para el diseño de estructuras: sismo de servicio, sismo de diseño y sismo máximo. Como se muestra en la Tabla 8:

Tabla 8 Niveles de sismos para diseño de estructuras según el ATC 40. (Fuente: ATC 40)

SISMO DE SERVICIO (SE)	SISMO DE DISEÑO (DE)	SISMO MÁXIMO (MCE)
<p>Nivel del movimiento del terreno con un 50% de probabilidad de excedencia en un periodo de 50 años.</p> <p>Periodo de retorno: T=75 años</p> <p>Se considera como un sismo frecuente, ya que puede ocurrir más de una vez durante la vida útil de la estructura.</p>	<p>Nivel del movimiento del terreno con un 10% de probabilidad de excedencia en un periodo de 50 años.</p> <p>Periodo de retorno: T=475 años.</p> <p>Representa un movimiento sísmico poco frecuente, de intensidad entre moderada y severa, y se considera que puede ocurrir al menos una vez durante la vida de la estructura.</p>	<p>Nivel del movimiento del terreno entre un 2% de probabilidad de excedencia en un periodo de 50 años.</p> <p>Periodo de retorno: T=2475 años.</p> <p>Corresponde al máximo movimiento del terreno que puede ser esperado en el sitio donde se encuentra localizada la estructura.</p> <p>Es utilizado para el diseño de estructuras esenciales.</p>

CAPÍTULO VI. PROCEDIMIENTO DE ANÁLISIS APLICADO A LA REALIDAD PERUANA

6.1 METODOLOGÍA DE DISEÑO CON MUROS DE FLUIDO VISCOSO

El diseño de estructuras con muros de fluido viscoso es un proceso iterativo donde el objetivo es llegar a un nivel de control de la respuesta de la estructura que garantice un desempeño adecuado de la misma. Para este fin es importante definir un modelo o un esquema de diseño que nos permita evaluar si el nivel de control deseado puede ser alcanzado por la estructura con los muros de fluido viscoso, también nos debe permitir la posibilidad de definir en forma aproximada un prediseño de los dispositivos de tal manera que las posteriores etapas iterativas de afinamiento y validación del diseño lleven a cambios menores y a una optimización de tiempo de análisis.

En la práctica, este tipo de diseño consiste en realizar un análisis para ajustar y calibrar la respuesta del edificio teniendo en cuenta los criterios mencionados con anterioridad al incorporar los muros de fluido viscoso. Este análisis se hace de manera analítica, basadas en programas de cálculo estructural, como el DIANA FEM, ETABS, SAP2000, etc., con los que la estructura del edificio se modela tridimensionalmente. Para incorporar los muros de fluido viscoso, estos dispositivos se modelan bajo un comportamiento no lineal para realizar un análisis dinámico no lineal tiempo historia. A continuación, se describen las etapas de diseño que se empleará en este trabajo.

6.1.1 Determinación del sistema estructural

Para iniciar el proceso de diseño partiremos del sistema estructural planteado de forma convencional, el modelamiento matemático de los componentes estructurales del sistema sin los muros de fluido viscoso y su evaluación sísmica. El análisis puede corresponder a una estructura existente (en el caso de un reforzamiento) o a una edificación nueva. A partir del análisis sísmico debemos determinar los periodos naturales de la estructura y los modos fundamentales de vibración en cada dirección de análisis, además de la respuesta sísmica de la estructura.

El primer paso en el diseño de los muros de fluido viscoso es la ubicación y distribución de los dispositivos dentro de la estructura, para ello debemos evaluar los puntos más críticos de la estructura, ya sea teniendo en cuenta los niveles de desplazamiento, aceleraciones o esfuerzos que se encuentren fuera de los límites normativos o que comprometan el desempeño de la estructura para la cual se está diseñando. La ubicación de los dispositivos debe realizarse en conjunto con el arquitecto, de tal forma que estos no interfieran en la estética de la edificación y no interfiera en los accesos a esta.

6.1.2 Determinación del control de la respuesta

Teniendo como base la respuesta dinámica del análisis de la estructura sin los muros de fluido viscoso, se adopta un parámetro a controlar de la respuesta dinámica de la estructura. El parámetro para controlar puede ser la reducción de un cierto porcentaje de la deformación máxima relativa de entre piso, la limitación de la aceleración máxima, limitación de la torsión, limitación de los esfuerzos, etc. Como objetivo de diseño plantearemos el control de las deformaciones relativas de entre piso, según los criterios de la Tabla 6 para lograr un nivel de desempeño mayor o igual al de seguridad de vida o buscaremos reducir los desplazamientos relativos en un 50%.

6.1.3 Determinación de la demanda sísmica

La demanda sísmica a la que se ve afectada la estructura, está intrínsecamente definida por el nivel de control de la respuesta. Ya que lo que se busca es que el comportamiento de la estructura frente a un cierto registro sísmico, conjunto de registros, espectro de diseño u otras cargas laterales es que esta cumpla con los niveles de diseño de la estructura.

Si tenemos en cuenta la norma peruana E.030 Diseño Sismorresistente del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) vigente, la norma E.031 de aislamiento sísmico y el capítulo 18 de la norma americana ASCE/SEI 7, podemos trabajar con dos niveles de sismo, el sismo básico de diseño (DBE- Design Basis Earthquake) con un periodo de retorno de 475 años y una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años; y el sismo máximo creíble (MCE – Maximum Credible Earthquake) con un periodo de retorno de 2475

años y una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años. La magnitud del sismo máximo creíble es 1.50 veces la magnitud del sismo de diseño como mínimo. El cálculo de la demanda está referido al desplazamiento máximo que experimentará la estructura bajo el nivel de amenaza sísmica.

6.1.4 Criterios de ubicación de los muros de fluido viscoso

La disposición y cantidad de los dispositivos dependerá del comportamiento de la estructura y los niveles de control de desplazamiento a los que deseáramos llegar para mejorar el nivel de desempeño de la estructura. La Norma americana ASCE- 7 en su capítulo 18 recomienda lo siguiente:

- a) Se deberán colocar por lo menos dos amortiguadores por piso ubicados simétricamente en cada dirección.
- b) Se recomienda ubicar los dispositivos en el perímetro de la estructura especialmente en los pórticos dada su flexibilidad y zonas de mayor deformación, estos pueden ser constantes en toda la altura o intercalados.
- c) La norma recomienda un nivel de amortiguamiento efectivo menor al 30% del amortiguamiento crítico teniendo en cuenta los principales modos de vibración de la estructura en la dirección de interés.

Otro factor importante para tener en cuenta es el uso de la edificación, así como la arquitectura ya que estos factores influyen considerablemente en la disposición de los espacios de la estructura para la ubicación de los muros de fluido viscoso. Otra recomendación es ubicar los muros de fluido viscoso en las zonas donde se presenten mayores desplazamientos relativos con velocidades máximas como se muestra en la Figura N° 32.



Figura N° 32 Ubicación perimetral de muros viscosos como criterio estructural. (Fuente: DIS)

6.1.5 Determinación de los parámetros de los muros de fluido viscoso

Como se dijo anteriormente, el proceso de diseño de los dispositivos es un proceso iterativo que puede compararse a la selección de una columna en el diseño de estructuras metálicas, el diseñador selecciona diferentes columnas (tamaños y secciones) y comienza a iterar hasta lograr un diseño práctico y económico. Para ello podemos seguir los siguientes pasos para iniciar el proceso de iteración y determinar las propiedades finales de los dispositivos:

- a) Obtener datos (periodos, deformaciones, masas y rigidez)
- b) Determinar el nivel de deriva con el espectro elástico y los puntos críticos de la estructura
- c) Plantear el objetivo de diseño
- d) Obtener B (Factor de reducción de Amortiguamiento)
- e) Obtener amortiguamiento histerético y viscoso.
- f) Determinar la cantidad de dispositivos en base al nivel de amortiguamiento obtenido
- g) Adoptar un valor de $\alpha=0.5$ (como recomendación)
- h) Evaluar el objetivo alcanzado, ajustar los parámetros de diseño y el nivel de amortiguamiento para alcanzar el objetivo de diseño.

6.1.6 Determinación del nivel de amortiguamiento suplementario

El nivel de amortiguamiento suplementario corresponde al grado de amortiguamiento que se debe agregar a la estructura, es decir, al valor de la razón de amortiguamiento crítico debido a los muros de fluido viscosos (ξ_{md}). Con este grado de amortiguamiento adicional lo que se desea es lograr alcanzar el control de la respuesta deseado. Este grado de amortiguamiento será tomado como la variable a iterar, es decir, se supondrá un cierto valor inicial con el cual se realizará todo el proceso de diseño, luego se verificará si se cumple con el control de la respuesta, si esto no es así se adoptará otro valor y se repetirá el proceso hasta llegar al control de la respuesta deseada, se debe tener en cuenta que el nivel de amortiguamiento debe ser razonable, ya que valores muy altos darán como resultados diseños muy costosos, para ello debemos verificar la eficiencia de los dispositivos evaluando las curvas histeréticas y el nivel de energía disipada por los dispositivos, de ser necesario se puede incrementar la cantidad de dispositivos y evaluar el nivel de amortiguamiento del sistema.

6.1.7 Muros de fluido viscoso con comportamiento no lineal

Para los dispositivos de disipación de energía con comportamiento no lineal, es decir, con el exponente de la velocidad distinto a la unidad, tomaremos como referencia la fórmula empleada por el FEMA para calcular la razón de amortiguamiento crítico, dado por:

$$\beta_V = \frac{\sum_j C_j (\phi_{rj} \cos \theta_j)^{1+\alpha} \lambda_j}{2\pi A^{1-\alpha} \omega^{2-\alpha} \sum_i m_i \phi_i^2} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde:

- β_V : Amortiguamiento viscoso.
- A: Amplitud del desplazamiento máximo.
- λ : Valor según la Tabla 9.
- C_j : Coeficiente de amortiguamiento del dispositivo j.
- α : Exponente de la velocidad.
- θ_j : Ángulo de inclinación del dispositivo j, con respecto a la horizontal.
- ω : Es la frecuencia angular de vibración.
- m_i : Corresponde a la masa del piso i.
- ϕ_{rj} : Desplazamiento relativo.

- δ_i : Desplazamiento del nivel i.

Tabla 9 Valores de λ en función del exponente de velocidad. (Fuente: FEMA 274)

Tabla C9-4	Valores del parámetro λ
Exponente α	Parámetro λ
0.25	3.7
0.50	3.5
0.75	3.3
1.00	3.1
1.25	3.0
1.50	2.9
1.75	2.8
2.00	2.7

Para determinar el amortiguamiento viscoso empleamos la ecuación 11, para ello necesitamos determinar el amortiguamiento efectivo el cuál lo podemos obtener de la ecuación 7.

$$\beta_{eff} = \beta_v + \beta_o$$

Ec. 11

Una vez determinado el nivel de amortiguamiento viscoso y los valores necesarios para la utilización de la ecuación 10, estos son reemplazados y queda sólo como incógnita el coeficiente de amortiguamiento de los dispositivos (Cj), lo cual nos permitirá determinar la cantidad de dispositivos necesarios y el coeficiente de amortiguamiento individual. Con estos resultados preliminares podemos emplear los datos de las Figura N° 33 y Figura N°34 Figura N° 33 Parámetros para los muros de fluido viscoso. (Fuente DIS).para obtener los parámetros individuales de los dispositivos a diseñar en el análisis de la estructura.

Metric Units			Single Vane		Double Vane		α (dimensionless)
DIS VWD	Width (m)	Height (m)	K [kN/m]	C [kN-(sec/m)^α]	K [kN/m]	C [kN-(sec/m)^α]	
1.8 x 2.1	1.8	2.1	23500	800	47000	1600	0.5
2.1 x 2.1	2.1	2.1	28500	1025	57000	2050	0.5
2.4 x 2.1	2.4	2.1	32000	1225	64000	2450	0.5
1.8 x 2.4	1.8	2.4	27500	975	55000	1950	0.5
2.1 x 2.4	2.1	2.4	32000	1225	64000	2450	0.5
2.4 x 2.4	2.4	2.4	35500	1475	71000	2950	0.5

Figura N° 33 Parámetros para los muros de fluido viscoso. (Fuente DIS).

Standard Units			Single Vane		Double Vane		Q (dimensionless)
DIS VWD	Width (ft)	Height (ft)	K [kip/in]	C [kip-(sec/in) ²]	K [kip/in]	C [k-(sec/in) ²]	
6 x 8	6	8	155	40	310	80	0.5
7 x 8	7	8	185	45	370	90	0.5
8 x 8	8	8	225	55	450	110	0.5
9 x 8	9	8	260	65	520	130	0.5
6 x 9	6	9	170	45	340	90	0.5
7 x 9	7	9	205	55	410	110	0.5
8 x 9	8	9	245	65	490	130	0.5
9 x 9	9	9	285	75	570	150	0.5
6 x 10	6	10	180	50	360	100	0.5
7 x 10	7	10	210	60	420	120	0.5
8 x 10	8	10	255	70	510	140	0.5
6 x 11	6	11	185	55	370	110	0.5
7 x 11	7	11	220	70	440	140	0.5
8 x 11	8	11	265	80	530	160	0.5
6 x 12	6	12	190	65	380	130	0.5
7 x 12	7	12	225	75	450	150	0.5
8 x 12	8	12	270	90	540	180	0.5

Figura N°34 Parámetros de modelamiento en unidades SI. (Fuente DIS)

6.1.8 Verificación del control de la respuesta

La respuesta dinámica del sistema con muros de fluido viscoso debe determinarse sometiendo a la estructura con los dispositivos ya definidos a un análisis tiempo historia (empleando cierta cantidad de registros sísmicos). Una vez obtenido los resultados de la respuesta dinámica de la estructura, se verifica que se obtenga el nivel de control deseado, si esto no es así se debe incrementar el valor del coeficiente de amortiguamiento según la Figura N° 33 o adicionar dispositivos en los puntos de mayor deformación.

6.2 ESQUEMA DE ALGORITMO PARA ESTRUCTURAS CON MUROS VISCOSOS

Con la finalidad de realizar un análisis dinámico tiempo historia de una estructura con muros de fluido viscoso se empleó la ecuación de movimiento un sistema elastoplástico equipado con los muros viscosos. Esta ecuación se obtiene mediante el equilibrio de fuerzas:

$$M\ddot{u} + q(u, \dot{u}) = F_{MFV} + F_e \quad Ec.12$$

Donde:

- M: Es la matriz de masas del sistema

- q : Es el vector de fuerzas de resistencia interna, que depende del desplazamiento y la velocidad.
- \ddot{u} : Es el vector de aceleración.
- F_e : Es el vector de la carga sísmica aplicada
- F_{MFV} : Es la fuerza viscosa del amortiguador según la ecuación 2.

Las fuerzas de resistencia interna están definidas por la matriz de rigidez $[K]$, la matriz de amortiguación inherente $[C]$ y la fuerza de control originada por los muros de fluido viscoso definidos en la sección anterior. Entonces, la Ecuación (12) se puede escribir como:

$$M\ddot{u}_{t+\Delta t} + q(u_{t+\Delta t}, \dot{u}_{t+\Delta t}) = F_{VWD_{t+\Delta t}} + F_{e_{t+\Delta t}} \quad Ec. 13$$

Donde:

- $F_{VWD_{t+\Delta t}} + F_{e_{t+\Delta t}}$: Son la fuerza viscosa del amortiguador y el vector de carga sísmica aplicada, respectivamente, en el tiempo $(t + \Delta t)$.
- $u_{t+\Delta t}, \dot{u}_{t+\Delta t}$: Son el desplazamiento y la velocidad del sistema en el tiempo $(t + \Delta t)$ y se definen de la siguiente manera:

$$u_{t+\Delta t} = \bar{u}_{t+\Delta t} + (\Delta t)^2 \beta \ddot{u}_{t+\Delta t} \quad Ec. 14$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_{t+\Delta t} + (\Delta t) \gamma \ddot{u}_{t+\Delta t} \quad Ec. 15$$

Donde:

- $\bar{u}_{t+\Delta t}$ y $\dot{u}_{t+\Delta t}$ son obtenidas de la siguiente ecuación:

$$\bar{u}_{t+\Delta t} = u_t + \Delta t x \dot{u}_t + 0.5(\Delta t)^2 (1 - 2\beta) \ddot{u}_t \quad Ec. 16$$

$$\dot{u}_{t+\Delta t} = \dot{u}_t + (\Delta t)(1 - \gamma) \ddot{u}_t \quad Ec. 17$$

Donde:

- β y γ : Son los índices de control de precisión asociados con la estabilidad del método.
- $\bar{u}_{t+\Delta t}$ y $\dot{u}_{t+\Delta t}$ son los valores históricos,
- $u_{t+\Delta t}$ y $\dot{u}_{t+\Delta t}$ son los valores corregidos.

En el primer paso del algoritmo, los valores iniciales de aceleración, \ddot{u}_0 , deben obtenerse mediante la Ecuación (18) en el tiempo $t = 0$ como:

$$\ddot{u}_0 = M^{-1}[(F_{WD0} + F_{e0}) - q(u_0, \dot{u}_0)] \quad Ec. 18$$

Donde F_{MFV} y F_{e0} representan la fuerza del muro de fluido viscoso y la carga sísmica aplicada, respectivamente, en el tiempo $t = 0$.

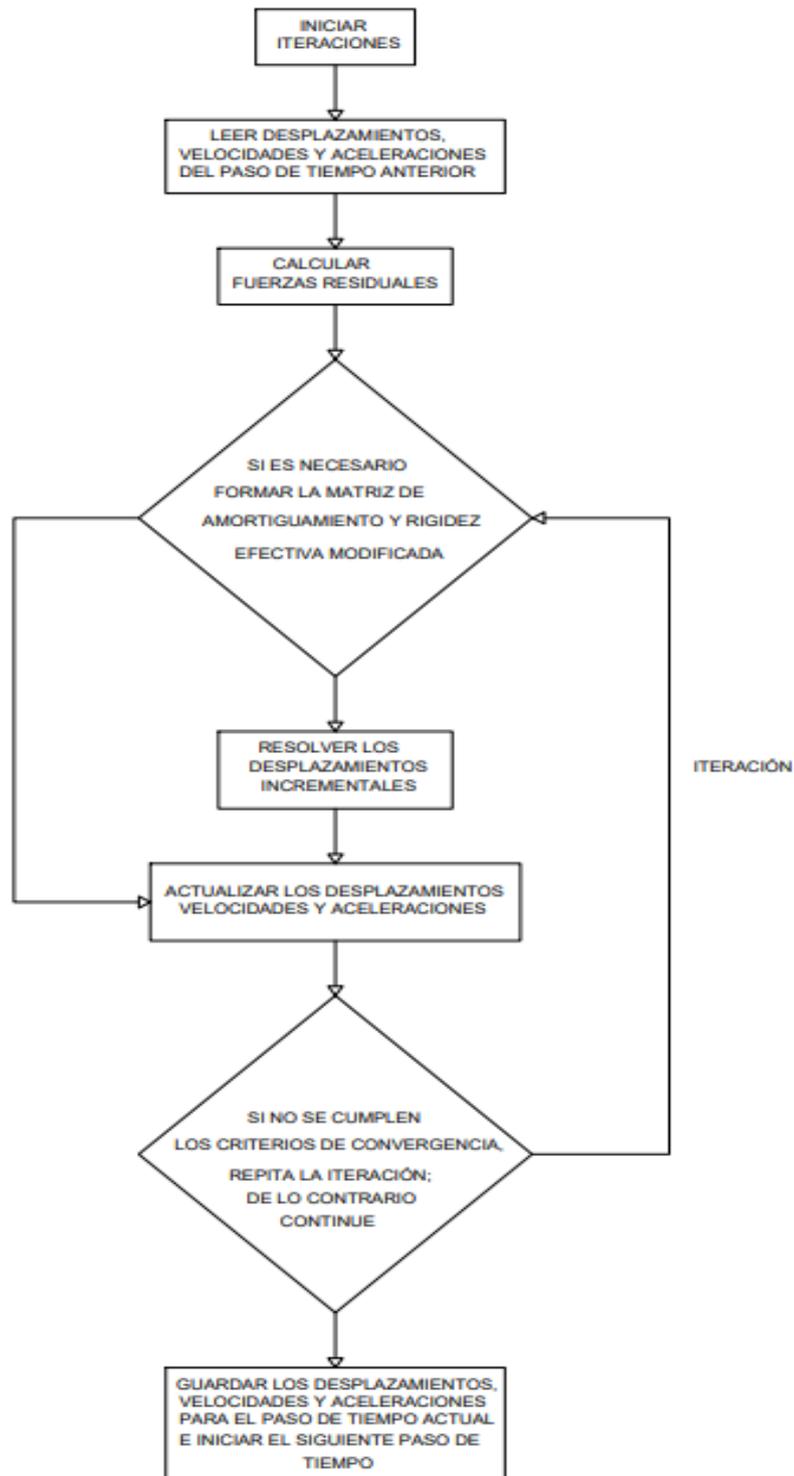


Figura N° 35 Algoritmo adaptado de Newmark para el análisis de estructuras equipadas con MFV.

La solución inelástica se obtiene como se explicó anteriormente, excepto que la matriz de rigidez se reformula para tener en cuenta el efecto de cualquier cambio topológico en la estructura debido a la formación de rótulas plásticas en el pórtico y la actualización de la fuerza del muro viscoso en función de la velocidad. El algoritmo de Newmark adaptado se aplica en cada paso de tiempo y se puede resumir en los pasos que se muestran en la Figura N° 35.

6.3 DESARROLLO DE UN CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN

El algoritmo para el análisis no lineal de construcciones RC con el dispositivo de muros de fluido viscoso propuesto, así como el procedimiento computacional asociado, se puede incorporar en un lenguaje de programación, por ejemplo, en PYTHON. El diagrama de flujo de la Figura N°36 presenta el ejemplo de procedimiento del código de programación.

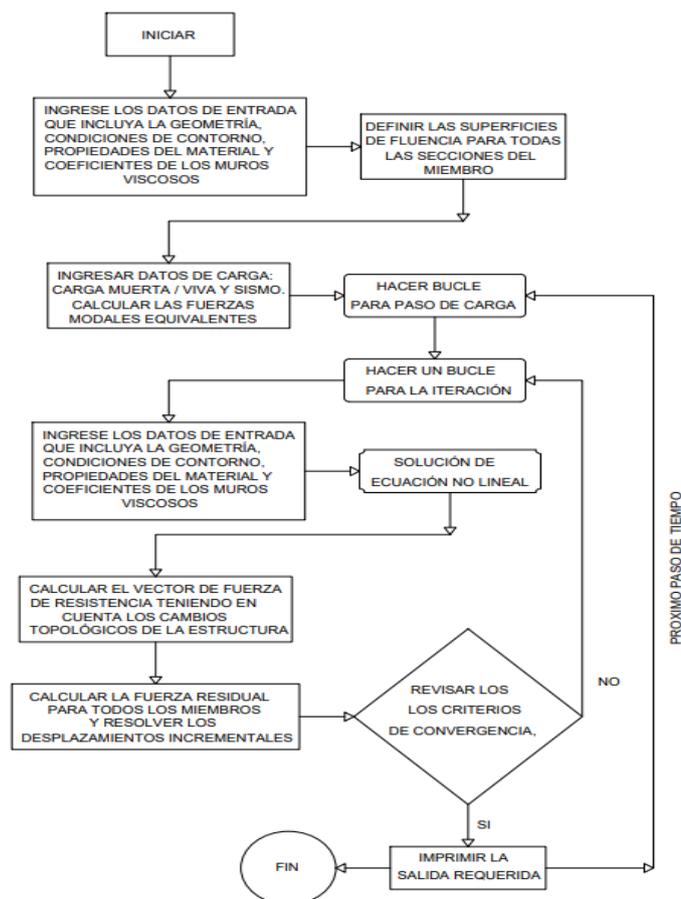


Figura N°36 Diagrama de flujo, código de programa para muros de fluido viscoso.

6.4 FACTORES DE MODIFICACIÓN DE PROPIEDADES (λ)

El desempeño alcanzado con los muros de fluido viscoso se ve afectada por las variaciones en las propiedades dinámicas del amortiguador debido a los siguientes factores:

- Efecto de primer ciclo
- Variación de la temperatura
- Envejecimiento
- Tolerancia de especificación

Para tener en cuenta el rango esperado de la respuesta del edificio debido a estas variaciones, se adoptó un esquema de análisis para las propiedades de los amortiguadores para un límite superior y un límite inferior. Las propiedades nominales del amortiguador determinadas a partir de las pruebas del prototipo se modificaron mediante un factor de modificación de las propiedades del muro viscoso para obtener el límite inferior y el límite superior.

Las demandas basadas en el desplazamiento se controlaban típicamente mediante análisis con las propiedades del amortiguador de límite inferior mientras que las demandas basadas en la fuerza se controlaron mediante el análisis de las propiedades del amortiguador de límite superior.

De acuerdo con los requisitos del Capítulo 18 de ASCE 7, el análisis sísmico se realiza típicamente con propiedades máximas y mínimas para disipadores del tipo viscosos. Estas propiedades se derivan de las propiedades nominales mediante el uso de factores de modificación de propiedades, como se define en las ecuaciones 19 y 20 del ASCE 7.

$$\lambda_{max} = \left[\left(1 + \left(0.75x(\lambda_{(ae,max)} - 1) \right) \right) x \lambda_{(test,max)} x \lambda_{(spec,max)} \right] \geq 1.2 \quad \text{Ec. 19}$$

$$\lambda_{min} = \left[\left(1 + \left(0.75x(\lambda_{(ae,min)} - 1) \right) \right) x \lambda_{(test,min)} x \lambda_{(spec,min)} \right] \leq 0.85 \quad \text{Ec. 20}$$

Donde:

- $\lambda_{(ae, max)}$: Factor máximo de modificación Lambda por efectos ambientales, de envejecimiento y contaminación.
- $\lambda_{(ae, min)}$: Factor mínimo de modificación Lambda por efectos ambientales, de envejecimiento y contaminación.

- $\lambda_{\text{ (test, max)}}$: Factor máximo de modificación lambda por efectos de calentamiento, velocidad, entre otros (durante los ensayos, por ejemplo).
- $\lambda_{\text{ (test, min)}}$: Factor mínimo de modificación lambda por efectos de calentamiento, velocidad, entre otros (durante los ensayos, por ejemplo).
- $\lambda_{\text{ (spec, max)}}$: Factor máximo de modificación lambda por variaciones de manufactura.
- $\lambda_{\text{ (spec, min)}}$: Factor mínimo de modificación lambda por variaciones de manufactura.

De acuerdo con las ecuaciones 19 y 20, las propiedades máximas y mínimas de análisis y diseño para cada dispositivo se determinarán de acuerdo con las ecuaciones 21 y 22 para cada parámetro de modelado de la siguiente manera:

$$\text{Propiedad de diseño máxima} = \text{Propiedad de diseño nominal} \times \lambda_{\text{max}} \quad \text{Ec. 21}$$

$$\text{Propiedad de diseño mínima} = \text{Propiedad de diseño nominal} \times \lambda_{\text{min}} \quad \text{Ec. 22}$$

La Tabla 10 proporciona ejemplos de valores adecuados de los diversos componentes que conforman estos factores de modificación de propiedades.

Tabla 10 Ejemplo de Factores de modificación de propiedades. (Fuente: DIS)

FUENTE DE VARIACIÓN	λ_{max}	λ_{min}
1. Ensayos, incluyendo los efectos del primer ciclo	1.55	1.00
Envejecimiento, λ_a	1.05	0.95
Temperatura ambiente (asumido 68° puede variar) λ_t	1.06	0.90
2. Envejecimiento y temperatura, λ_{ae}	1.08	0.89
3. Especificaciones, todos los MFV, λ_{spec} (usado para análisis de propiedades)	1.10	0.90
Especificaciones, individuales MFV, λ_{spec} (usado para diseño de conexiones)	1.15	0.85
Factores de modificación de propiedades para el análisis	1.84	0.80

Las propiedades máximas de los muros viscosos normalmente darán como resultado fuerzas máximas en toda la estructura y, por lo general, controlarán el diseño de miembros y conexiones. Las propiedades mínimas de los muros viscosos normalmente darán como resultado desplazamientos máximos y controlarán las desviaciones y otras respuestas relacionadas con el desplazamiento.

La Figura N° 37 Muestra un ejemplo de los factores de variación por temperatura y ambiente. El rango de temperatura ambiente real en un proyecto puede variar del rango asumido entre (68 ° F a 74 ° F).

Ecuación de temperatura:

$$C_{(T)} = C(70)e^{-0.027(T-70)} \quad \text{Ec. 23}$$

Donde:

- T está en ° F

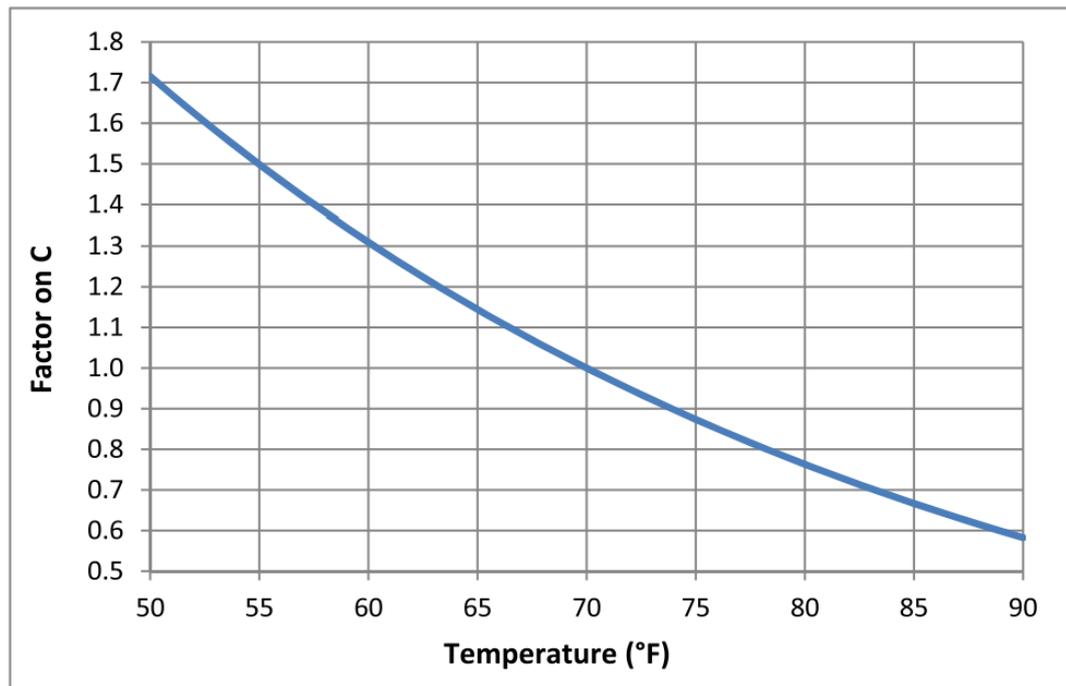


Figura N° 37 Factor de variación por temperatura en muros viscosos. (Fuente: DIS)

CAPÍTULO VII. PROPUESTA DE DISEÑO DE ESTRUCTURAS CON MUROS DE FLUIDO VISCOSO

7.1 DESCRIPCIÓN GENERAL

La propuesta de proyecto para realizar el análisis corresponde a un reforzamiento de un edificio destinado a un uso de una universidad, la estructura a reforzar corresponde a un edificio de 5 niveles y 3 sótanos (ver Figura N° 38 hasta la Figura 40), donde el techo no tiene algún uso particular. El edificio tiene como material estructural, concreto armado, con una resistencia a la compresión de 210 kg/cm^2 . El primer nivel tiene una altura de 3.50 m. y los demás niveles, una altura de 3.50 m., en ambos casos incluyendo el espesor de la losa de cada piso. Las losas de entrepisos en su mayoría son losas aligeradas de 0.30m.

La configuración arquitectónica no permite invadir los espacios de manera que no es factible incrementar la rigidez de la estructura ya sea incrementando las secciones de las vigas, columnas o incorporando muros estructurales debido al poco tiempo de ejecución de obra para realizar dichos trabajos y detener el funcionamiento de la estructura, la arquitectura exige un reforzamiento estructural considerando una adecuada armonía espacial a pesar de la distribución geométrica, la cual está basada en un sistema de pórticos y muros estructurales resistentes a cargas verticales y horizontales en ambas direcciones. Las aberturas en el edificio se han dejado teniendo en cuenta la caja de escaleras y ascensores.

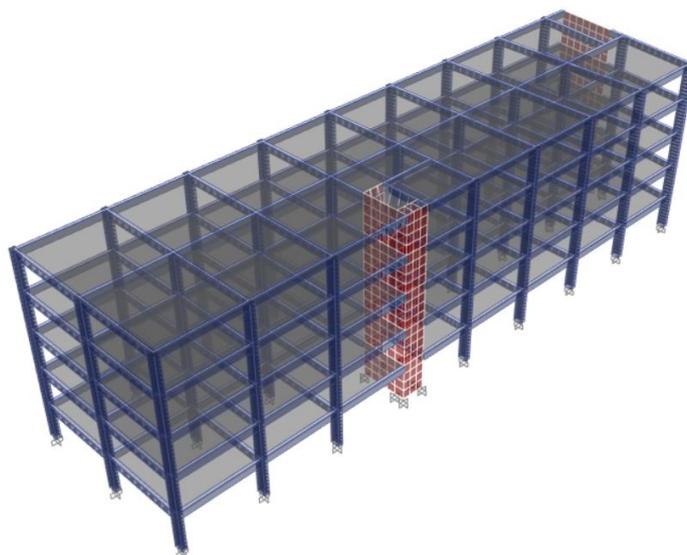


Figura N° 38 Modelo analítico de la estructura.

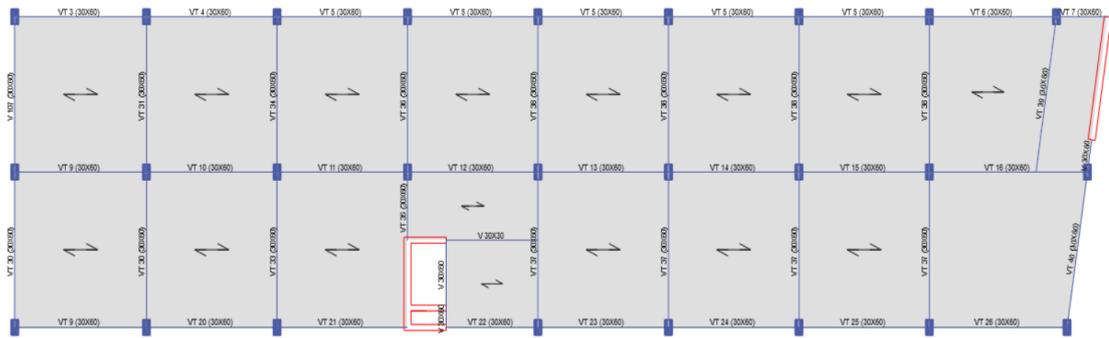


Figura N° 39 Configuración estructural en planta del 1er nivel del edificio.

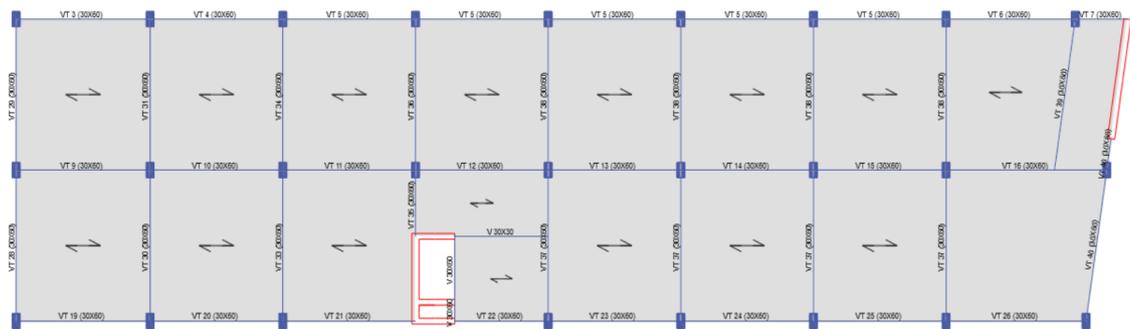


Figura N° 40 Configuración estructural en planta del 2do nivel del edificio.

Propiedades mecánicas de los materiales:

El material utilizado es concreto armado con las siguientes características:

- Resistencia del concreto $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con un
- Módulo de Elasticidad $E_c = 218819.79 \text{ kg/cm}^2$,
- Módulo de Corte $G_c = 91174.91 \text{ kg/cm}^2$ y
- Módulo de Poisson $\mu = 0.2$.

Asignación de cargas:

Según el uso de la edificación, corresponde una carga viva mínima repartida de 250 kgf/m^2 del primer al quinto piso y una carga viva de techo de 100 Kgf/m^2 en la azotea. La carga muerta es de 250 Kg/m^2 en todos los niveles, excepto en la azotea, que tiene una carga muerta de 100 Kg/m^2 .

7.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL SISTEMA SIN REFORZAMIENTO

Para esta parte del análisis estructural se empleará el análisis lineal estático y el dinámico espectral con el objetivo de evaluar los parámetros principales que nos permitirán posteriormente evaluar el sistema empleando los muros de fluido viscoso. La E0.30 – 18 establece que para edificaciones de concreto armado el límite máximo de desplazamiento relativo de entre piso es del 0.7% o 7/1000, estos parámetros nos garantizan un adecuado comportamiento de la estructura ante eventos sísmicos con un comportamiento estructural que garantice la seguridad de vida de personas que emplean la estructura, mediante una adecuada ductilidad y rigidez del sistema estructural.

7.2.1 Análisis estático lineal o fuerzas laterales equivalentes

Se hará uso del análisis lineal estático para determinar los desplazamientos máximos, derivas de entrepiso, fuerzas horizontal distribuida por piso, cortante basal mínima además de ello el Artículo 26, la norma explica los parámetros a tener en cuenta para calcular el peso del edificio para efectos del análisis estático lineal, la cual depende de la categoría del edificio para nuestro modelo de análisis la estructura pertenece a la categoría A, con lo cual se tomará el 100% de la carga permanente y el 50% de la carga viva, como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11 Peso sísmico según la norma E.030 2018. (Fuente: NTE 0.30)

Peso Sísmico	
Carga muerta (tonf)	7467.78
Carga viva (tonf)	1092.73
Peso sísmico (tonf)	8014.14

Parámetros sísmicos

Los parámetros sísmicos de acuerdo con la Norma E.030-2018 son los siguientes:

a) Factor de Zona (Z)

La estructura se encuentra ubicada en Lima siendo esta la zona sísmica 4 de acuerdo con la Tabla N° 1 de la Norma E.030 por lo tanto le corresponde un factor $Z = 0.45$.

b) Factor de amplificación de suelo (S)

De acuerdo con el estudio de Mecánica de suelos la estructura está ubicada sobre un suelo rígido al que le corresponde según la Tabla N° 3 de la norma E.030 un factor $S = 1.00$ y conforme a la Tabla N° 4 un periodo $T_p = 0.4$ seg. y un periodo $T_I = 2.50$ seg.

c) Categoría de la Edificación (U)

La edificación corresponde a una institución educativa y de acuerdo con la Tabla N° 5 de la Norma E.030, la categoría que le corresponde a la estructura es A2; siendo la categoría A2 de edificaciones esenciales por ende el factor de uso es de $U = 1.5$.

d) Coeficiente de reducción de la fuerza sísmica (R)

Para determinar el coeficiente de reducción se hará una evaluación para determinar el porcentaje de participación de los elementos estructurales con respecto a la cortante basal principalmente en las columnas y muros de corte y verificar el sistema estructural de acuerdo con la Norma E0.30, Los resultados son los que se muestran las Tabla 12 y Tabla 13.

Tabla 12 Evaluación del sistema estructural en la dirección X.

Elemento Estructural	Cortante estática (tonf)	% Incidencia Cortante Basal	Sistema Estructural
Columnas de CA	292.02	31.7%	Dual
Muros estructurales	628.75	68.3%	Dual
Total	920.77	100%	$R_o = 7.0$

Tabla 13 Evaluación del sistema estructural en la dirección Y.

Elemento Estructural	Cortante estática (tonf)	% Incidencia Cortante Basal	Sistema Estructural
Columnas de CA	270.43	17.8%	Muros Estructurales
Muros estructurales	1248.23	82.2%	Muros Estructurales
Total	1099.1	100%	$R_o = 6.0$

El sistema estructural predominante en la dirección X es un sistema dual de pórticos y muros estructurales a la que le corresponde un $R_o = 7$, mientras que en la dirección Y el sistema predominante es el de muros estructurales cuyo coeficiente de reducción sísmica es $R_o = 6$ según la Tabla N° 7 de la norma E.030.

e) Irregularidad en altura (I_a)

Mediante el análisis estático se evaluó la irregularidad estructural, no teniendo ninguna irregularidad en altura.

Tabla 14 Verificación de Irregularidad en altura.

Irregularidad en Altura	Factor de Irregularidad Según E0.30	Irregularidad en altura
Irregularidad de Rigidez - piso Blando:	0.75	1.00
Irregularidad de Resistencia - Piso Débil:	0.75	1.00
Irregularidad Extrema de Rigidez:	0.50	1.00
Irregularidad Extrema de Resistencia:	0.50	1.00
Irregularidad de Masa o Peso:	0.90	1.00
Irregularidad Geométrica vertical:	0.90	1.00
Discontinuidad en los sistemas resistentes:	0.80	1.00
Discontinuidad extrema de los sistemas Resistentes:	0.60	1.00
	I_a	1.00

f) Irregularidad en planta (I_p)

El análisis indica una irregularidad en planta, el análisis muestra dos categorías de irregularidad en planta la cuál vamos a mejorar posteriormente, por lo que la estructura califica como irregular como se muestra en los resultados de la Tabla 15.

Tabla 15 Verificación de Irregularidad en planta.

Irregularidad en Planta	Factor de Irregularidad Según E0.30	Irregularidad en planta
Irregularidad Torsional	0.75	0.75
Irregularidad Torsional Extrema	0.60	1.00
Esquinas Entrantes	0.90	1.00
Discontinuidad del Diafragma	0.85	1.00
Sistemas no paralelos	0.90	0.90
	I_p	0.75

g) Coeficiente de reducción de fuerzas sísmicas (R)

De acuerdo artículo 22 de la norma E0.30, una vez evaluada las condiciones de irregularidad de la estructura podemos determinar el coeficiente de reducción sísmica con la siguiente expresión:

$$R = R_0 * I_a * I_p \quad \text{Ec. 24}$$

Tabla 16 Irregularidad estructural.

Coeficiente de reducción		
	X	Y
R ₀	7.00	6.00
I _a	1.00	
I _p	0.75	
R	5.25	4.50
Configuración	IRREGULAR	

h) Factor de Amplificación Sísmica (C)

El factor de amplificación sísmica se puede expresar empleando las siguientes ecuaciones, las cuales están en función del periodo de la estructura:

$$T < T_P \quad C = 2,5$$

$$T_P < T < T_L \quad C = 2,5 \cdot \left(\frac{T_P}{T}\right)$$

$$T > T_L \quad C = 2,5 \cdot \left(\frac{T_P \cdot T_L}{T^2}\right)$$

Donde:

T = Periodo fundamental de vibración de la estructura en la dirección de análisis

- T_x = 0.800; entonces C = 1.25
- T_y = 0.483; entonces C = 2.07

i) Fuerza Cortante en la Base

De acuerdo con el artículo 28.2 de la norma E.030 empleando un análisis estático la cortante basal se puede calcular empleando la siguiente expresión:

$$V = \frac{ZUCS}{R} P \quad \text{Ec. 25}$$

$$V_x = \frac{0.45 * 1.5 * 1.25 * 1.0}{5.25} * 4754.56 = 764.13 \text{ ton}$$

$$V_y = \frac{0.45 * 1.5 * 2.07 * 1.0}{4.50} * 4754.56 = 1477.18 \text{ ton}$$

Tabla 17 Parámetros sísmicos según E0.30 en dirección X e Y.

Parámetro	Descripción	Coefficiente dirección X	Coefficiente dirección Y
Z (g)	Zona sísmica Z4	0.45	0.45
U	Factor de uso	1.50	1.50
S	Factor de suelo	1.00	1.00
T _p (s)		0.40	0.40
T _l (s)		2.50	2.50
R	Coefficiente de reducción	5.25	4.50
T (s)	Periodo	0.800	0.483
C	Factor de amplificación sísmica	1.25	2.07
C/R > 0.11		0.238	0.460
K		1.15	1.00
ZUCS/R		0.161	0.311
P (tonf)	Peso	4754.56	4754.56
V (tonf)	Cortante	764.13	1477.18

7.2.2 Análisis dinámico modal espectral

El análisis dinámico lineal nos permitirá evaluar de una forma más completa el comportamiento sísmico de la estructura. La Norma E.030 en su Artículo N° 29, hace mención de que cualquier estructura puede ser diseñada empleando el análisis dinámico. Para ello se pueden emplear dos métodos siendo uno de ellos el procedimiento de combinación espectral y el segundo el análisis tiempo-historia lineal.

A. Espectro de diseño

Para calcular el espectro de diseño se tendrán en cuenta los parámetros sísmicos descritos en la Tabla 17 en la ecuación 26 para cada dirección de análisis, este espectro es denominado espectro inelástico de pseudo-aceleraciones como se observa en la Figura N° 41 y Figura N° 42 para cada dirección.

$$S_a = \frac{Z.U.C.S}{R} \cdot g \quad \text{Ec. 26}$$

Donde: g: Aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

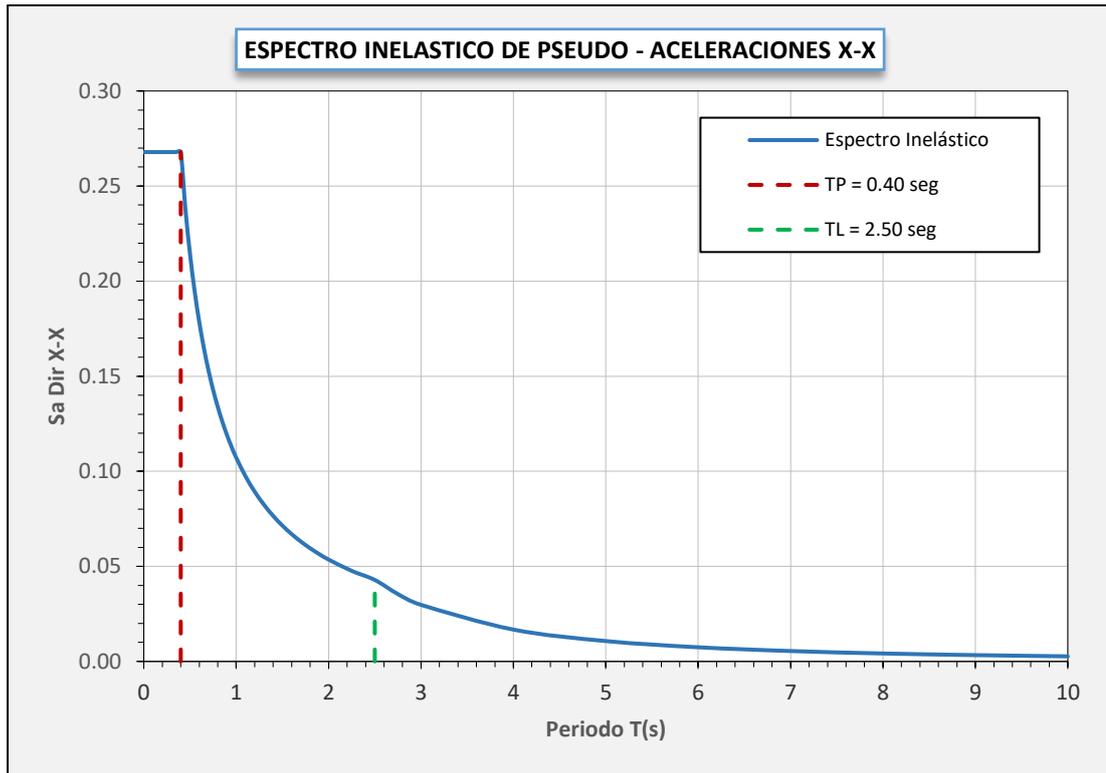


Figura N° 41 Espectro Inelástico de Pseudo-aceleraciones en XX. (Fuente: Propia)

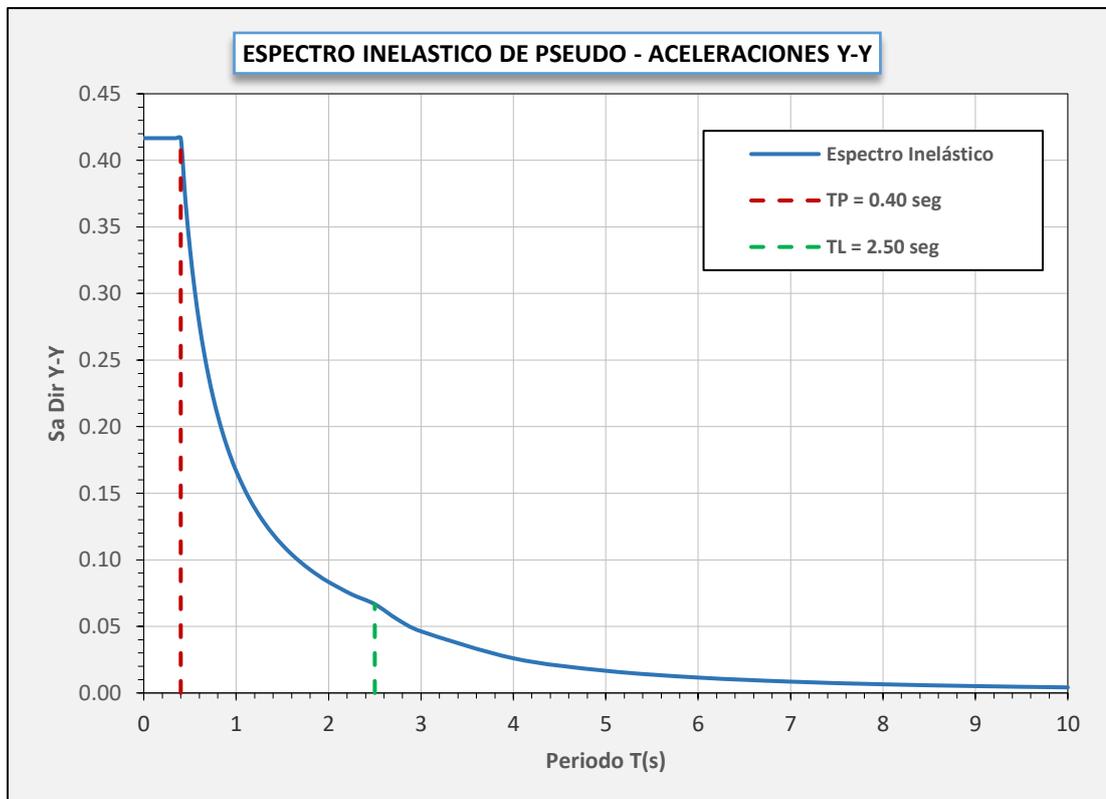


Figura N° 42 Espectro Inelástico de Pseudo-aceleraciones en YY. (Fuente: Propia)

B. Determinación del periodo y modo fundamental de vibración

Para la determinación del periodo y modo fundamental de vibración, se considerará tres grados de libertad por piso, dos grados traslacionales y uno rotacional, todos ellos referidos al centro de gravedad de cada nivel, además se considera diafragma rígido a nivel de cada piso, las masas se asumen concentradas en el centro de masa de cada piso y corresponde a la carga muerta más el 50% de la sobrecarga.

En el análisis dinámico se deben tener en cuenta un número mínimo de modos de vibración de tal manera que la suma de las masas participativas sea mayor o igual que el 90% de la masa de la estructura, además se debe verificar que los 3 primeros modos de vibración sean los principales, ver resultados en la Tabla 18.

Tabla 18 Periodos y porcentajes de participación modal de la estructura.

TABLA: Relación modal de masas participativas								
Caso	Modo	Periodo	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
		sec						
Modal	1	0.800	0.7453	0.0001	75%	0%	0.0132	1%
Modal	2	0.483	0.0041	0.5335	75%	53%	0.2047	22%
Modal	3	0.353	0.0065	0.2022	76%	74%	0.5192	74%
Modal	4	0.219	0.1525	0.0001	91%	74%	0.0019	74%
Modal	5	0.127	0.0009	0.1323	91%	87%	0.0547	79%
Modal	6	0.105	0.0554	0.0006	96%	87%	0.0026	80%
Modal	7	0.087	0.0044	0.0617	97%	93%	0.1337	93%
Modal	8	0.068	0.0213	0.0003	99%	93%	0.0014	93%
Modal	9	0.064	0.0015	0.0322	99%	96%	0.0131	94%
Modal	10	0.053	0.0058	0.0000	100%	96%	0.0002	94%
Modal	11	0.045	0.0003	0.0134	100%	98%	0.0037	95%
Modal	12	0.044	0.0012	0.0143	100%	99%	0.036	98%

De la Tabla 18 se muestran los periodos y modos de vibración de la estructura, de estos resultados podemos resaltar que el modo 1 tiene un periodo de 0.80 seg. en la dirección X y el modo 2 es de 0.48 seg. en la dirección Y, además se puede verificar un comportamiento traslacional en los modos principales de vibración.

C. Fuerza cortante mínima

El sismo dinámico modal espectral se escalará al menos a un 80% del sismo estático (FLE) si es que la estructura es regular; si es irregular, se escalará al menos a un 90% del sismo estático. El factor de amortiguamiento será de un 5%. El factor de excentricidad accidental será de 5%. Las combinaciones de diseño se realizarán según la NTE E.060. Los resultados del análisis estático y dinámico se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19 Factores de escala para el sismo dinámico.

Dirección de análisis	Sistema	Cortante Estática (tonf)	Cortante mínima (tonf)	Cortante Dinámica (tonf)	FE
Sismo X	Irregular	764.13	847.50	625.30	1.10
Sismo Y	Irregular	1477.19	1638.37	946.53	1.40

D. Desplazamientos y derivas de entrepiso

Las derivas de las Tabla 20 y Tabla 21 son calculadas mediante el análisis dinámico lineal; estas derivas se calcularon en el centro de masas de cada diafragma rígido, luego multiplicadas por 0.85R por ser una estructura irregular, los resultados y los límites de deriva de acuerdo con la E0.30 se muestran en las Figura N° 43 y Figura N° 44 .

Tabla 20 Derivas de entrepiso máximas y permisibles en la dirección X.

Derivas en X (1/1000)					
Piso	Caso de carga	Derivas Elásticas	Derivas (0.85*R)	Derivas Permisible	Verificación
Piso 5	SD Max	2.06	9.17	7.00	No Cumple
Piso 4	SD Max	2.45	10.92	7.00	No Cumple
Piso 3	SD Max	2.61	11.66	7.00	No Cumple
Piso 2	SD Max	2.36	10.54	7.00	No Cumple
Piso 1	SD Max	1.29	5.73	7.00	Cumple

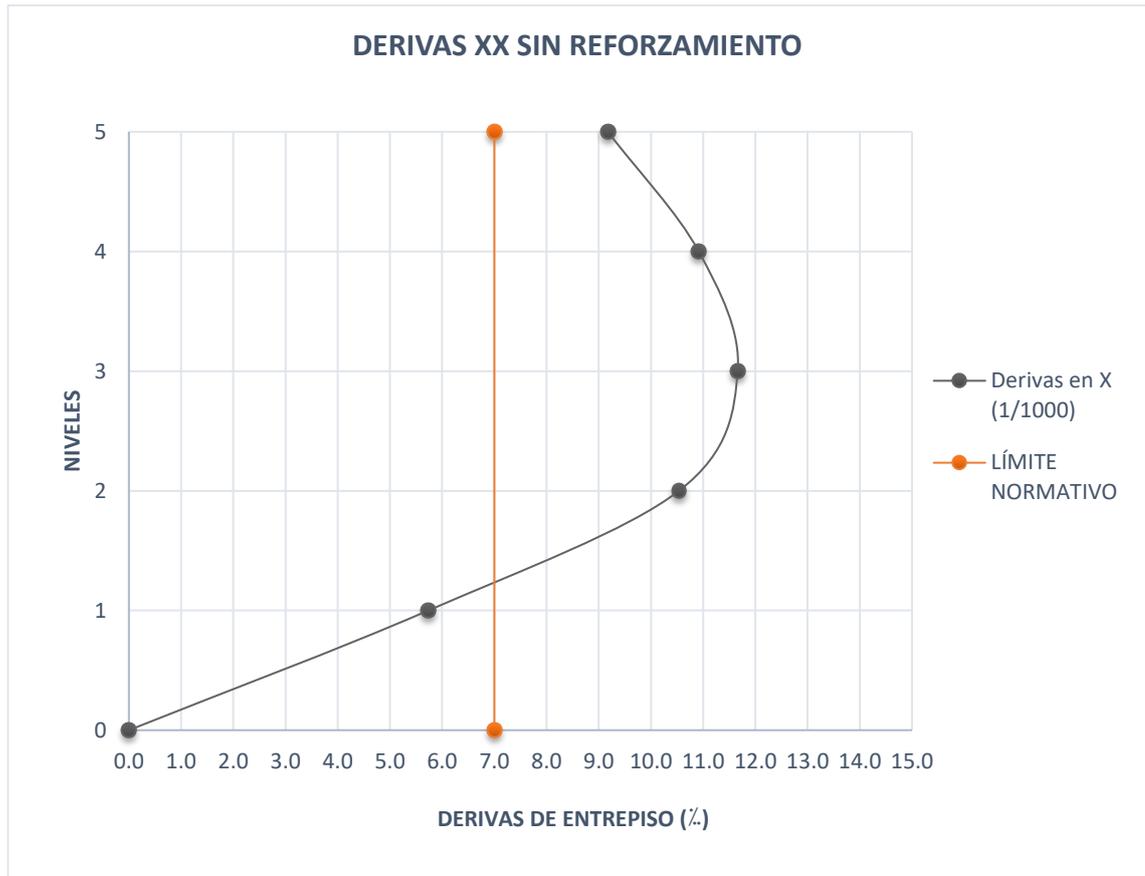


Figura N° 43 Evaluación de derivas en la dirección X.

Tabla 21 Derivas de entrepiso máximas y permisibles en la dirección Y.

Derivas en Y (1/1000)					
Piso	Caso de carga	Derivas Elásticas	Derivas (0.85*R)	Derivas Permisible	Verificación
Piso 5	SD Max	2.70	10.34	7.00	No Cumple
Piso 4	SD Max	3.01	11.50	7.00	No Cumple
Piso 3	SD Max	2.95	11.28	7.00	No Cumple
Piso 2	SD Max	2.52	9.62	7.00	No Cumple
Piso 1	SD Max	1.42	5.42	7.00	Cumple

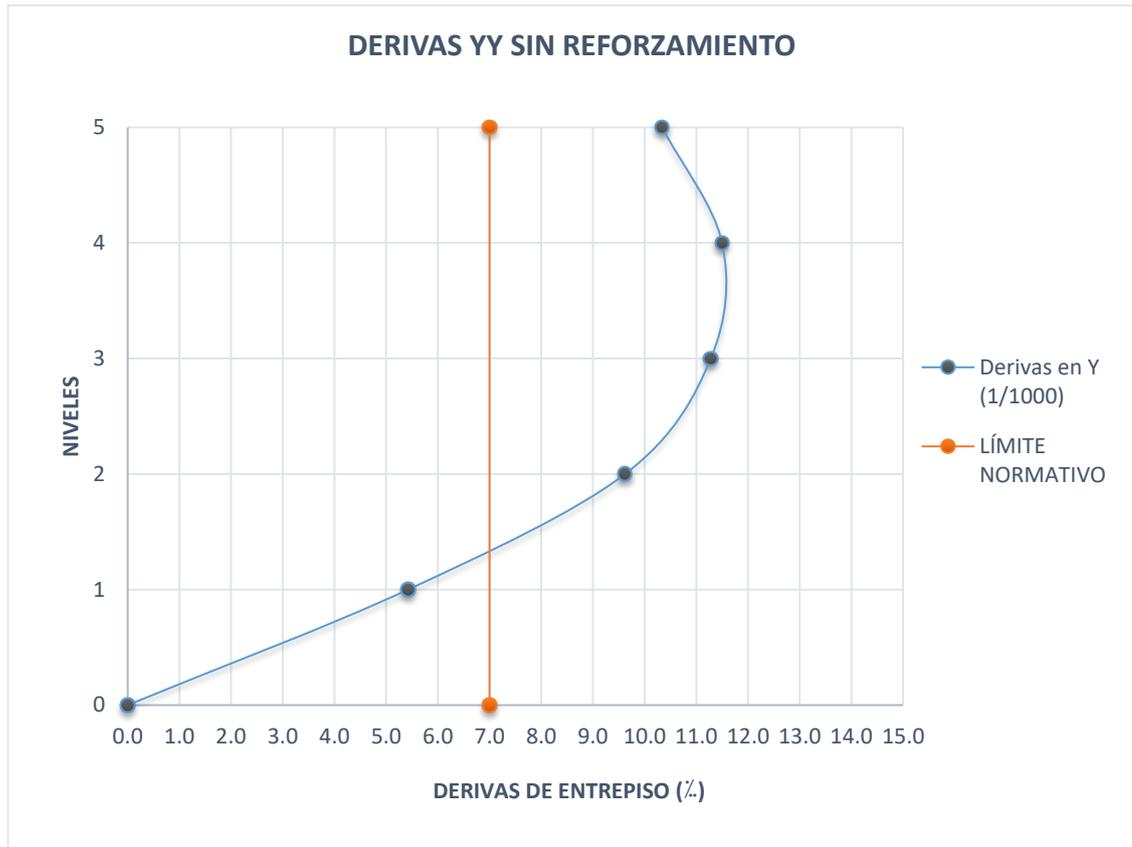


Figura N° 44 Evaluación de derivas en la dirección Y.

E. Evaluación de aceleraciones de piso

A continuación, se muestran los niveles de aceleraciones en la dirección X e Y obtenidos del análisis dinámico lineal con el espectro reducido como se muestra en las Tabla 22 y Tabla 23.

Tabla 22 Aceleraciones de piso en la dirección X.

Tabla: Aceleraciones de piso			
PISO	Caso de carga	UX	UX
		m/seg ²	g
Piso 5	SD X Max	2.20	0.22
Piso 4	SD X Max	1.51	0.15
Piso 3	SD X Max	1.52	0.15
Piso 2	SD X Max	1.50	0.15
Piso 1	SD X Max	1.15	0.12
BASE	SD X Max	0	0.00

Tabla 23 Aceleraciones de piso en la dirección Y.

Tabla: Aceleraciones de piso			
PISO	Caso de carga	UY	UY
		m/sec ²	g
STORY5	SD Y Max	12.26	1.24
STORY4	SD Y Max	8.73	0.89
STORY3	SD Y Max	7.61	0.78
STORY2	SD Y Max	7.13	0.73
STORY1	SD Y Max	4.29	0.44
BASE	SD Y Max	0	0.00

7.3 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA CON REFORZAMIENTO CONVENCIONAL

Debido a las condiciones arquitectónicas del proyecto no es posible intervenir la estructura mediante un reforzamiento convencional con muros estructurales o con un reforzamiento de vigas y columnas para incrementar la rigidez de la estructura, las condiciones arquitectónicas y de funcionalidad limitan el emplear un sistema de reforzamiento convencional, pero por ser un caso de estudio y para poder comparar los resultados se planteará un reforzamiento convencional con muros estructurales para controlar las deformaciones y mejorar el comportamiento de la estructura y a la vez las vigas se reforzaran con fibra de carbono como se muestra en las Figura N° 45 y Figura N° 46.

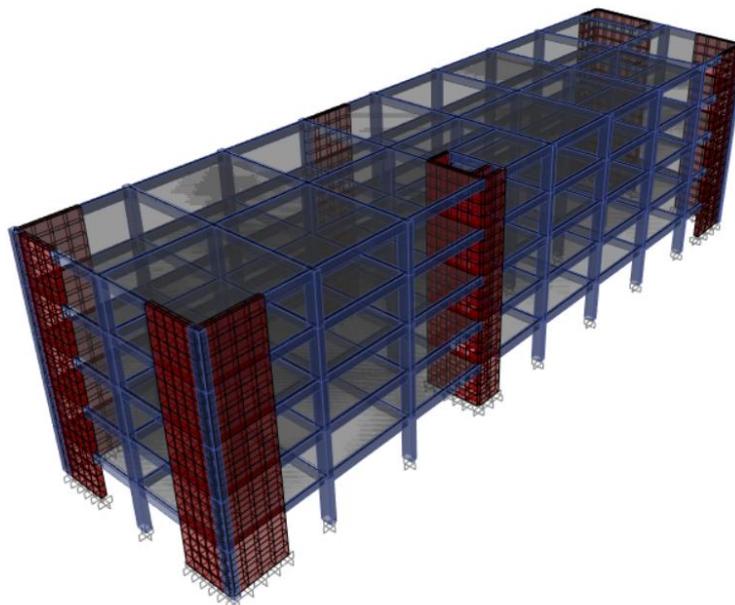


Figura N° 45 Reforzamiento convencional con muros estructurales

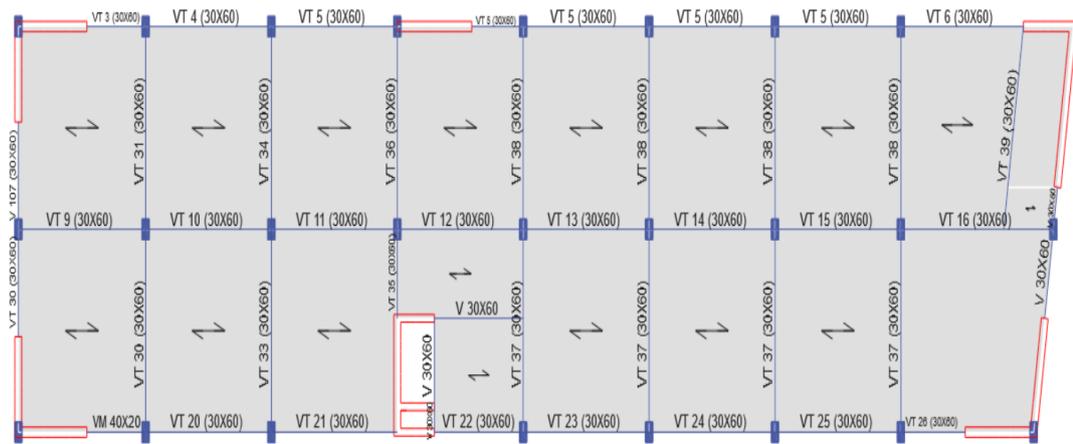


Figura N° 46 Sistema de muros estructurales como reforzamiento convencional

7.3.1 Análisis lineal estático y dinámico con reforzamiento mínimo

Se volverán a evaluar todos los parámetros sísmicos teniendo en cuenta los cambios en la nueva configuración estructural propuesta, en las Tabla 24 y Tabla 25 se presentarán los resultados del análisis estático y dinámico lineal.

A. Nuevos parámetros sísmicos

Tabla 24 Nuevos Parámetros sísmicos en la dirección X e Y.

Parámetros Sísmicos	Descripción	Coefficientes Dirección X	Coefficientes Dirección Y
R	Coefficiente de reducción	6.00	6.00
T (s)	Periodo	0.393	0.322
C	Factor de amplificación sísmica	2.50	2.50
$C/R > 0.11$		0.417	0.417
K		1.00	1.00
ZUCS/R		0.281	0.281
P (tonf)	Peso	5072.77	5072.77
V (tonf)	Cortante	1426.72	1426.72

B. Fuerza de corte estática y dinámica

Tabla 25 Cortante estática, dinámica y factores de escala del Sistema reforzado.

Dirección de análisis	Cortante Estático (tonf)	Condición de Irregularidad	Cortante mínima (tonf)	Cortante Dinámica (tonf)	FE
Dirección X	1426.72	Regular	1141.37	1047.64	1.09
Dirección Y	1426.72	Regular	1141.37	1030.32	1.11

C. Desplazamientos laterales

En las Tabla 26 y Tabla 27 podremos verificar que incorporando un elemento estructural adicional al sistema (reforzamiento convencional con muros de 40 cm) las derivas de entrepiso obtenidas cumplen con los límites establecidos en la norma E030 como se muestra en la Figura N° 47 y en la Figura N° 48.

Tabla 26 Verificación de derivas de entrepiso en la dirección X.

Derivas en X (1/1000)					
Piso	Caso de carga	Derivas Elásticas	Derivas (0.85*R)	Derivas Permisible	Verificación
Piso 5	SD Max	1.08	4.87	7.00	Cumple
Piso 4	SD Max	1.12	5.05	7.00	Cumple
Piso 3	SD Max	1.06	4.77	7.00	Cumple
Piso 2	SD Max	0.85	3.80	7.00	Cumple
Piso 1	SD Max	0.42	1.88	7.00	Cumple

Tabla 27 Verificación de derivas de entrepiso en la dirección Y.

Derivas en Y (1/1000)					
Piso	Caso de carga	Derivas Elásticas	Derivas (0.85*R)	Derivas Permisible	Verificación
Piso 5	SD Max	1.01	4.56	7.00	Cumple
Piso 4	SD Max	1.06	4.76	7.00	Cumple
Piso 3	SD Max	1.00	4.49	7.00	Cumple
Piso 2	SD Max	0.80	3.60	7.00	Cumple
Piso 1	SD Max	0.41	1.85	7.00	Cumple

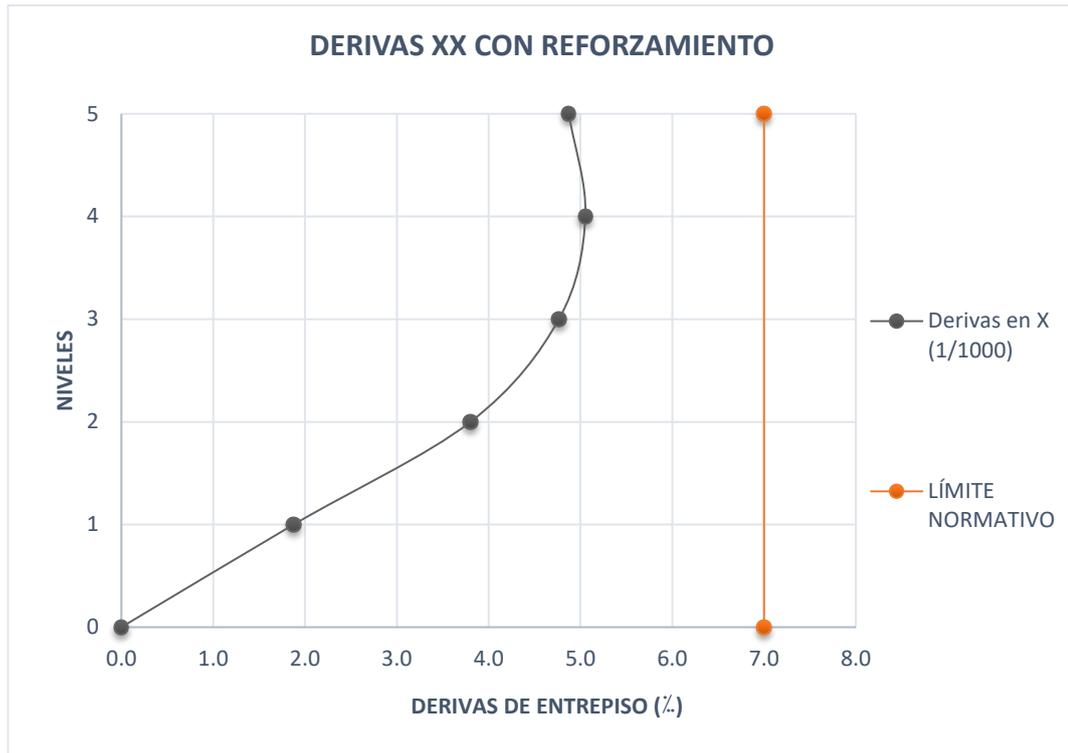


Figura N° 47 Evaluación de derivas en la dirección X



Figura N° 48 Evaluación de derivas en la dirección Y

D. Modos de vibración

En la Tabla 28 muestra la reducción del periodo debido al incremento de la rigidez de la estructura, la variación del periodo con respecto a la estructura original es mínima, hay que tener en cuenta que estos periodos deberán mantenerse al incorporar los muros de fluido viscoso en el análisis.

Tabla 28. Modos de vibración de la estructura con reforzamiento mínimo.

TABLA: Relación modal de masa participativa								
Caso	Modo	Periodo	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
		sec						
Modal	1	0.393	0.7021	0.0123	70%	1%	0.0043	0%
Modal	2	0.322	0.0089	0.6877	71%	70%	0.0293	3%
Modal	3	0.216	0.0073	0.0311	72%	73%	0.6963	73%
Modal	4	0.093	0.1932	0.006	91%	74%	0.0011	73%
Modal	5	0.08	0.0054	0.1903	92%	93%	0.0046	74%
Modal	6	0.055	0.0015	0.003	92%	93%	0.1966	93%
Modal	7	0.044	0.0538	0.0022	97%	93%	0.0001	93%
Modal	8	0.039	0.0023	0.0471	97%	98%	0.0011	93%
Modal	9	0.03	0.0176	0.0012	99%	98%	0.0009	93%
Modal	10	0.027	0.0018	0.0018	99%	98%	0.0415	98%
Modal	11	0.027	0.0007	0.0133	99%	100%	0.0054	98%
Modal	12	0.024	0.0049	0.0003	100%	100%	0.0000	98%

7.4 ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA LINEAL SIN MUROS DE FLUIDO VISCOSO

Para el análisis tiempo historia se hará uso de siete pares de registros sísmicos los cuales deberán contener dos componentes en direcciones ortogonales. A continuación, se mostrarán los registros dentro de los límites de interés para el análisis según la Tabla 29:

- Sismo de Lima 1970
- Sismo de Moquegua 2001
- Sismo de Pisco 2007
- Sismo de Tacopilla 2007
- Sismo de Concepción 2010
- Sismo de Talca 2010
- Sismo de Iquique 2014

Tabla 29 Datos de registros sísmicos empleados. (Fuente CISMID y RENADIC)

Registro	Intervalo de tiempo (s)	N° Datos	Comp.	Aceleración máxima (Gal)	Aceleración máxima (g)
Lima, 1970	0.01	4517	E-W	-104.81	-0.11 g
			N-S	-97.74	-0.10 g
Moquegua, 2001	0.01	19892	E-W	-295.15	-0.30 g
			N-S	219.99	0.22 g
Pisco, 2007	0.01	21807	E-W	-272.82	-0.27 g
			N-S	333.66	0.34 g
Tacopilla, 2007	0.005	24802	E-W	400.24	0.41 g
			N-S	384.55	0.27 g
Concepción, 2010	0.005	28342	E-W	393.21	0.40 g
			N-S	-359.51	-0.37 g
Talca, 2010	0.005	29610	E-W	462.25	0.47 g
			N-S	-213.56	0.22 g
Iquique, 2014	0.005	30001	E-W	309.99	0.32 g
			N-S	198.16	0.20 g

Cada par de registros sísmicos serán escaladas considerando los siguientes niveles de sismo:

Se trabaja con dos niveles de sismo, el sismo de diseño (DBE- Design Basis Earthquake) con un periodo de retorno de 475 años y una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años; y el sismo máximo considerado (MCE – Maximum Credible Earthquake) con un periodo de retorno de 2475 años y una probabilidad de excedencia de 2% en 50 años. La magnitud del sismo máximo es 1.50 veces la magnitud del sismo de diseño como mínimo.

A. Espectro para el sismo de diseño (DBE)

Los parámetros por considerar para evaluar el diseño (Figura N° 49) con este nivel de sismo son los establecido en el análisis dinámico modal espectral. Los parámetros sísmicos son:

- Factor de Zona: $Z=0.45$ (Z4)
- Uso C: $U=1.00$
- Factor de Suelo: $S=1.0$, $T_p=0.40$ s y $T_L=2.50$ s (S1)
- Factor de reducción de fuerza sísmica: $R=1$

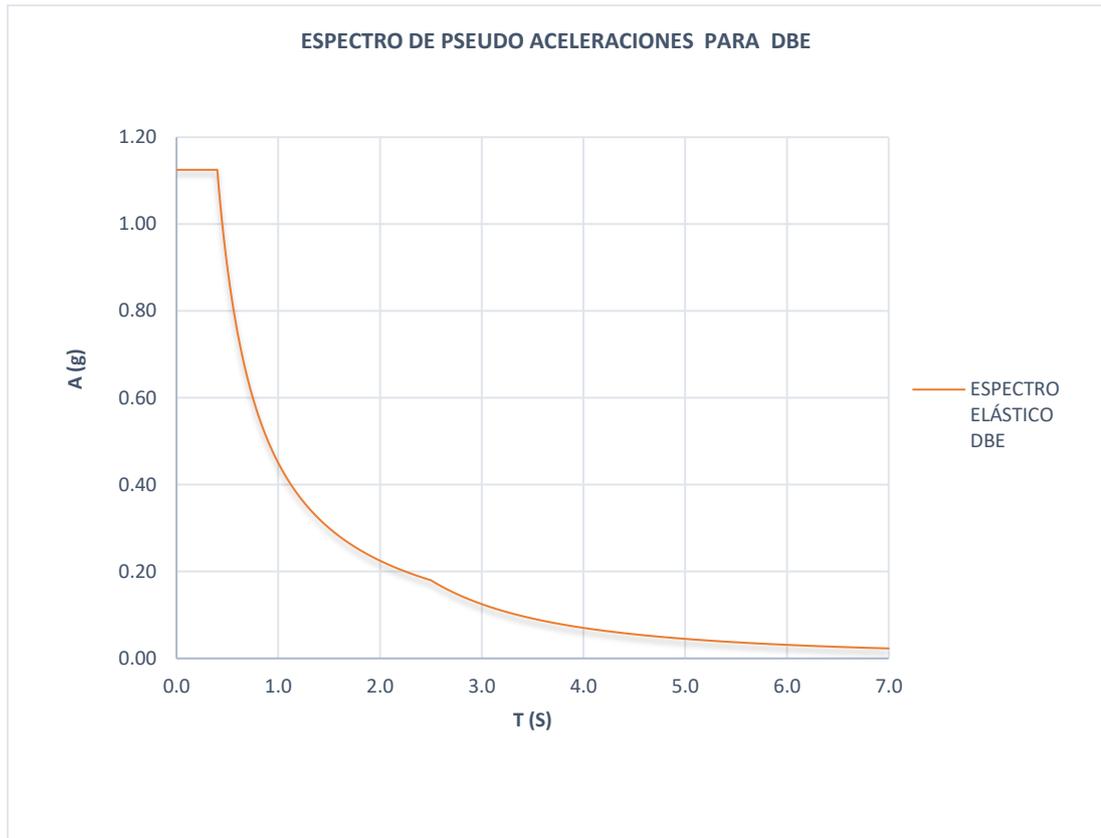


Figura N° 49 Espectro Elástico de Pseudo-aceleraciones a DBE.

B. Espectro para el sismo máximo considerado (MCE)

De acuerdo con la NTP E.030, Diseño Sismorresistente, el factor de uso a emplear para el diseño de una edificación esencial (como es el caso), es de 1.5; en otras palabras, se diseña con sismo máximo MCE. Por esta razón la respuesta de la edificación se evaluará bajo estas condiciones. El espectro a sismo máximo es como se muestra en la Figura N° 50.

Los parámetros sísmicos son:

- Factor de Zona: $Z=0.45$ (Z4)
- Uso C: $U=1.50$
- Factor de Suelo: $S=1.0$, $T_p=0.40$ s y $T_L=2.50$ s (S1)
- Factor de reducción de fuerza sísmica: $R=1$

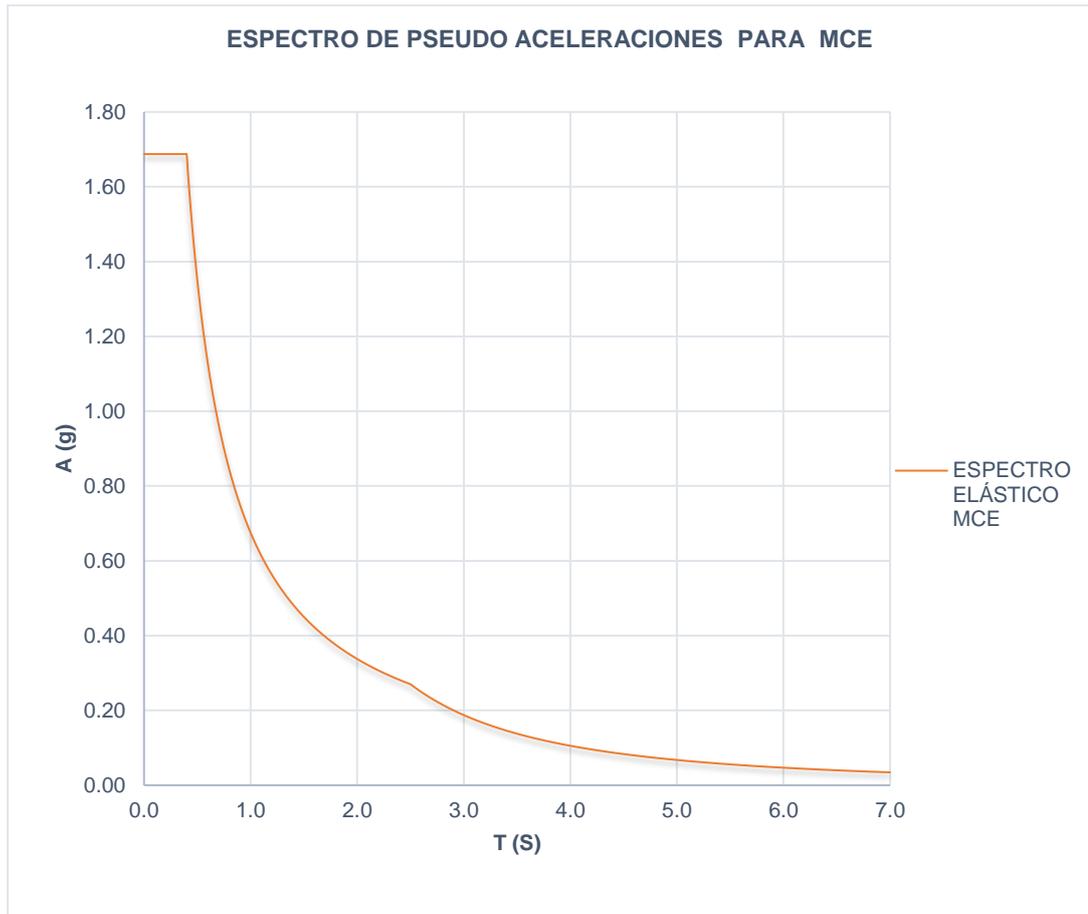


Figura N° 50 Espectro Elástico de Pseudo-aceleraciones a MCE.

C. Derivas de entrepiso

Para un análisis tiempo historia lineal con los registros escalados al sismo máximo y al sismo de diseño, los siguientes niveles de deriva de entrepiso en la dirección X e Y a sismo máximo se muestran en la Tabla 30 y Tabla 31 mientras que los niveles de deriva a sismo de diseño se muestran en la Tabla 32 y Tabla 33, los niveles de deriva en X e Y a sismo máximo se visualizan en la Figura N° 52 y a sismo de diseño en la Figura N° 54

Tabla 30 Derivas en la dirección XX a MCE.

ANÁLISIS TH SIN REFORZAMIENTO - DERIVAS XX								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	DERIVA XX
PISO 5	9.81	11.12	10.90	10.53	12.67	10.15	10.83	10.86
PISO 4	10.76	12.69	12.67	11.93	14.03	11.69	12.31	12.30
PISO 3	11.86	12.94	13.30	12.02	13.07	11.95	12.35	12.50
PISO 2	10.63	11.45	11.73	11.04	11.00	10.29	10.16	10.90
PISO 1	5.87	6.33	6.11	6.34	6.02	5.32	5.13	5.87

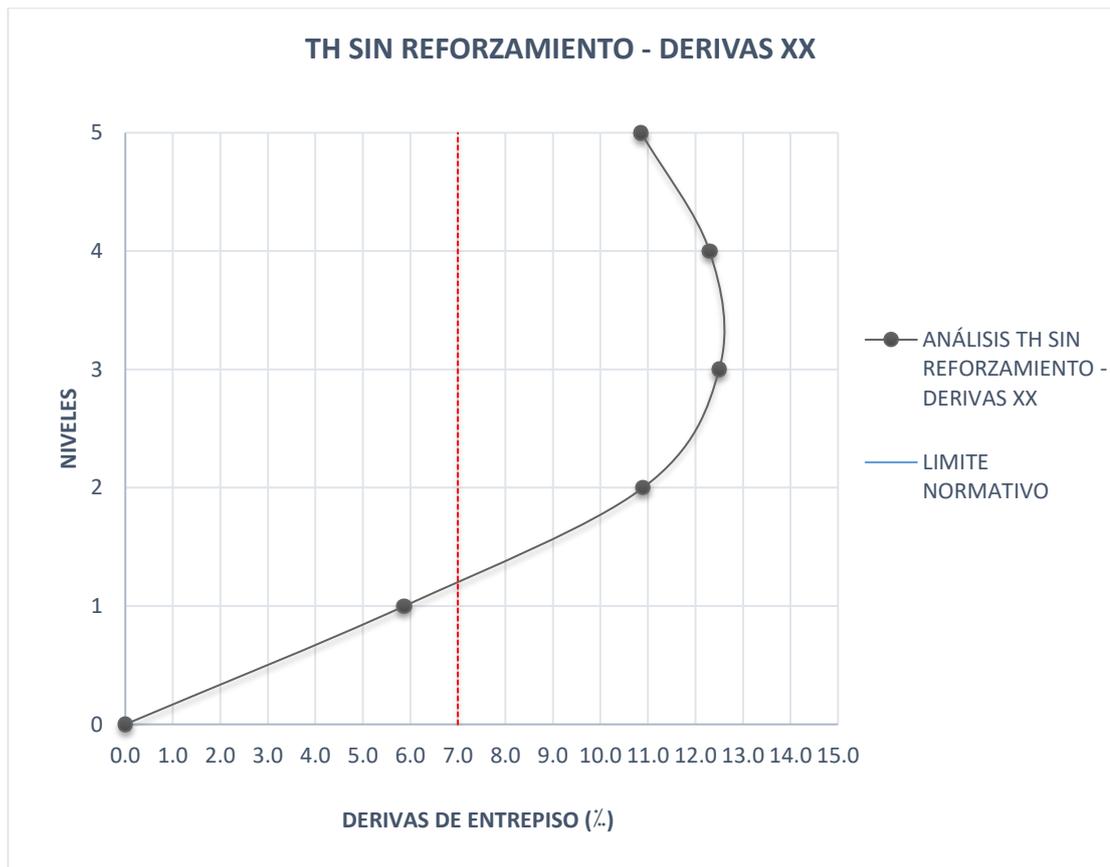


Figura N° 51 Derivas en X mediante un Análisis TH Lineal a MCE

Tabla 31 Derivas en la dirección YY a MCE.

ANÁLISIS TH SIN REFORZAMIENTO - DERIVAS YY								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	DERIVA YY
PISO 5	9.98	10.10	9.45	10.35	10.28	10.15	9.20	9.93
PISO 4	10.90	10.97	10.35	11.26	11.21	11.69	10.01	10.91
PISO 3	10.42	10.45	10.14	10.77	10.63	11.95	9.58	10.56
PISO 2	8.54	8.60	8.65	8.84	8.61	10.29	8.43	8.85
PISO 1	4.61	4.66	4.87	4.79	4.67	5.32	5.04	4.85

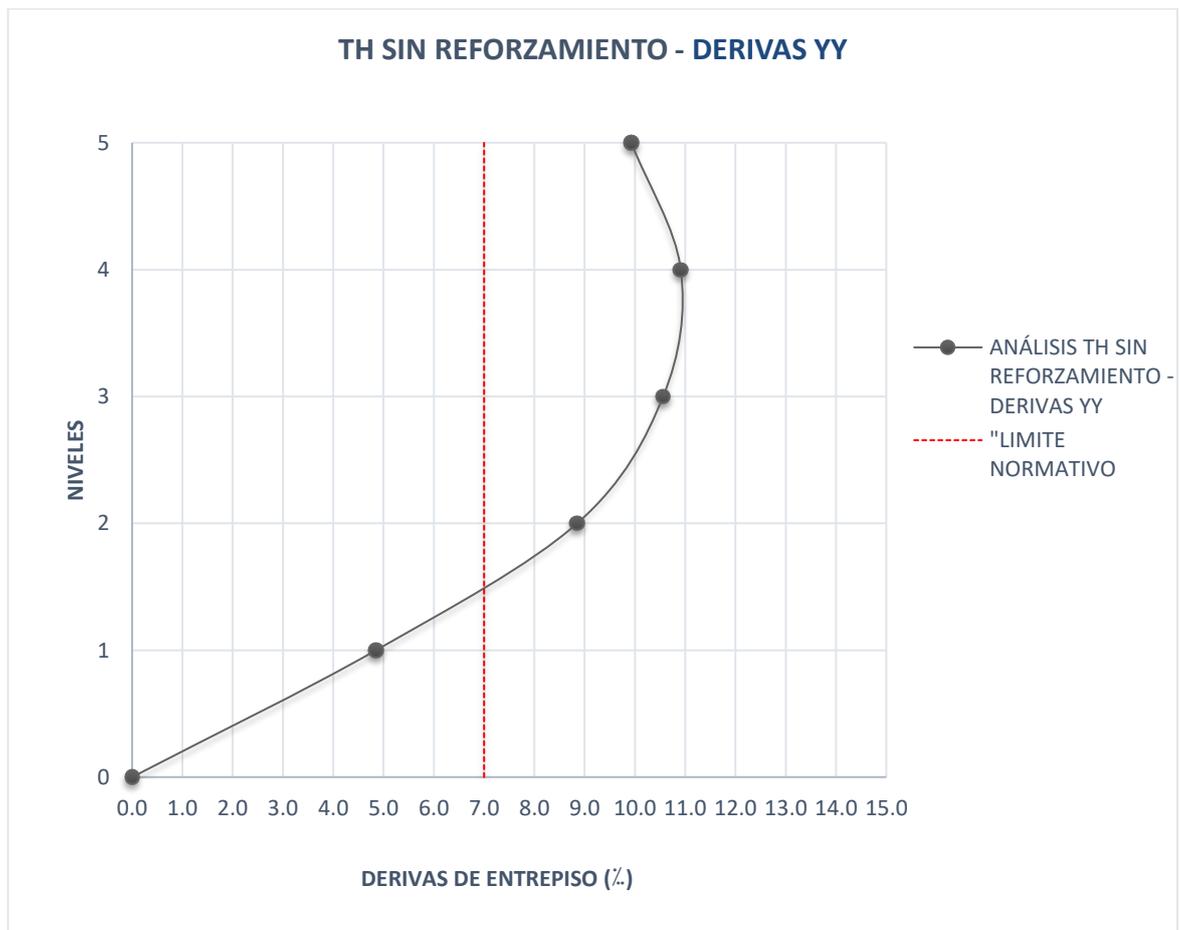


Figura N° 52 Derivas en Y mediante un Análisis TH Lineal a MCE.

Tabla 32 Derivas en la dirección XX a MCE.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO CONVENCIONAL - DERIVAS XX								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	DERIVA XX
PISO 5	6.85	6.35	6.98	6.35	6.10	5.51	6.38	6.36
PISO 4	6.99	6.55	7.15	6.58	6.35	5.71	6.59	6.56
PISO 3	6.40	6.09	6.53	6.19	6.05	5.38	6.14	6.11
PISO 2	4.93	4.87	4.97	4.93	4.89	4.29	4.80	4.81
PISO 1	2.53	2.40	2.42	2.42	2.44	2.11	2.34	2.38

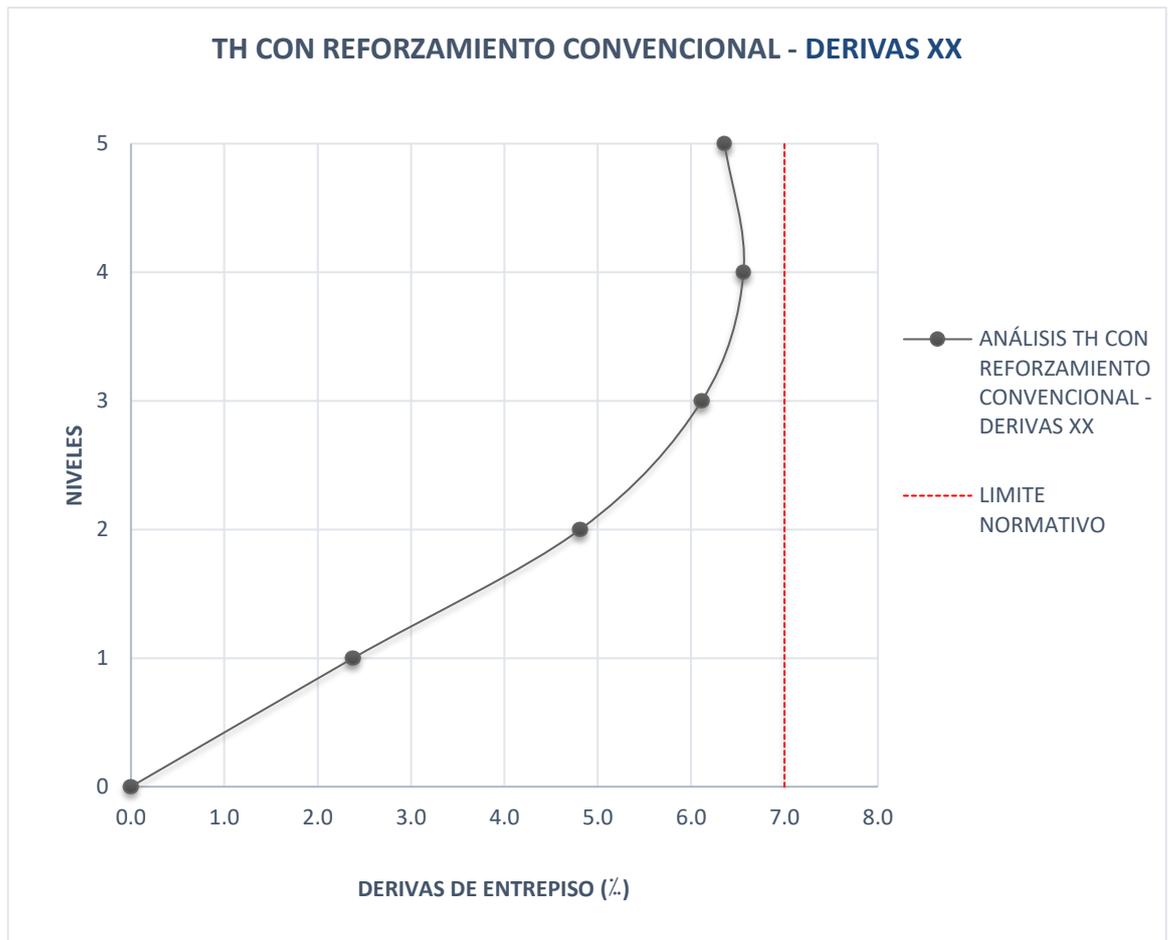


Figura N° 53 Derivas en X mediante un análisis TH Lineal a MCE

Tabla 33 Derivas en la dirección YY a MCE.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO CONVENCIONAL - DERIVAS YY								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	DERIVA YY
PISO 5	4.39	5.03	4.00	5.44	5.39	5.06	5.36	4.95
PISO 4	4.51	5.28	4.19	5.69	5.64	5.28	5.56	5.16
PISO 3	4.20	5.07	4.02	5.41	5.38	4.97	5.17	4.89
PISO 2	3.56	4.17	3.28	4.36	4.37	3.96	4.12	3.97
PISO 1	1.94	2.20	1.70	2.31	2.27	2.06	2.11	2.08

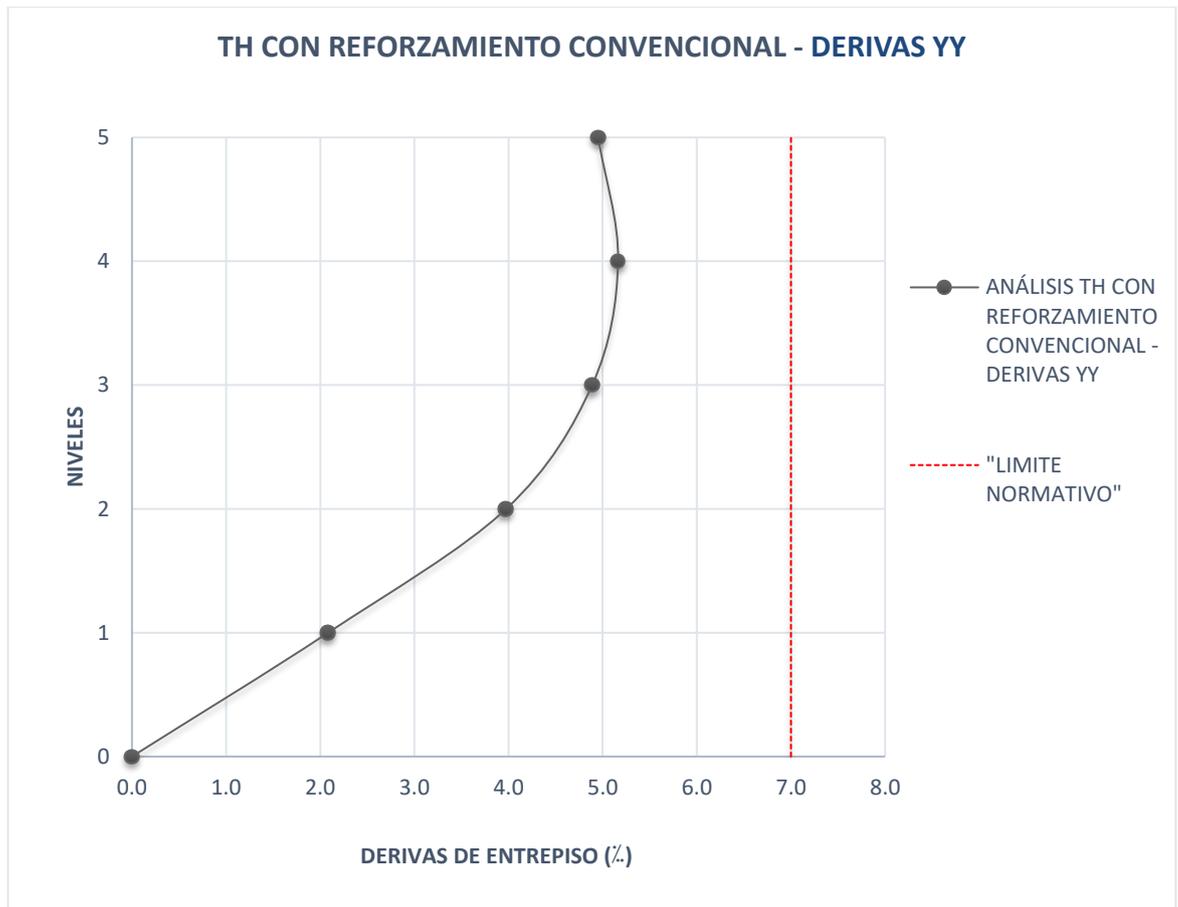


Figura N° 54 Derivas en Y mediante un análisis TH Lineal a MCE.

A. Aceleraciones de piso

Para un análisis tiempo historia lineal con los registros escalados al sismo máximo y al sismo de diseño obtenemos los siguientes niveles de aceleraciones de piso para sismo máximo (ver Figura N° 55) y a sismo de diseño (ver Figura N° 57) como se muestran en las Tabla 34 y Tabla 35 para un sismo máximo y en las Tabla 36 y Tabla 37 a sismo de diseño.

Tabla 34 Aceleraciones de piso a tiempo historia lineal en la dirección XX a MCE.

ANÁLISIS TH SIN REFORZAMIENTO - ACC XX (g)								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	ACC (g) XX
PISO 5	1.38	1.30	1.37	1.44	1.64	1.57	1.51	1.46
PISO 4	1.03	0.94	1.09	0.94	1.01	1.02	1.04	1.01
PISO 3	0.99	0.92	0.80	1.10	1.12	1.03	0.89	0.98
PISO 2	0.99	0.82	0.97	0.99	1.04	0.80	1.03	0.95
PISO 1	0.99	0.61	0.75	0.85	0.82	0.65	0.90	0.79
BASE	0.99	0.58	0.62	0.53	0.59	0.65	0.79	0.68

Tabla 35 Aceleraciones de piso a tiempo historia lineal en la dirección YY a MCE.

ANÁLISIS TH SIN REFORZAMIENTO – ACC YY (g)								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	ACC (g) YY
PISO 5	3.91	2.87	3.58	3.23	3.07	3.15	2.74	3.22
PISO 4	2.31	2.21	2.23	2.38	2.11	2.09	2.21	2.22
PISO 3	1.83	1.58	2.00	1.78	1.71	1.87	1.91	1.81
PISO 2	1.74	1.15	1.71	1.39	1.48	1.53	1.71	1.53
PISO 1	1.21	0.96	0.87	0.91	0.93	1.09	1.21	1.02
BASE	0.99	0.58	0.62	0.53	0.59	0.65	0.79	0.68

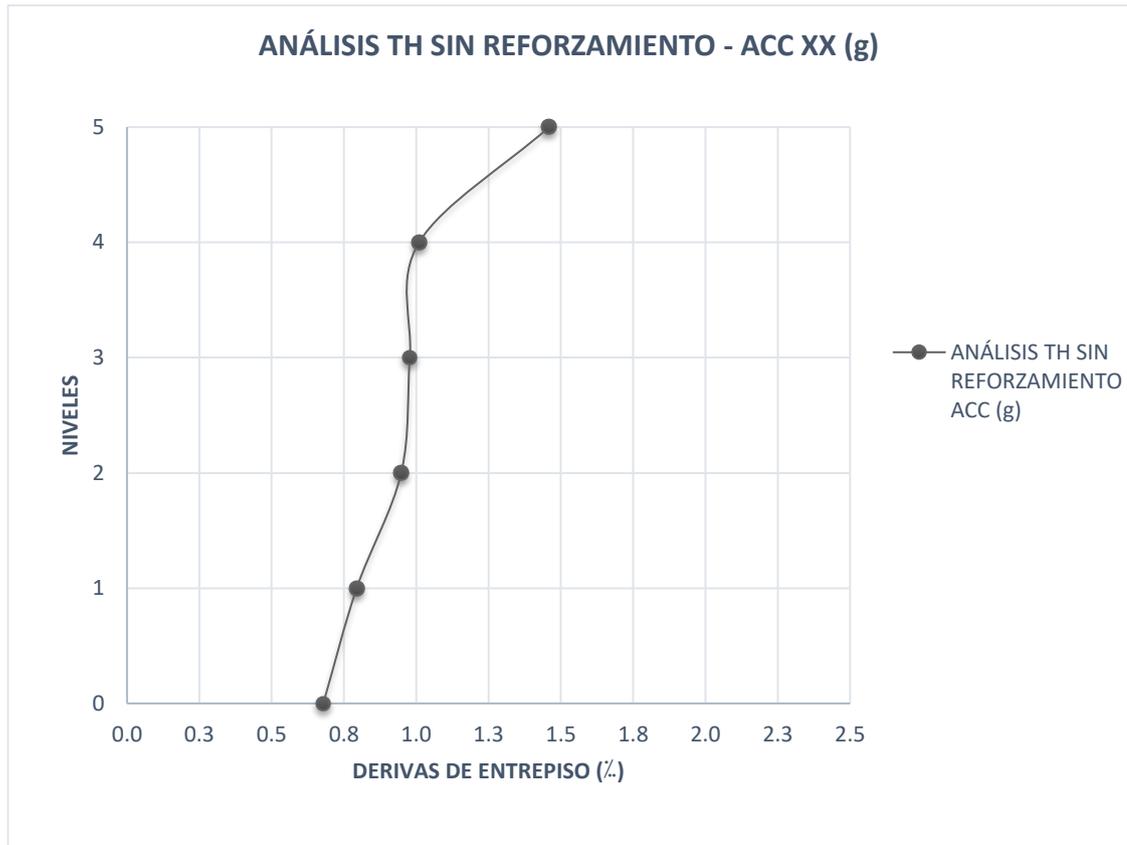


Figura N° 55 Aceleraciones en X, Análisis TH Lineal a MCE sin reforzamiento

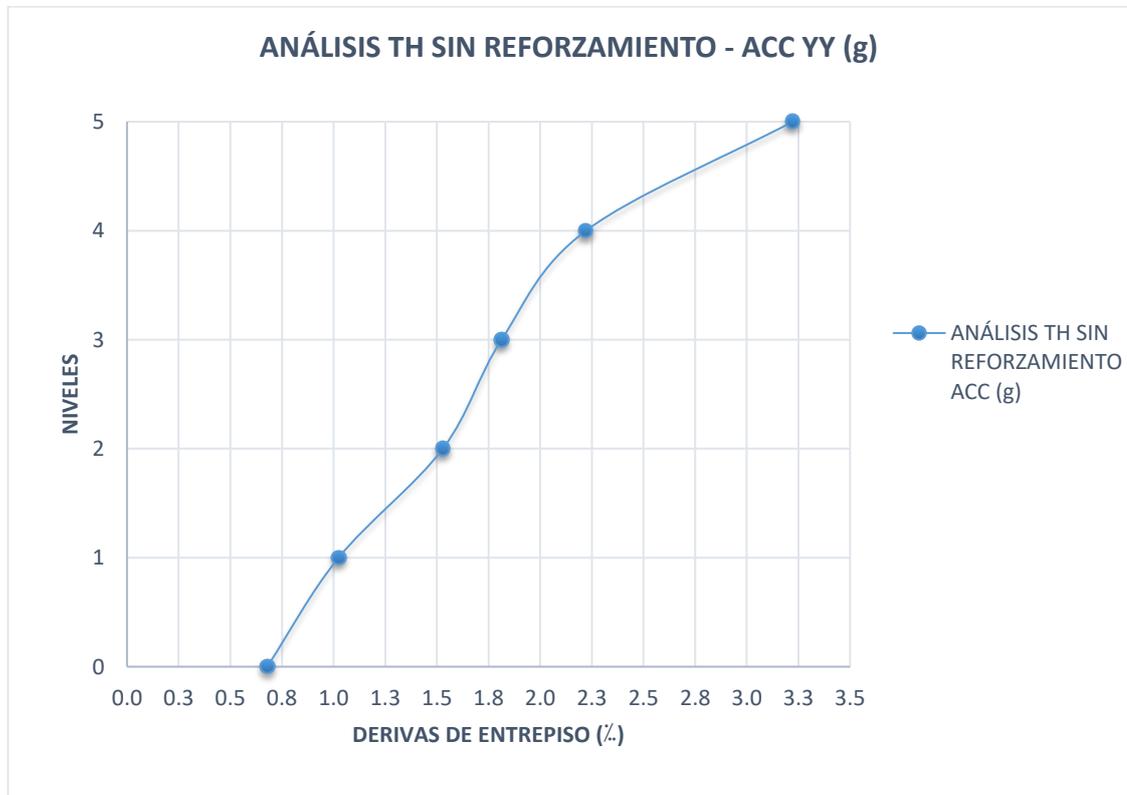


Figura N° 56 Aceleraciones en Y, Análisis TH Lineal a MCE sin reforzamiento

Tabla 36 Aceleraciones de piso en la dirección XX a MCE.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO CONVENCIONAL - ACC XX (g)								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	ACC (g)
PISO 5	2.64	2.41	3.18	2.32	2.49	2.51	2.58	2.59
PISO 4	1.85	1.81	1.94	1.61	1.85	1.80	1.78	1.80
PISO 3	1.59	1.26	1.66	1.30	1.25	1.23	1.62	1.41
PISO 2	1.33	0.80	1.49	0.95	0.94	0.84	1.25	1.09
PISO 1	1.11	0.79	1.00	0.66	0.86	0.72	1.07	0.89
BASE	1.10	0.65	0.80	0.59	0.66	0.72	0.88	0.77

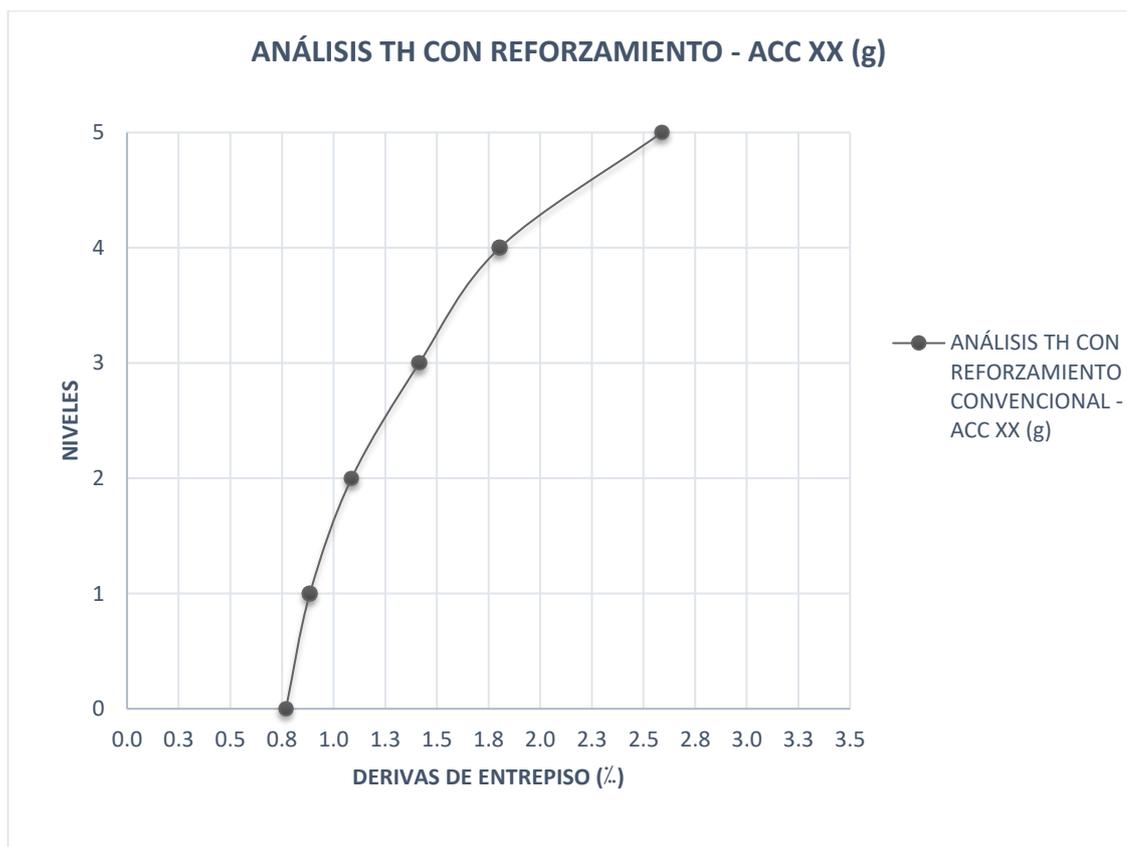


Figura N° 57 Aceleraciones en X, Análisis TH Lineal a MCE con reforzamiento

Tabla 37 Aceleraciones de piso en la dirección YY a MCE.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO CONVENCIONAL - ACC YY (g)								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	ACC (g)
PISO 5	3.32	3.31	3.03	3.11	3.14	3.15	3.43	3.21
PISO 4	2.45	2.19	1.98	2.40	2.38	2.35	2.25	2.29
PISO 3	2.43	1.75	1.74	1.87	1.73	1.60	1.86	1.85
PISO 2	1.71	1.37	1.42	1.39	1.26	1.27	1.71	1.45
PISO 1	0.83	0.93	0.90	0.93	0.90	0.94	1.17	0.94
BASE	0.79	0.67	0.86	0.71	0.66	0.55	0.80	0.72

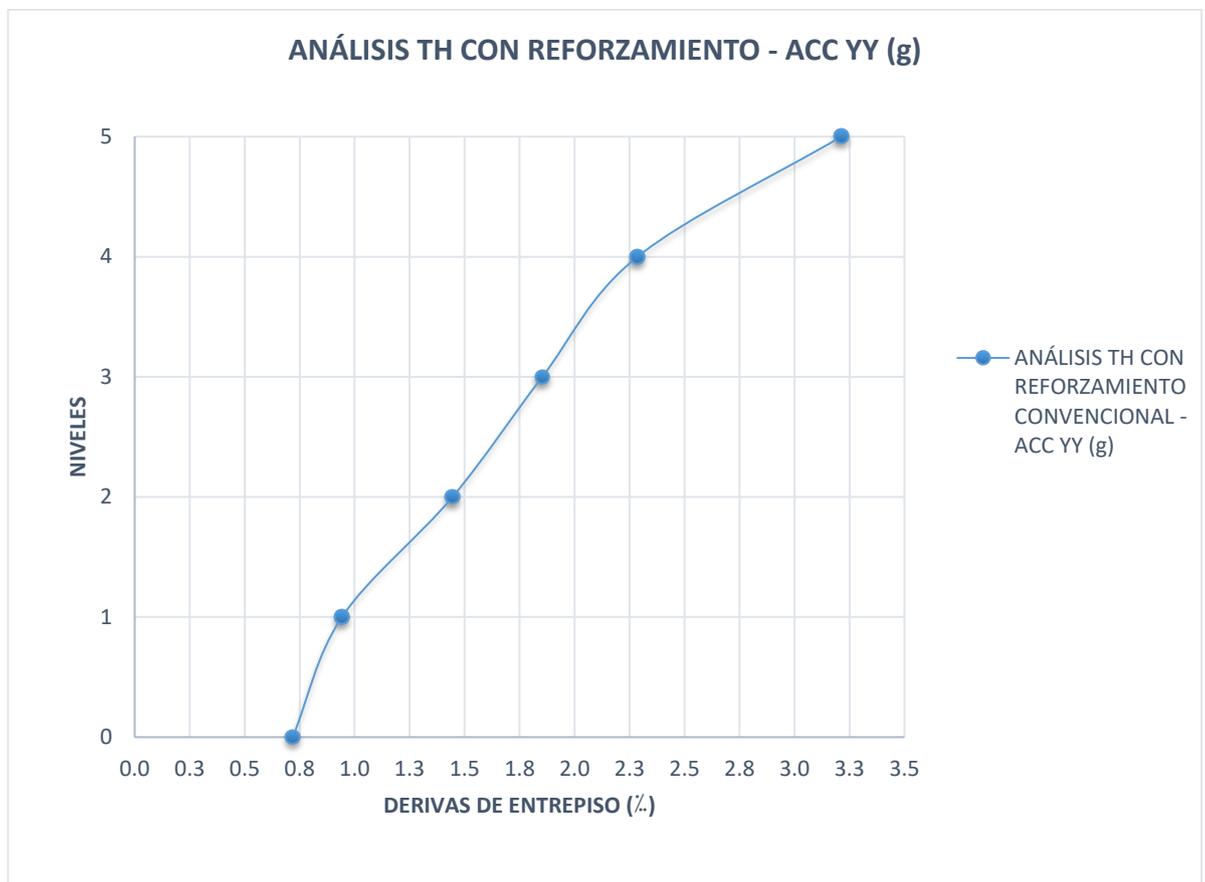


Figura N° 58 Aceleraciones en Y, Análisis TH Lineal a MCE con reforzamiento

7.5 ANÁLISIS Y DISEÑO CON MUROS DE FLUIDO VISCOSO

Para realizar el análisis de la estructura con Muros de Fluido viscoso, lo realizaremos según el procedimiento mencionado en capítulos anteriores. La masa de los dispositivos será despreciada. Como se mostró en la sección anterior, las derivas de entrepiso no cumplen con el límite permitido, además presenta niveles de aceleraciones de piso elevadas, por lo que estos serán los parámetros que controlar de la respuesta sísmica de la estructura.

7.5.1 Cálculo de propiedades

Los desplazamientos relativos de entrepiso que se han obtenido son bastante elevados. De acuerdo con la deriva objetiva (que se quiere alcanzar) se establecerá el amortiguamiento requerido por el sistema de disipación.

Se establece una deriva objetiva y de acuerdo con ello establecemos el factor de reducción:

$$B = \frac{D_{m\acute{a}x}}{D_{objetivo}} = \frac{11.7}{6.50}$$

$$B=1.80$$

El amortiguamiento efectivo se definirá de la siguiente manera:

$$B = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_0)}{2.31 - 0.41 \ln(\beta_{eff})}$$

$$\beta_{eff} = e^{\left(\frac{2.31}{0.41} - \frac{2.31 - 0.41 \ln(\beta_0)}{0.41 B}\right)}$$

Donde:

- β_0 es el amortiguamiento inherente de la estructura

Para estructuras de concreto armado se estima un valor de 5, mientras que para estructuras de acero el amortiguamiento inherente puede llegar hasta 7%. Dado que se tiene una estructura mixta estimaremos el amortiguamiento inherente de la estructura mediante un cálculo simple para ello crearemos un caso de carga tiempo historia no lineal "pulso" como se muestra en la Figura N° 59.

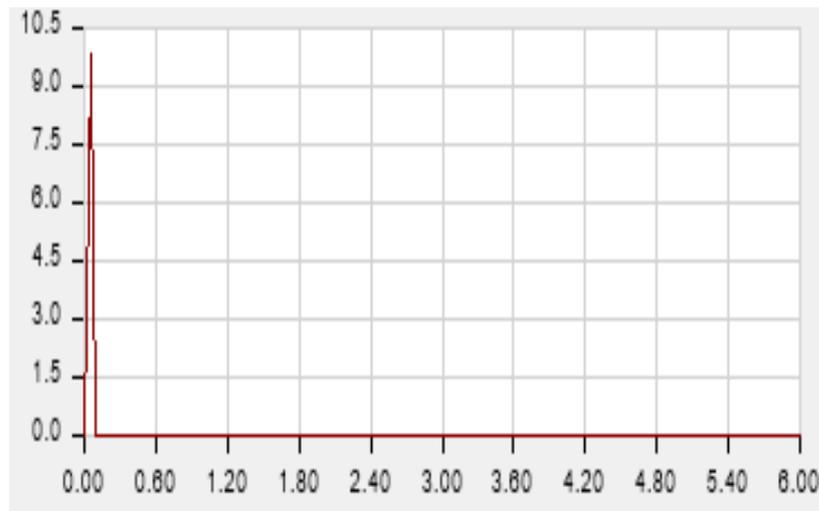


Figura N° 59 Función Pulso para ambas direcciones.

Escogemos un punto al azar en la estructura y evaluamos su desplazamiento en función del tiempo como se muestra en la Figura N° 60.

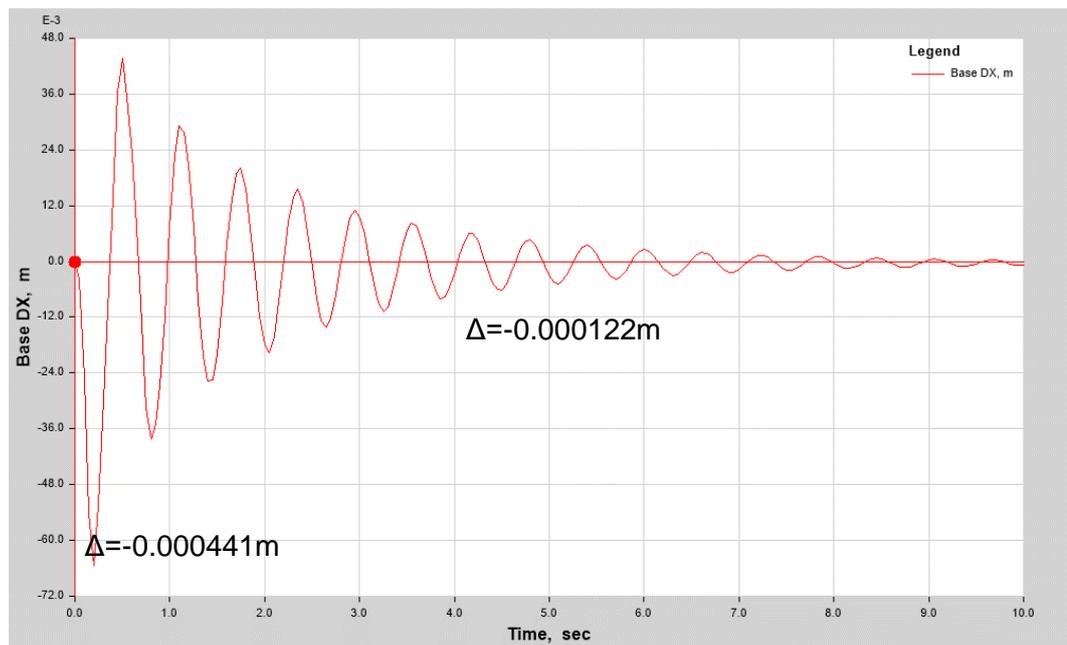


Figura N° 60 Δ vs t para los casos de pulso en cada dirección.

Determinamos el amortiguamiento inherente teniendo en cuenta la siguiente fórmula para vibración libre:

$$\frac{\ln\left(\frac{\Delta_i}{\Delta_{i+r}}\right)}{r} = \frac{2\pi\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

Donde Δ_i y Δ_{i+r} son los desplazamientos de un punto determinado de la estructura, inicial y luego de "r" ciclos respectivamente. Estimamos el amortiguamiento inherente en cada dirección obteniendo:

$$\frac{\text{Ln} \left(\frac{-0.000441}{-0.000122} \right)}{8} = \frac{2\pi\beta}{\sqrt{1-\beta^2}}$$

$$\beta_{xx \text{ inherente}} \approx 5.20\%$$

Tomamos entonces como valor de amortiguamiento inherente de la estructura el menor valor encontrado: 5.20%

Entonces el amortiguamiento efectivo será de:

$$\beta_{eff} = e^{\left(\frac{2.31}{0.41} - \frac{2.31 - 0.41 \text{Ln}(5.20)}{0.41 * 1.80} \right)}$$

$$\beta_{eff} = 30.57\%$$

El amortiguamiento requerido será de:

$$B_H = \beta_{eff} - \beta_0$$

$$B_H = 30.57 - 5.20$$

$$B_H = 25.37\%$$

Se tomará un valor de amortiguamiento de diseño de 25%, ya que no es recomendable incorporar amortiguamientos mayores que el 40% del crítico.

El peso sísmico estimado de la edificación (considerando el 50% de la carga viva actuante) es de 9900 ton aproximadamente, entonces:

$$M=484.83 \text{ tonf-s}^2/\text{m}$$

Por otro lado, se tiene un periodo fundamental de:

$$T=0.80 \text{ seg.}$$

La frecuencia será:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{0.80} = 7.85 \text{ hertz}$$

El amortiguamiento crítico será de:

$$C_c = 2\omega M = 2 * 7.85 * 484.83$$

$$C_c = 7615.09 \text{ ton} - \text{s/m}$$

Dado que la razón de amortiguamiento a incorporar en la estructura es del 25%, se tiene:

$$\beta = \frac{C}{C_c}$$

$$C = \beta C_c = 0.25 * 7912.43 = 2769.35 \text{ ton} - \text{s/m}$$

Ver Anexo 1.

7.5.2 Ubicación de los muros de fluido viscoso.

De acuerdo con el análisis los pórticos extremos de la estructura presentan las mayores deformaciones relativas de entrepiso (derivas) en la dirección X e Y así mismo en los puntos extremos se evalúan las mayores velocidades, de acuerdo con el análisis lineal en ambas direcciones se necesita reducir las derivas de entrepiso para cumplir con los requerimientos mínimos de la norma. Teniendo en cuenta la arquitectura del proyecto los muros de fluido viscoso reemplazarán los posibles muros estructurales necesarios para controlar las deformaciones de los pórticos. A continuación, se muestran la ubicación y disposición de los muros viscosos obtenidos del programa ETABS (ver desde la Figura N° 61 hasta la Figura N° 65).

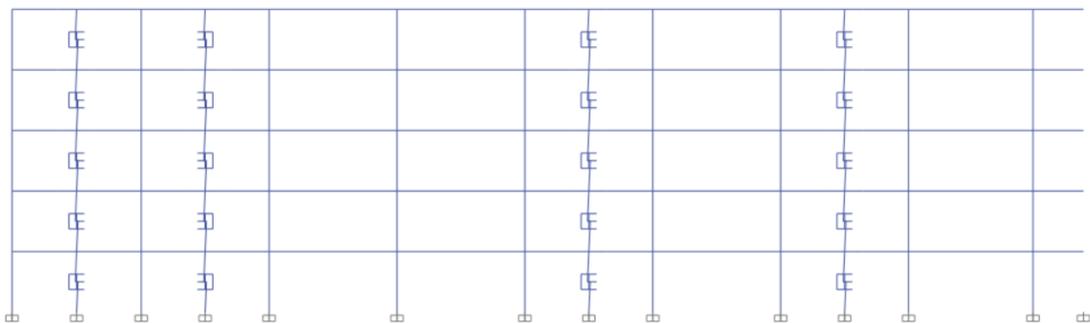


Figura N° 61 Disposición de muros viscosos en la dirección X, pórtico 2.

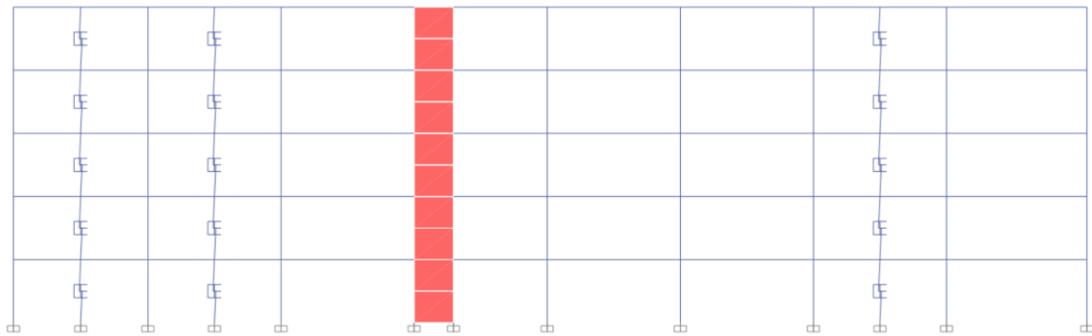


Figura N° 62 Disposición de muros viscosos en la dirección X, pórtico 6.

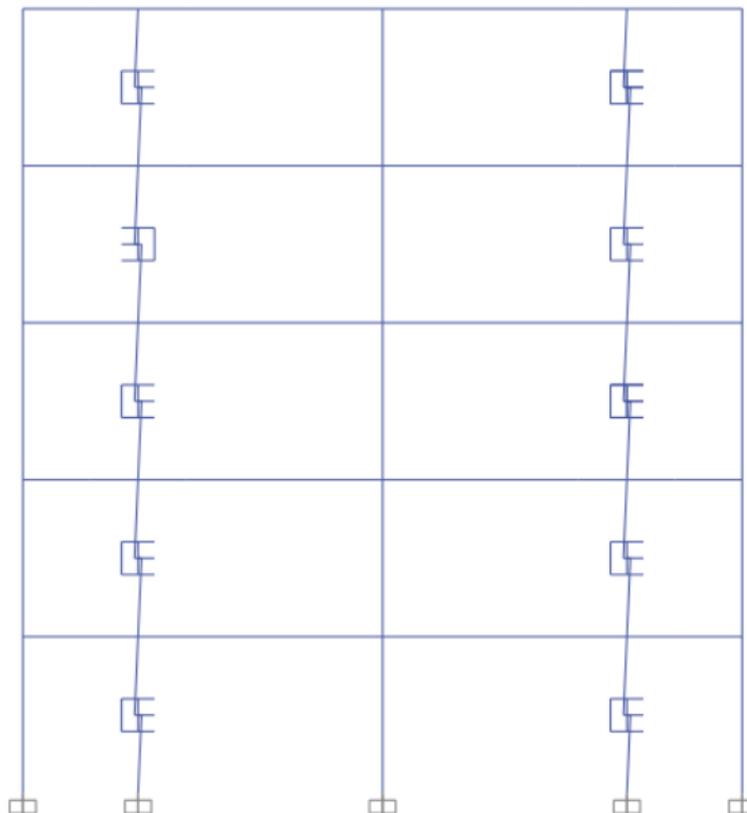


Figura N° 63 Disposición de muros viscosos en la dirección Y, pórtico F.

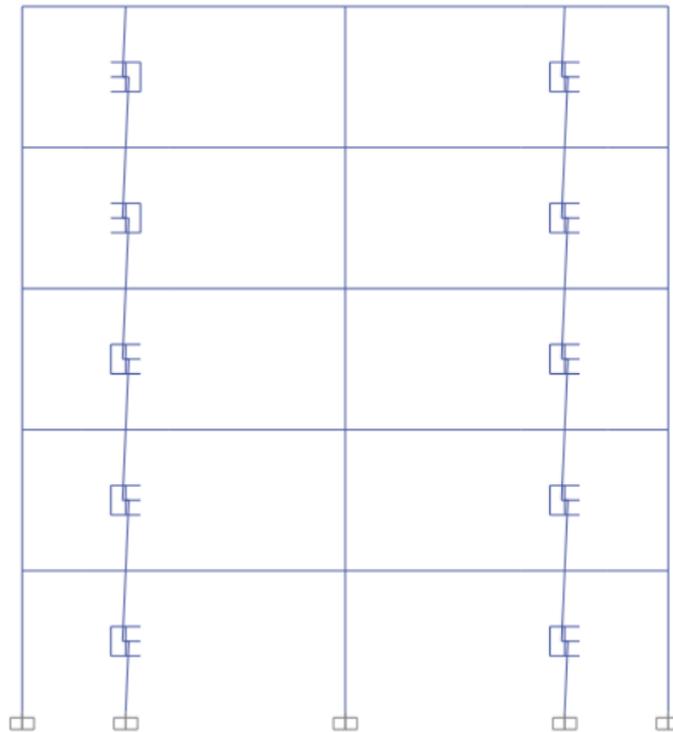


Figura N° 64 Disposición de muros viscosos en la dirección Y, pórtico F.

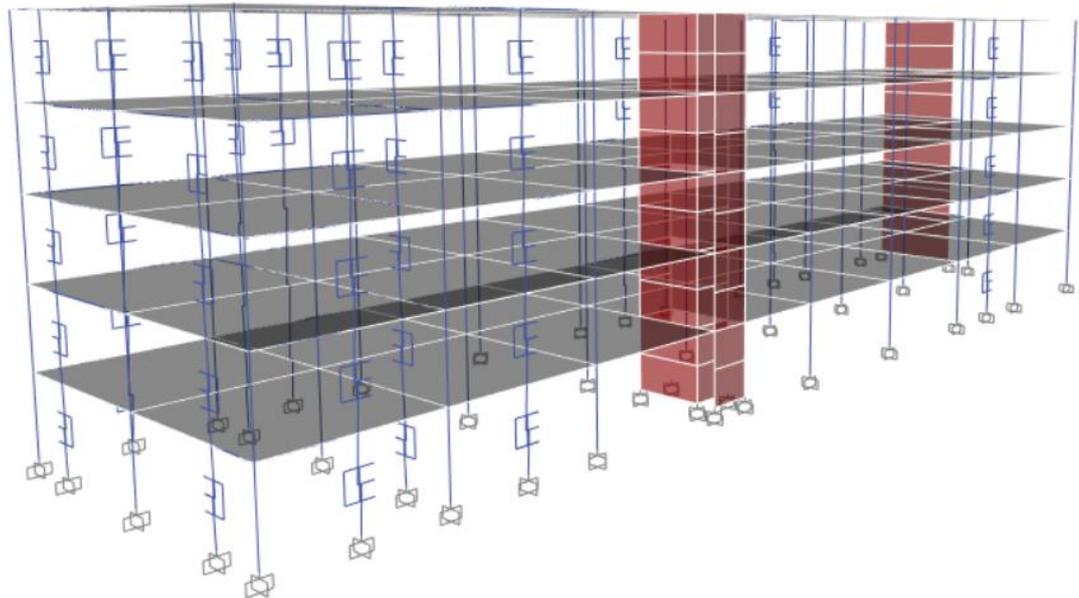


Figura N° 65 Modelo matemático con el sistema de muros de fluido viscoso.

7.5.3 Propiedades de los muros de fluido viscoso

Para determinar las propiedades dinámicas de los disipadores sísmicos que corresponden a los límites de variación superior e inferior se emplean los factores de modificación Lambda λ (ver Tabla 38 y Tabla 39), de acuerdo con el ASCE/SEI 7 y a las recomendaciones del FEMA P-1051.

Tabla 38 Cálculo de los factores de modificación de propiedades. (Fuente: DIS)

Factores de modificación de propiedades		
	λ min	λ máx.
λ test	1.00	1.55
λ a, e	0.89	1.08
λ spec	0.90	1.10
FMP	0.83	1.81

Tabla 39 Límites de variación de propiedades superior e inferior.

MFV 01	Límite inferior de variación	Nominal	Límite superior de variación
Cantidad	35		
C (tonf-s/m)	247.73	300	542.19
Alpha	0.5	0.5	0.5
K (tonf/m)	5978	7240	13085
MFV 02	Límite inferior de variación	Nominal	Límite superior de variación
Cantidad	20		
C (tonf-s/m)	206.44	250	451.83
Alpha	0.5	0.5	0.5
K (tonf/m)	5389	6526	11794

7.6 ANÁLISIS TIEMPO HISTORIA NO LINEAL CON MUROS DE FLUIDO VISCOSO

Para este análisis emplearemos el análisis FNA (Fast Nonlinear Analysis), este tipo de análisis es muy eficiente cuando se trabaja con elementos tipo enlace con propiedades no lineales y con comportamiento histerético como por ejemplo los disipadores de energía, amortiguadores y aisladores de base. El análisis FNA es un análisis dinámico modal no lineal. Para esta etapa del análisis se tendrá en

cuenta los siete pares de registros sísmicos escalados al nivel del sismo elástico, tanto al sismo de diseño como al sismo máximo.

Para el análisis tiempo historia no lineal se debe contar con un estado de carga gravitacional, ya que la carga de gravedad siempre está presente antes del evento sísmico, para lo cual se debe definir una función tipo Rampa, esta función debe ser una función lenta que proporcione una buena aproximación a un estado de carga estático. Se debe tener en cuenta que, para el presente análisis no lineal, los modos a considerar a fin de conseguir resultados satisfactorios son como mínimo el doble del número de disipadores proyectados en la estructura. Para el presente análisis se considerarán un total de 60 modos. En las cargas aplicadas consideramos los patrones de carga definidos previamente como la carga muerta y la carga viva, así como también las aceleraciones en X e Y que considere los enlaces como se muestra en la Figura N° 66.

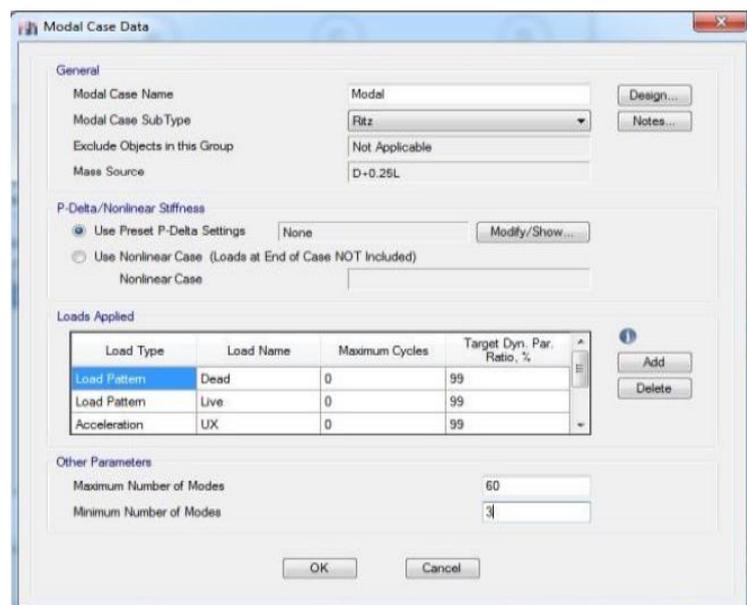


Figura N° 66 Caso de carga para el análisis modal no lineal FNA.

Todos los casos de carga correspondientes al análisis tiempo historia continuarán del estado de carga gravitacional no lineal.

7.6.1 Respuesta sísmica de la estructura con muros de fluido viscoso

Se realizará un análisis tiempo historia empleando dos niveles de sismo, el sismo máximo considerado (MCE) y al sismo de diseño (DBE) haciendo uso de 7 pares de registros (ver Figura N° 67) para ello los acelerogramas de

sismos serán escalados a los niveles de sismo mencionados como se observa en la Figura N° 68 y Figura N° 69.

Luego definiremos los casos de carga considerando las dos direcciones principales. Se introducen al programa los 7 pares de registros sísmicos escalados, siendo los resultados el promedio de los valores obtenidos de cada caso sísmico probable.

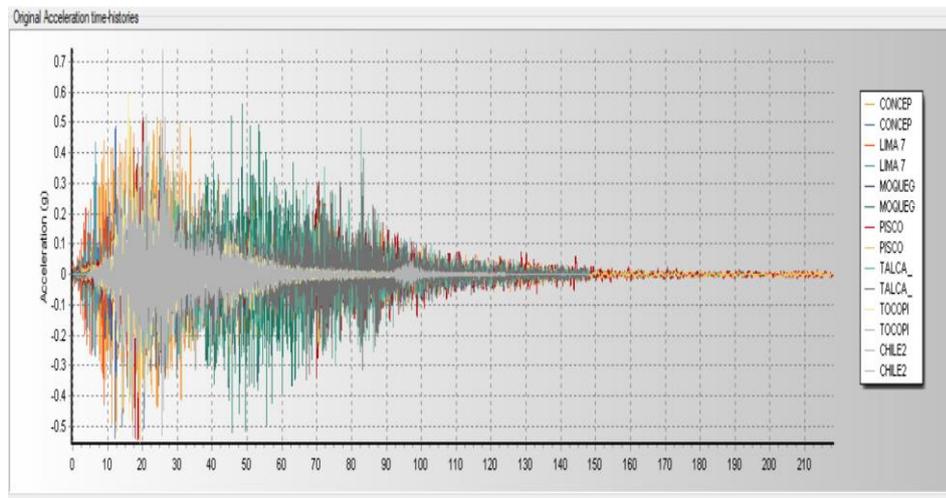


Figura N° 67 Pares de registros sísmicos para el análisis tiempo historia.

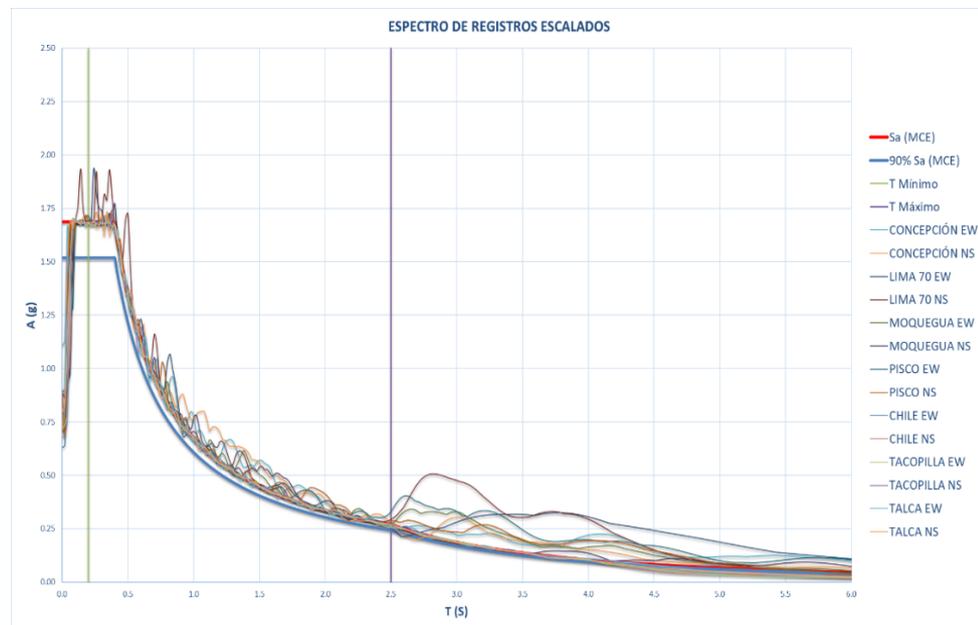


Figura N° 68 Registros sísmicos escalados a sismo máximo (MCE).

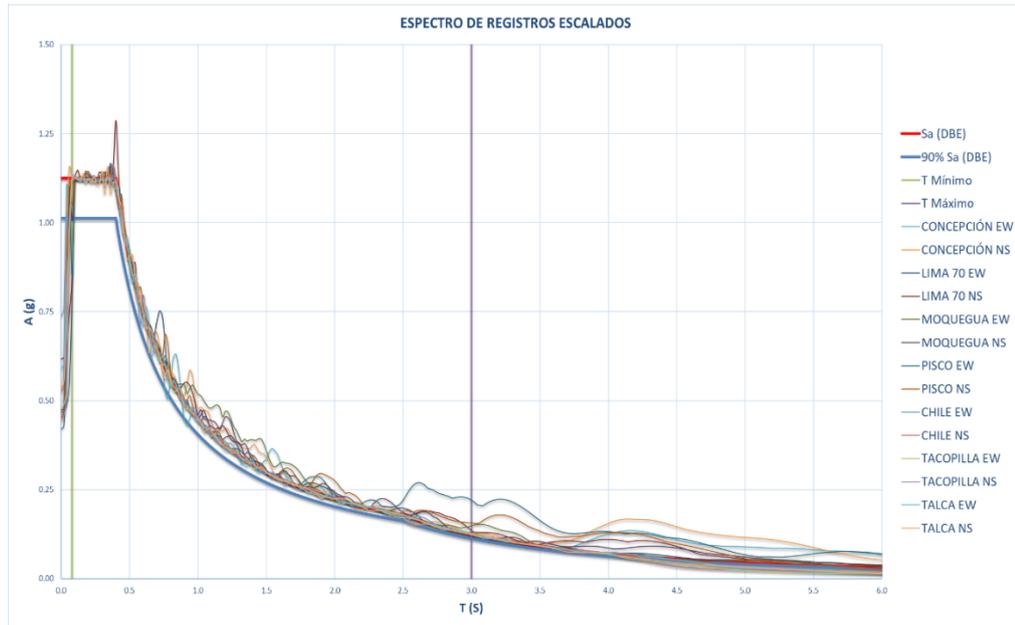


Figura N° 69 Registros sísmicos escalados a sismo de diseño (DBE).

7.6.2 Derivas de entrepiso

Para un nivel de sismo Máximo (ver Tabla 40 y Tabla 41) y sismo de diseño (Tabla 42 y Tabla 43) y considerando la excentricidad accidental de 5%, con un análisis tiempo historia con las propiedades del **límite inferior de variación** se tiene los siguientes niveles de deriva entrepiso como se muestra en los resultados en la Figura N° 70 y Figura N° 72.

Tabla 40 Derivas en la dirección X con muros de fluido viscoso a MCE.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO CON MFV - DERIVAS XX								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	DERIVA XX
PISO 5	5.50	2.72	3.65	3.68	4.07	3.60	3.94	3.88
PISO 4	7.46	3.99	4.36	5.28	5.81	4.98	5.52	5.34
PISO 3	8.41	5.11	5.63	6.36	7.04	5.69	6.84	6.44
PISO 2	8.26	5.19	5.72	5.92	6.82	5.69	6.47	6.30
PISO 1	4.32	2.82	2.91	2.99	3.47	3.30	3.24	3.29

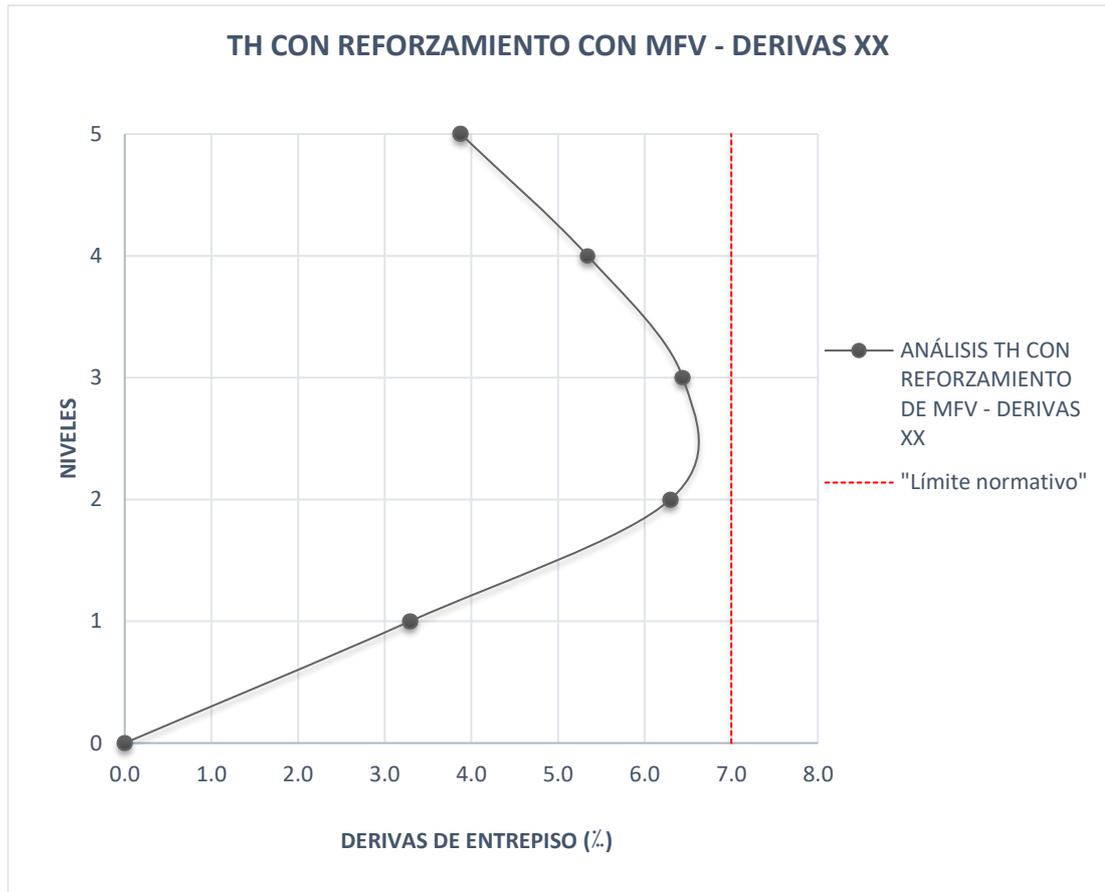


Figura N° 70 Derivas a MCE a TH con muros de fluido viscoso.

Tabla 41 Derivas en la dirección Y con muros de fluido viscoso a sismo máximo.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO CON MFV - DERIVAS YY								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	DERIVA YY
PISO 5	6.699	5.053	5.623	4.579	4.48	4.18	4.947	5.08
PISO 4	7.928	5.193	6.866	5.818	5.704	5.319	5.924	6.11
PISO 3	8.114	5.634	6.772	6.328	5.895	5.778	6.194	6.39
PISO 2	7.655	5.455	5.852	6.071	5.272	5.615	5.911	5.98
PISO 1	4.649	3.268	3.461	3.548	3.105	3.432	3.602	3.58

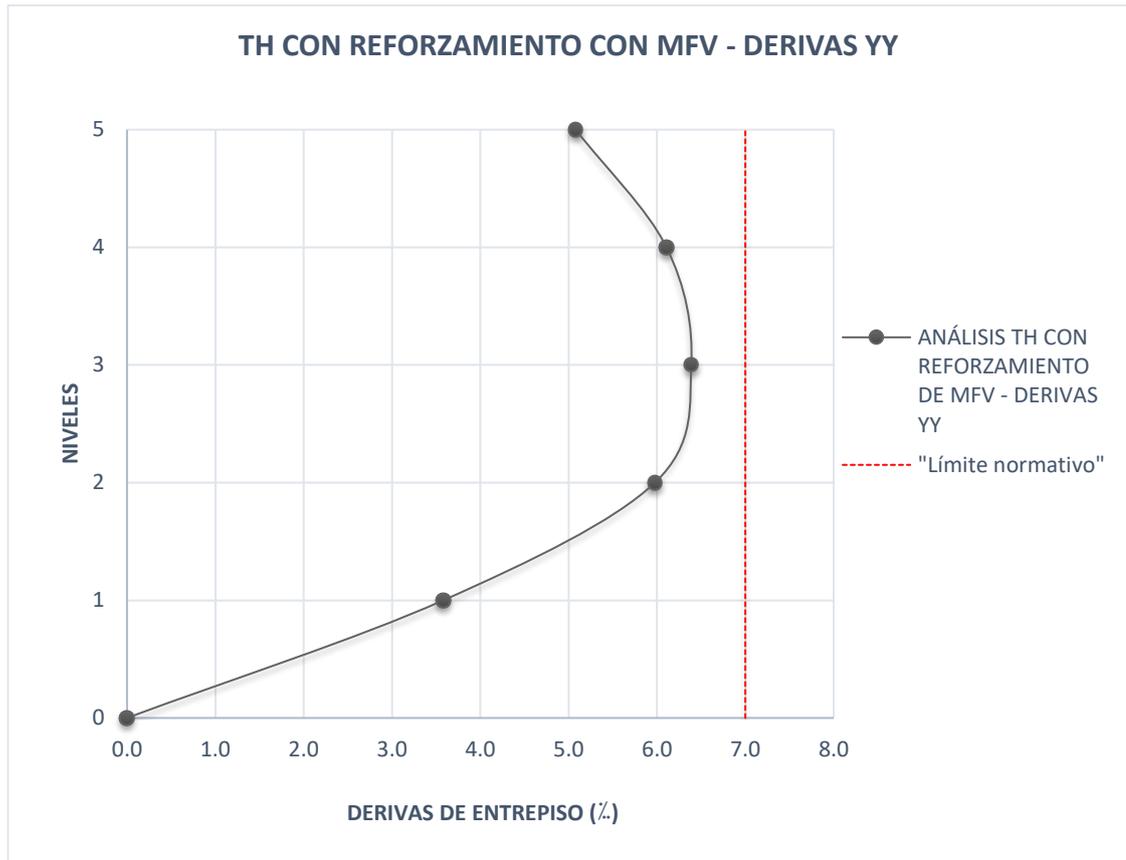


Figura N° 71 Derivas XX a MCE a TH con muros de fluido viscoso.

Tabla 42 Derivas en la dirección X con muros de fluido viscoso a sismo de diseño.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO DE MFV - DERIVAS XX								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	DERIVA XX
PISO 5	3.87	3.10	3.02	3.07	3.46	3.01	3.31	3.26
PISO 4	4.98	4.04	3.92	4.03	4.53	3.92	4.27	4.24
PISO 3	5.97	4.87	4.66	4.87	5.43	4.68	5.07	5.08
PISO 2	6.19	5.05	4.81	5.04	5.61	4.85	5.19	5.25
PISO 1	3.90	3.20	3.01	3.18	3.51	3.06	3.23	3.30

Tabla 43 Derivas en la dirección Y con muros de fluido viscoso a sismo de diseño.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO DE MFV - DERIVAS YY								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	DERIVA YY
PISO 5	4.79	4.44	4.55	4.49	4.78	4.13	4.18	4.48
PISO 4	5.55	5.16	5.28	5.21	5.52	4.80	4.84	5.20
PISO 3	5.88	5.47	5.60	5.52	5.84	5.10	5.12	5.50
PISO 2	5.65	5.25	5.38	5.30	5.59	4.91	4.90	5.28
PISO 1	3.64	3.39	3.48	3.42	3.59	3.18	3.18	3.41

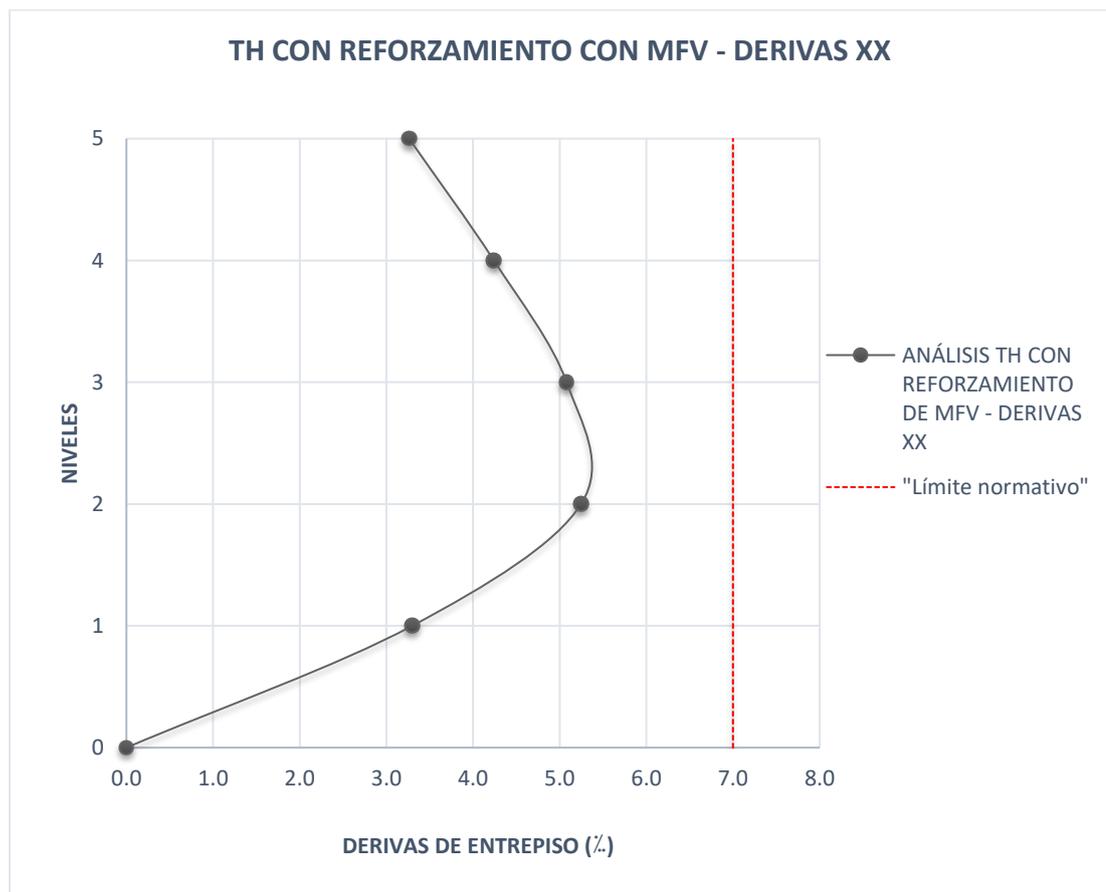


Figura N° 72 Derivas en XX a DBE a TH con Muros de fluido viscoso.

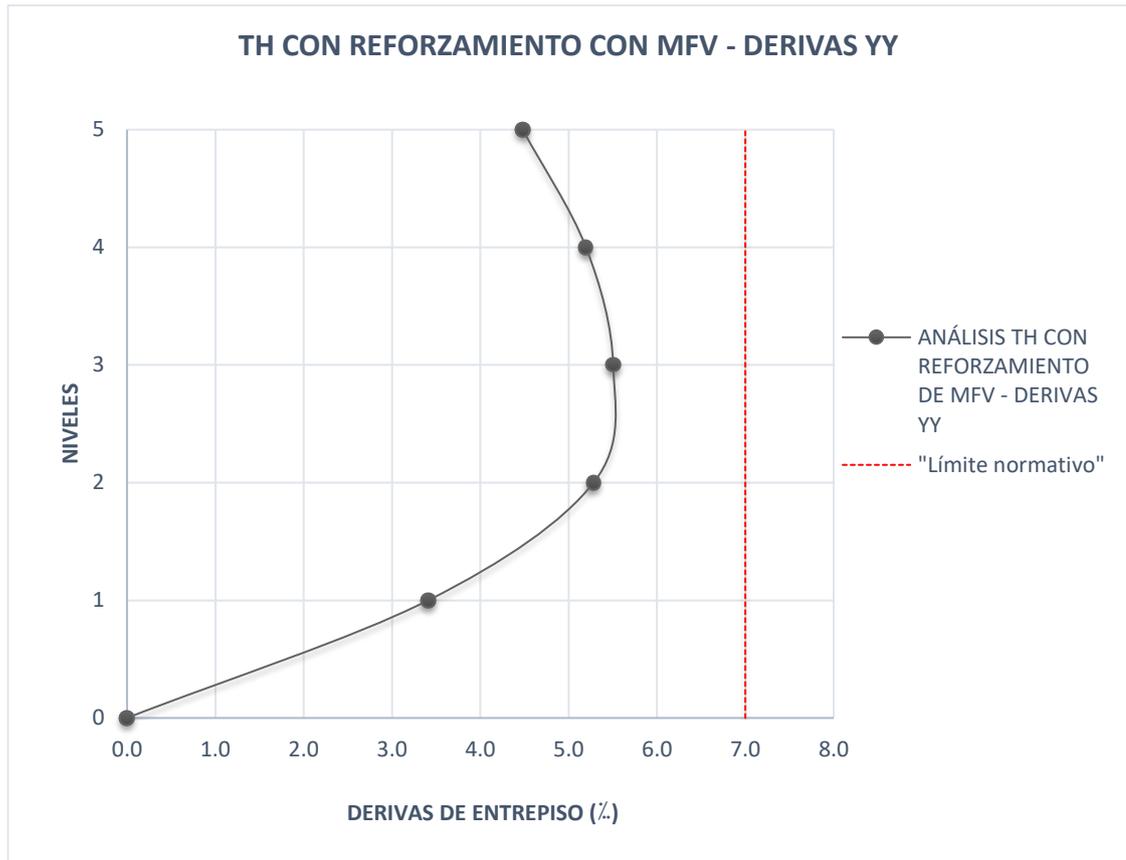


Figura N° 73 Derivas en YY a DBE a TH con Muros de fluido viscoso.

De acuerdo con el análisis se tiene que para sismo máximo (MCE) y para un sismo de diseño (DBE) con las propiedades al **límite inferior de variación**, con excentricidad accidental y obtenida a través de un análisis tiempo historia, la deriva máxima de entrepiso no exceder de 0.007. De acuerdo con el sistema de protección sísmica planteado se cumple con esta exigencia de la norma peruana E.030. Para el caso del análisis del sismo máximo se tiene una deriva no mayor de 7/1000 y para el sismo de diseño se tiene una deriva no mayor a 7/1000 como se muestra en la Tabla 44:

Tabla 44 Resumen de Derivas en la dirección X e Y con muros de fluido viscosos.

	Derivas XX (1/1000)	Derivas YY (1/1000)
MCE	6.44	6.39
DBE	5.25	5.50

7.6.3 Aceleraciones de entrepiso

Para un nivel de sismo máximo (Tabla 45 y Tabla 46) y un nivel de sismo de diseño (Tabla 47 y Tabla 48), con excentricidad accidental y para la condición más desfavorable supuesta (**límite superior de variación**) se tienen los siguientes niveles de aceleración como se muestra en la Figura N° 74 y Figura N° 75.

Tabla 45 Aceleración en la dirección X con muros de fluido viscoso a sismo máximo.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO DE MFV - ACC XX								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	ACC XX
PISO 5	1.49	1.23	1.69	1.26	1.19	1.47	1.19	1.36
PISO 4	1.31	0.88	1.17	1.04	0.97	1.00	1.13	1.07
PISO 3	1.25	1.10	1.01	0.86	0.93	0.88	1.16	1.03
PISO 2	1.10	0.91	0.80	0.76	0.72	0.90	0.83	0.86
PISO 1	0.84	0.61	0.71	0.63	0.57	0.88	1.07	0.76

Tabla 46 Aceleración en la dirección Y con muros de fluido viscoso a sismo máximo.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO DE MFV - ACC YY								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	ACC YY
PISO 5	2.44	2.23	2.55	2.22	2.41	2.30	2.31	2.35
PISO 4	1.85	1.69	1.84	1.60	1.82	1.76	1.59	1.74
PISO 3	1.54	1.14	1.20	1.14	1.22	1.21	1.44	1.27
PISO 2	1.46	0.99	0.99	1.19	1.45	1.03	1.38	1.21
PISO 1	1.14	0.83	0.76	1.13	1.08	0.82	1.19	0.99

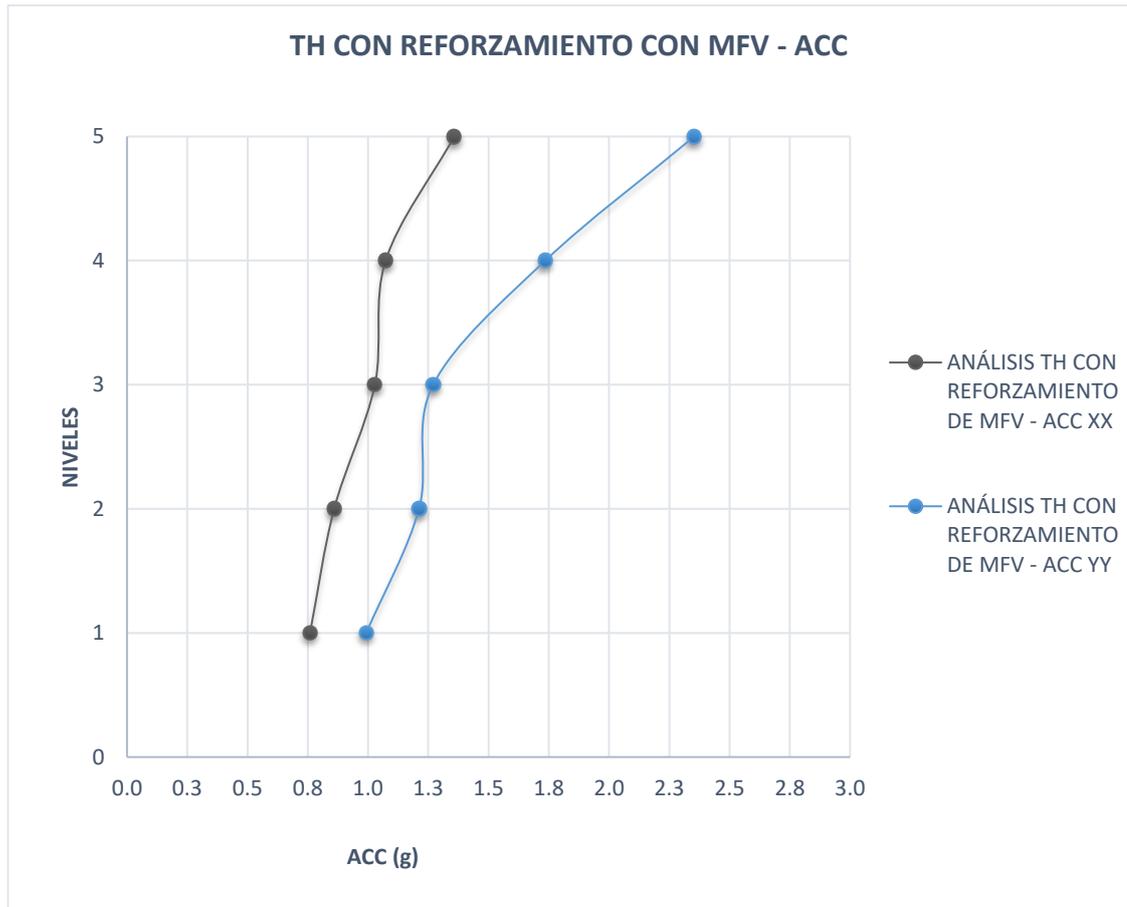


Figura N° 74 Aceleraciones en X e Y a sismo máximo a TH con muros de fluido viscoso.

Tabla 47 Aceleración en la dirección X con muros de fluido viscoso a sismo de diseño.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO DE MFV - ACC XX								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	ACC XX
PISO 5	1.26	0.77	0.95	0.95	0.92	0.79	0.86	0.93
PISO 4	0.85	0.65	0.67	0.61	0.73	0.62	0.59	0.67
PISO 3	0.86	0.55	0.55	0.59	0.57	0.52	0.68	0.62
PISO 2	0.62	0.39	0.41	0.51	0.45	0.51	0.60	0.50
PISO 1	0.69	0.57	0.41	0.42	0.41	0.46	0.61	0.51

Tabla 48 Aceleración en la dirección Y con muros de fluido viscoso a sismo de diseño.

ANÁLISIS TH CON REFORZAMIENTO DE MFV - ACC YY								
PISO	IQUIQUE 2014	CONCEPCIÓN 2010	LIMA 1970	MOQUEGUA 2001	PISCO 2007	TALCA 2010	TACOPILLA 2007	ACC YY
PISO 5	2.40	2.14	1.97	1.97	2.10	1.86	2.14	2.08
PISO 4	1.87	1.76	1.60	1.58	1.74	1.53	1.60	1.67
PISO 3	1.39	1.31	1.18	1.15	1.32	1.16	1.36	1.27
PISO 2	1.05	0.86	0.73	0.75	0.89	0.76	1.04	0.87
PISO 1	0.86	0.54	0.37	0.42	0.50	0.50	0.71	0.56

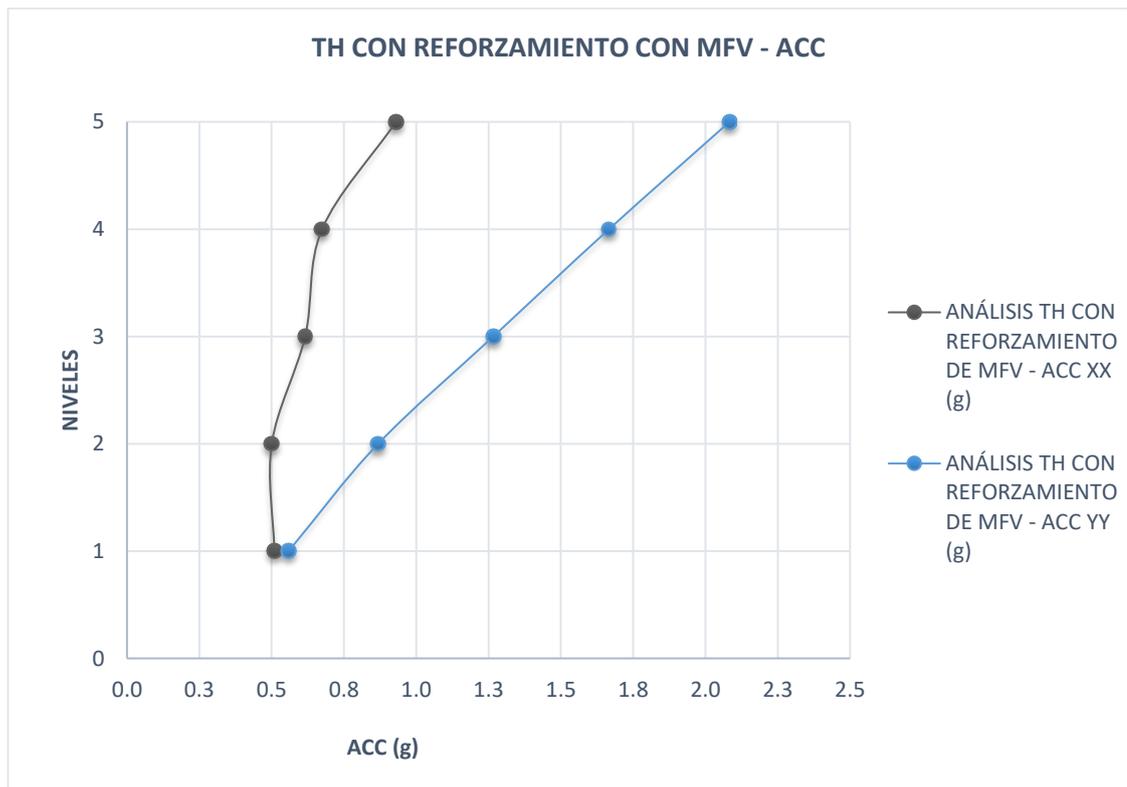


Figura N° 75 Aceleraciones en X e Y a sismo de diseño a TH con muros de fluido viscoso.

De acuerdo con el análisis se tiene que para sismo máximo (MCE) y para un sismo de diseño (DBE) con las propiedades al límite superior de variación se obtiene los resultados mostrados en la Tabla 49:

Tabla 49 Resumen de Aceleraciones en la dirección X e Y muros de fluido viscoso.

	ACC XX	ACC YY
MCE	1.36 g	2.35 g
DBE	0.93 g	2.08 g

7.6.4 Fuerza y deformación de los muros de fluido viscoso

En la Tabla 50 se muestra la fuerza en los muros de fluido viscoso, obtenidos para **límite superior a un nivel de sismo máximo (MCE)**, resultados del valor promedio de los valores obtenidos para los 7 pares de registro empleados en el estudio.

Tabla 50 Propiedades de los elementos links del análisis con muros de fluido viscoso.

Tipo	Amortiguador	Fuerza máxima @ Límite superior (tonf)	Coefficiente de amortiguamiento C nominal (tonf-s/m)	α
MFV 01	K11	210.0	300	0.5
MFV 01	K7	191.0	300	0.5
MFV 01	K12	181.0	300	0.5
MFV 01	K21	180.0	300	0.5
MFV 01	K27	176.0	300	0.5
MFV 01	K22	174.0	300	0.5
MFV 01	K4	172.0	300	0.5
MFV 01	K9	164.0	300	0.5
MFV 01	K23	159.0	300	0.5
MFV 01	K24	157.0	300	0.5
MFV 01	K32	155.0	300	0.5
MFV 01	K28	150.0	300	0.5
MFV 01	K20	146.0	300	0.5
MFV 01	K15	143.0	300	0.5
MFV 01	K33	142.0	300	0.5
MFV 01	K25	141.0	300	0.5
MFV 01	K5	140.0	300	0.5
MFV 01	K3	136.0	300	0.5
MFV 01	K14	134.0	300	0.5
MFV 01	K10	132.0	300	0.5
MFV 01	K29	124.0	300	0.5
MFV 01	K6	122.0	300	0.5
MFV 01	K8	119.0	300	0.5
MFV 01	K13	118.0	300	0.5

MFV 01	K17	113.0	300	0.5
MFV 01	K2	109.0	300	0.5
MFV 01	K41	109.0	300	0.5
MFV 01	K1	108.0	300	0.5
MFV 01	K36	104.0	300	0.5
MFV 01	K46	100.0	300	0.5
MFV 01	K26	83.0	300	0.5
MFV 01	K38	73.0	300	0.5
MFV 02	K19	134.0	250	0.5
MFV 02	K31	102.0	250	0.5
MFV 02	K43	93.0	250	0.5
MFV 02	K39	92.0	250	0.5
MFV 02	K42	89.0	250	0.5
MFV 02	K34	81.0	250	0.5
MFV 02	K44	80.0	250	0.5
MFV 02	K35	77.0	250	0.5

La Tabla 51 muestra las propiedades obtenidas del análisis tiempo historia con un nivel de sismo máximo (MCE), teniendo en cuenta los factores de modificación de propiedades lambda:

Tabla 51 Resumen de las propiedades por tipo de muros viscosos del análisis TH.

TIPO 01	Límite Inferior de Variación	Nominal	Límite Superior de Variación
Cantidad	35		
Fuerza (tonf)	110	130	210.0
C (tonf-s/m)	247.73	300	542.19
Alpha	0.5	0.5	0.5
V (cm/s)	19.72	18.78	15.00
Stroke (±cm)	2.8	2.6	2.0
K (tonf/m)	5978	7240	13085
TIPO 02	Límite Inferior de Variación	Nominal	Límite Superior de Variación
Cantidad	20		
Fuerza (tonf)	77	86	135.0
C (tonf-s/m)	206.44	250	451.83
Alpha	0.5	0.5	0.5
V (cm/s)	13.91	11.83	8.93
Stroke (±cm)	1.9	1.7	1.3
K (tonf/m)	5389	6526	11794

7.6.5 Balance de energía

Para evaluar el nivel de energía disipada por el sistema de protección sísmica, se tendrá en cuenta siguiente expresión:

$$\% \text{ Energía disipada} = \frac{\text{Energía disipada por los amortiguadores}}{\text{Energía generada por el sismo}} \quad \text{Ec. 27}$$

Tabla 52 Porcentaje de disipación de energía en la estructura con los muros viscosos.

% Disipación de Energía	
Energía de Ingreso	Muros de fluido viscoso
788.71	590.78
100%	74.90%

En la Tabla 52 se puede observar que el 75% de la energía de entrada es disipada por el sistema de amortiguamiento como se observa en la Figura N° 76. Con este nivel de energía disipada se puede evaluar el porcentaje de disminución de los desplazamientos, fuerzas de corte, aceleraciones de piso y esfuerzos en los elementos estructurales.

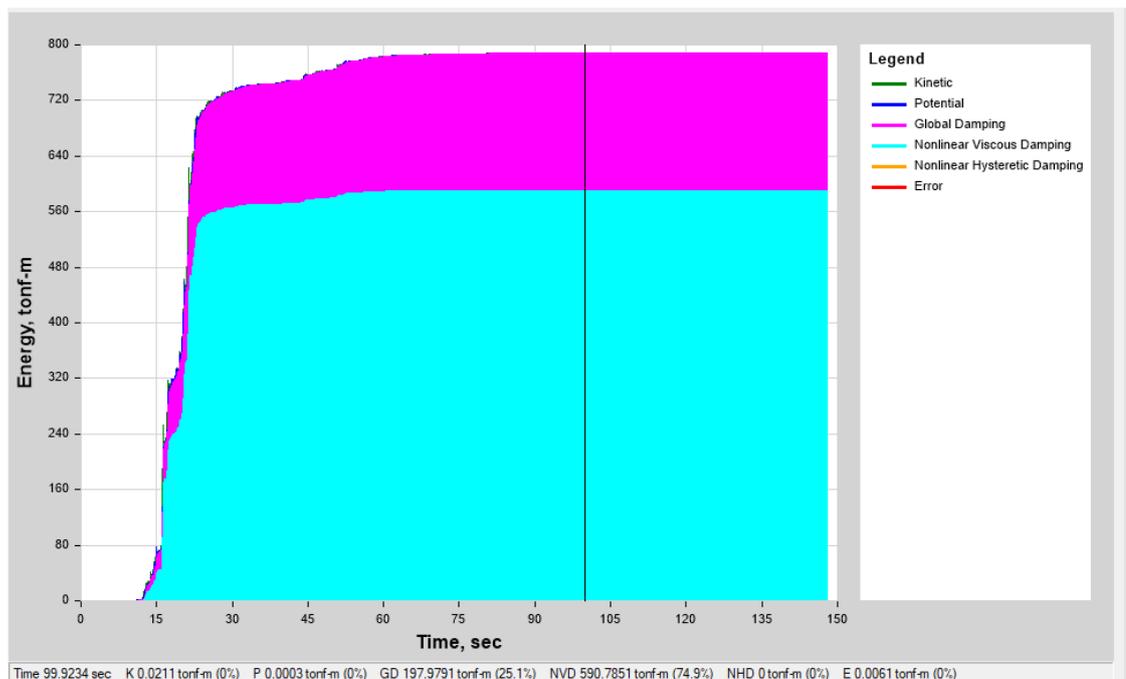


Figura N° 76 Balance de energía disipada por los muros de fluido viscoso.

7.6.6 Curvas histeréticas

Para verificar que todos los dispositivos están funcionando adecuadamente de debe verificar la curva fuerza – desplazamiento que representa el comportamiento histerético de los muros de fluido viscoso con el objetivo de verificar si disipan energía, para ello mediante una simple inspección visual, se puede evaluar si la curva tiene un comportamiento elíptico o lineal. En la Figura N° 77 y Figura N° 78), se puede visualizar que las curvas corresponden a la conducta esperada según lo desarrollado en esta investigación.

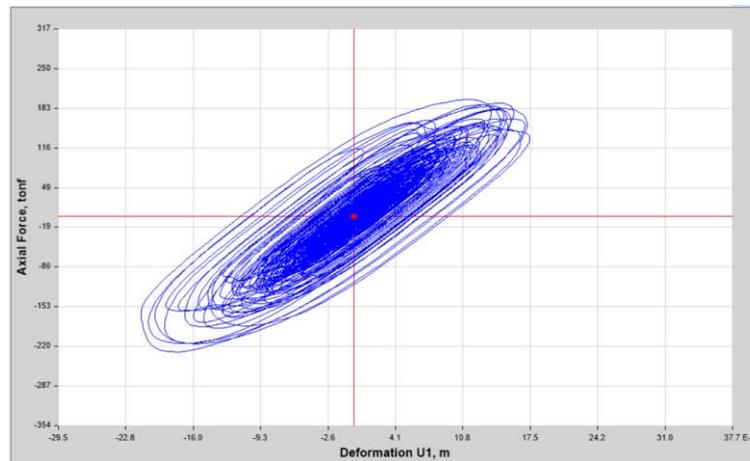


Figura N° 77 Curva histerética del dissipador K5 a sismo máximo.

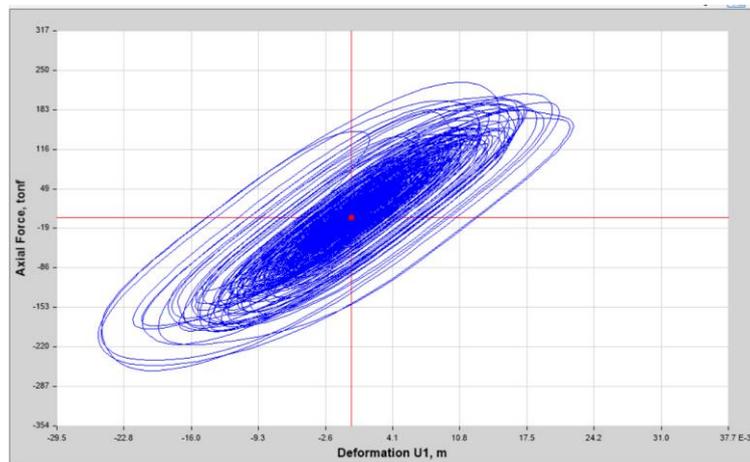


Figura N° 78 Curva histerética del dissipador K19 a sismo máximo.

Al evaluar las curvas histerética de cada dispositivo se observa que en todos los elementos se presenta el comportamiento esperado, es decir se logra la forma elíptica que indica que los dispositivos poseen un alto nivel de disipación de energía por dispositivo.

7.6.7 Fuerza cortante en la base

El cortante basal usado para el diseño del sistema resistente a fuerzas sísmicas no debe ser menor que el cortante mínimo V_m , el cortante mínimo se determina como el mayor de los siguientes valores a calcular:

$$V_{min} = 0.75 * V \quad \text{Ec. 28}$$

$$V_{min} = \frac{V}{B_{VI}} \quad \text{Ec. 29}$$

En donde:

- “V” es el cortante sísmico convencional de un edificio mediante el método ELF.
- B_{VI} es el coeficiente numérico para un amortiguamiento efectivo en el modo fundamental (viscoso + inherente)

Reemplazando los datos:

$$S_{aB} = \frac{S_{SM}}{R * B_M} = 0.62 \frac{m}{s^2} \quad \text{Aceleración espectral reducida}$$

$$\Gamma = 1.37 \quad \text{Factor de participación modal}$$

$$a_{pi} = \Gamma * \phi_1 * S_{aB} = \begin{bmatrix} 0.10 \\ 0.28 \\ 0.49 \\ 0.69 \\ 0.85 \end{bmatrix} \frac{m}{s^2} \quad \text{Aceleración por niveles}$$

$$F_{pi} = M * a_{pi} = \begin{bmatrix} 8.99 \\ 27.76 \\ 44.31 \\ 58.59 \\ 70.32 \end{bmatrix} \text{tonf} \quad \text{Fuerzas laterales de diseño}$$

$$V_i := \begin{bmatrix} F_{i_0} + F_{i_1} + F_{i_2} + F_{i_3} + F_{i_4} \\ F_{i_1} + F_{i_2} + F_{i_3} + F_{i_4} \\ F_{i_2} + F_{i_3} + F_{i_4} \\ F_{i_3} + F_{i_4} \\ F_{i_4} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 209.98 \\ 200.99 \\ 173.23 \\ 128.91 \\ 70.32 \end{bmatrix}$$

Fuerza cortante mínima basal

$$V = 689.54 \text{ tonf} \quad \text{Fuerza de corte del análisis de FLE}$$

$$V_{min 1} = 0.75 * V = 523.91 \text{ tonf}$$

$$V_{min 2} = V / B_{VI} = 393.38 \text{ tonf}$$

$$\beta_{VI} := \beta_{VM} + \beta_I = 36.84$$

$$B_{VI} := \left(\frac{\beta_{VI}}{100} \right)^{0.3} = 1.82$$

$$V_{\min} = \max(V_{\min1}, V_{\min2}) = 523.91 \text{ tonf}$$

7.7 DESEMPEÑO SISMORRESISTENTE Y CURVA DE CAPACIDAD

Mediante un análisis estático no lineal se determinó la curva de capacidad de la estructura que relaciona la cortante basal versus el desplazamiento máximo de monitoreo de la estructura en el último nivel, teniendo en cuenta la sectorización que brinda el SEAOC VISION 2000 para obtener el nivel de desempeño alcanzado por la estructura, se determinó en que rango de desempeño se encuentra la estructura mediante el método de coeficientes según la ASCE 41.

7.7.1 Asignación de rótulas en muros, columnas y vigas

Para proceder con la evaluación del nivel de desempeño alcanzado con el sistema de muros de fluido viscoso asignaremos las rótulas en los principales elementos estructurales con la finalidad de obtener la curva de capacidad del sistema, el nivel de desempeño alcanzado lo evaluaremos mediante el método de coeficientes.

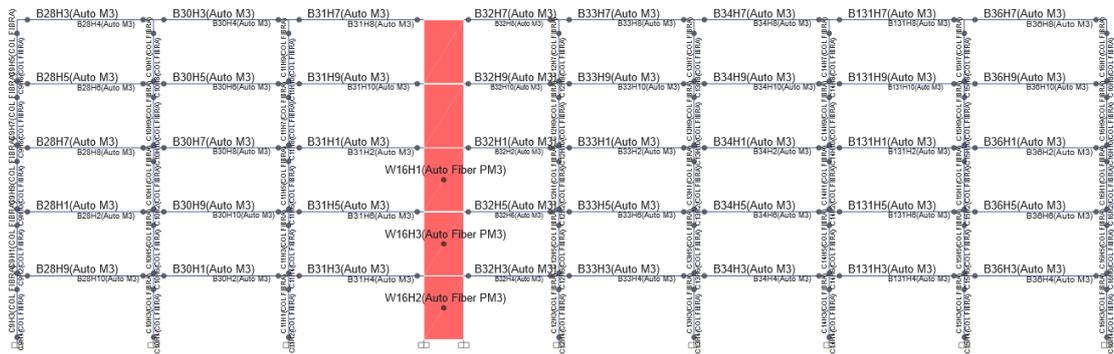


Figura N° 79 Asignación de rótulas en los elementos estructurales sin reforzamiento.

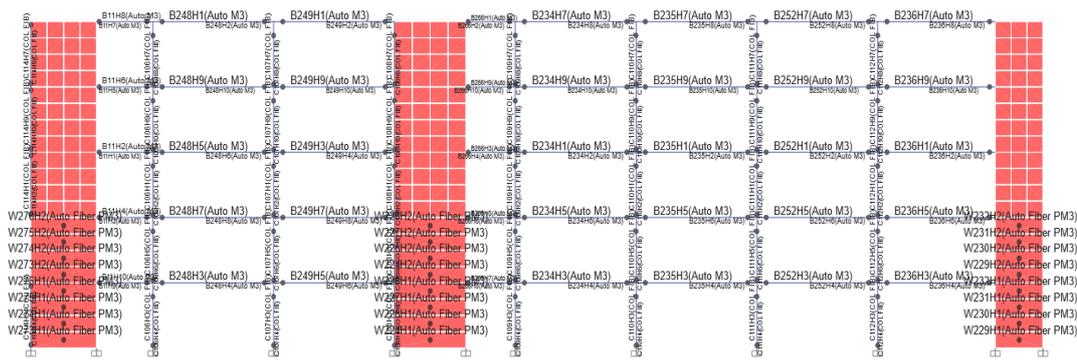


Figura N° 80 Asignación de rótulas en los elementos estructurales con reforzamiento convencional.

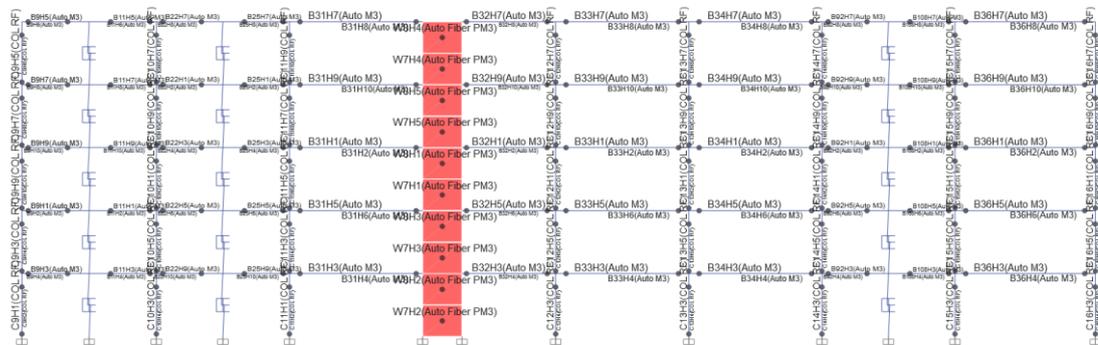


Figura N° 81 Asignación de rótulas en los elementos estructurales con reforzamiento con MFV

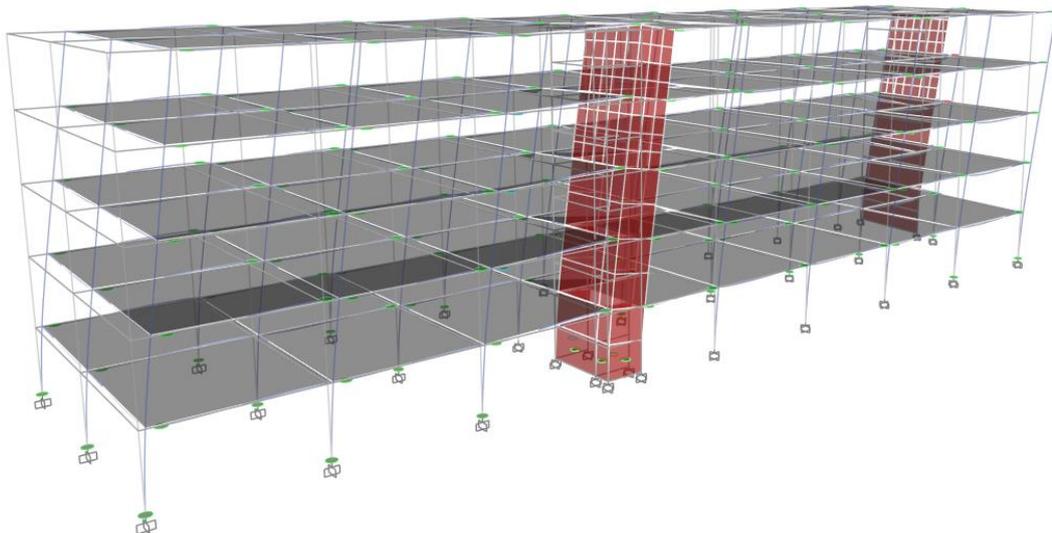


Figura N° 82 Formación de rótulas plásticas en la estructura sin reforzamiento

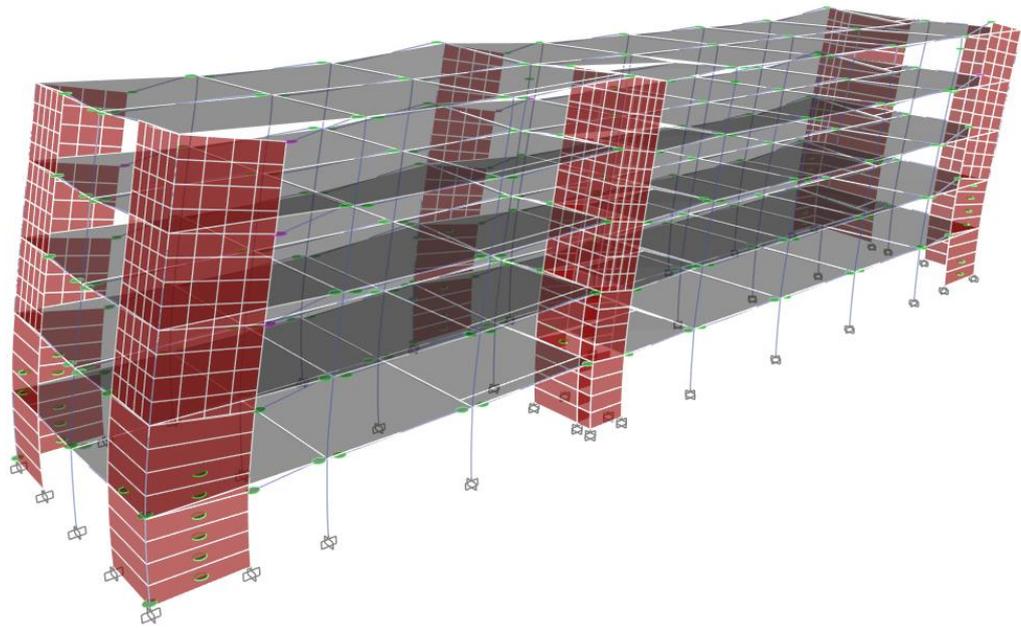


Figura N° 83 Formación de rótulas plásticas en la estructura con reforzamiento convencional

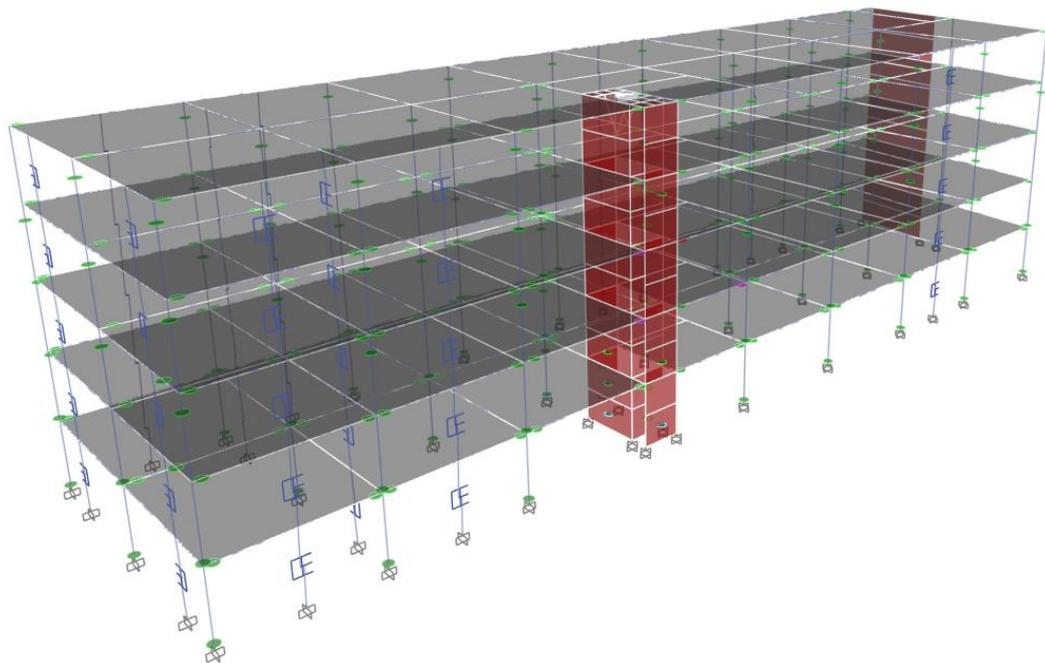


Figura N° 84 Formación de rótulas plásticas en la estructura con reforzamiento con MFV

7.7.2 Curva de capacidad y desempeño sismorresistente del edificio.

Se mostrará la curva de capacidad obtenida del análisis estático no lineal del sistema con y sin muros de fluido viscoso, además, evaluaremos el punto de desempeño alcanzado para ambos casos para un sismo de diseño (Tr de 475 años) y para un sismo máximo (Tr de 2475 años), el punto de desempeño alcanzado se representará mediante el método de coeficientes establecidos en el ASCE 41. Los resultados del análisis estático no lineal se muestran en las siguientes figuras y tablas.

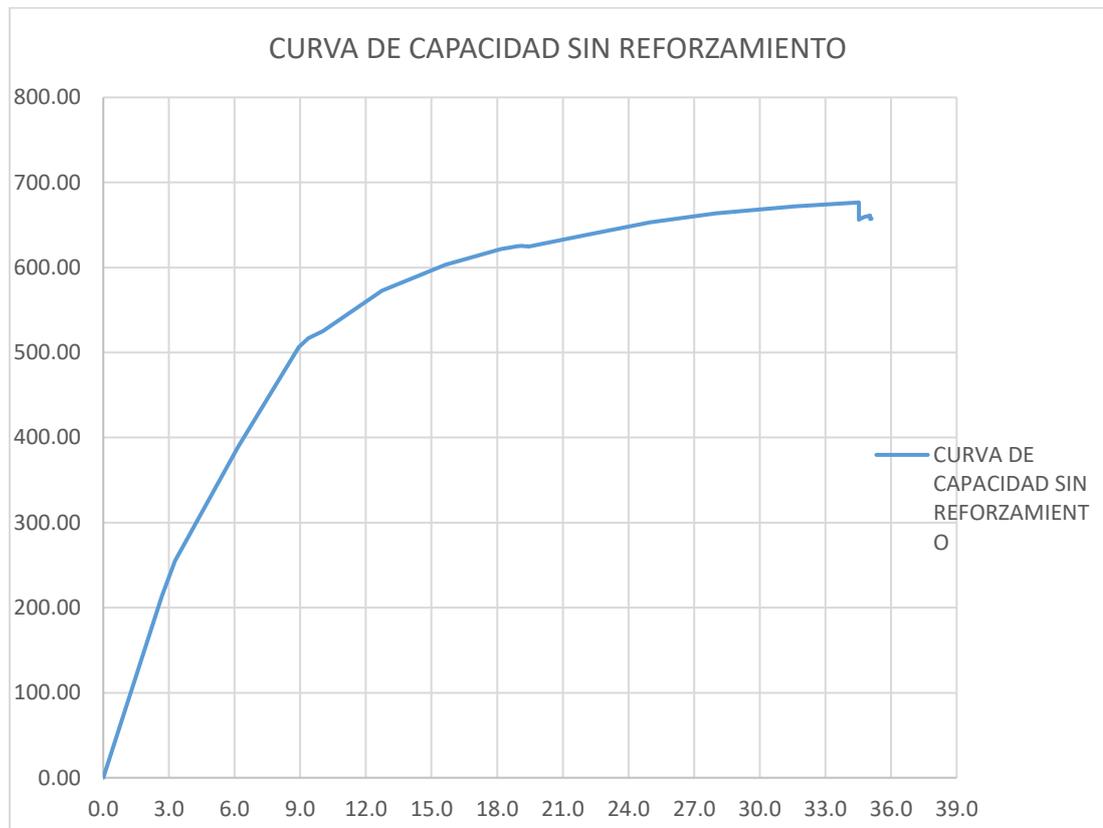


Figura N° 85 Curva de capacidad sin reforzamiento

Tabla 53 Curva bilineal y punto de desempeño sin reforzamiento a MCE según ASCE 41.

CURVA BILINEAL		
Desplazamiento	Cortante basal	
cm	tonf	
0.0	0.0	
7.4	527.5	Punto de fluencia
26.9	619.9	Punto de desempeño
34.5	676.5	Punto de falla

Tabla 54 Parámetros del análisis por desempeño para MCE.

PARÁMETROS (Tr = 2475 años)	
M (ton*s ² /m)	476.95
W (tonf)	4678.87
Ti (seg)	1.09
Ki (tonf/m)	8059.51
Ke (tonf/m)	7136.69
Te (seg)	1.16
Sa (g)	0.58
Cm	1.00
μs	4.98
Co	1.38
C1	1.00
C2	1.00
δt (cm)	27.10

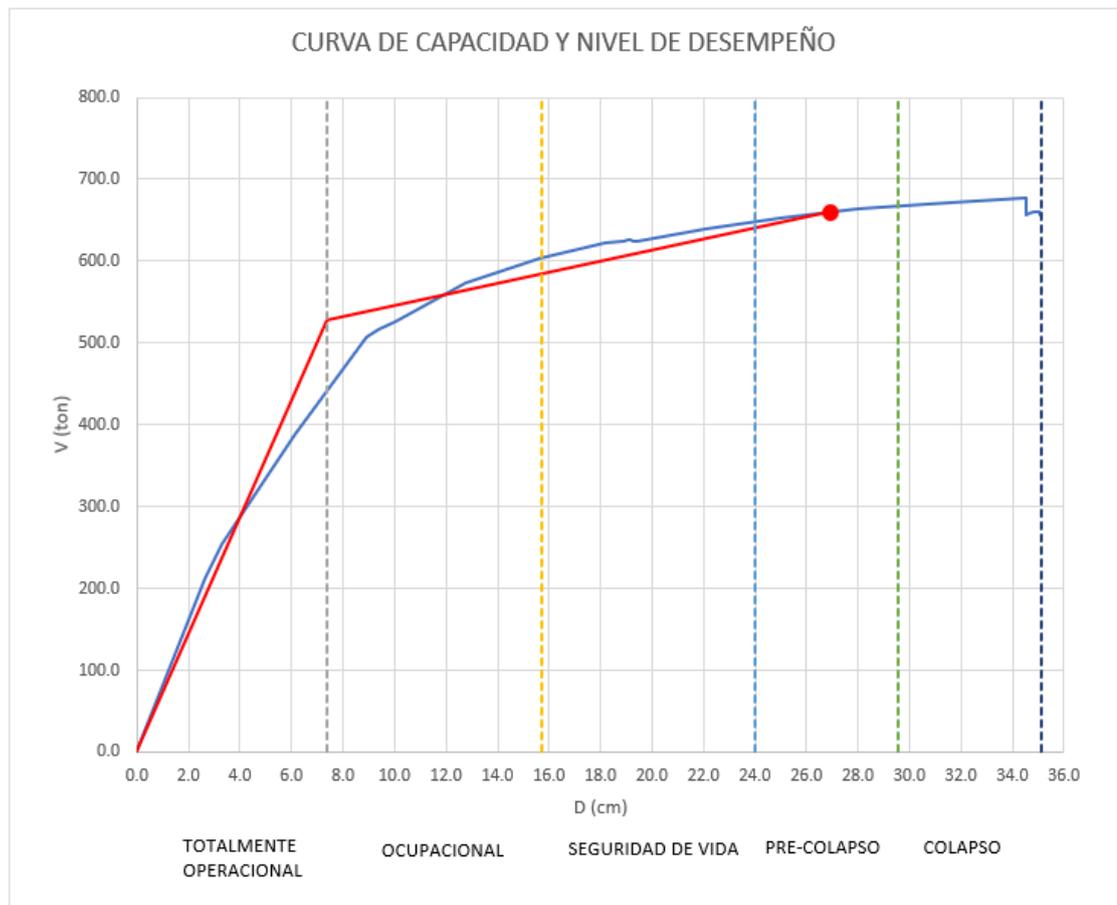


Figura N° 86 Nivel de desempeño sin reforzamiento a MCE (Tr 2475 años) según ASCE 41.

Tabla 55 Curva bilineal y punto de desempeño sin reforzamiento a DBE según ASCE 41.

CURVA BILINEAL		
Desplazamiento	Cortante basal	
cm	tonf	
0.0	0.0	
6.1	456.7	Punto de fluencia
17.5	619.9	Punto de desempeño
34.5	676.5	Punto de falla

Tabla 56 Parámetros del análisis por desempeño a DBE

PARÁMETROS (Tr = 475 años)	
M (ton*s ² /m)	476.95
W (tonf)	4678.87
Ti (seg)	1.09
Ki (tonf/m)	8059.51
Ke (tonf/m)	7534.80
Te (seg)	1.13
Sa (g)	0.40
Cm	1.00
μs	4.10
Co	1.38
C1	1.00
C2	1.00
δt (cm)	17.69

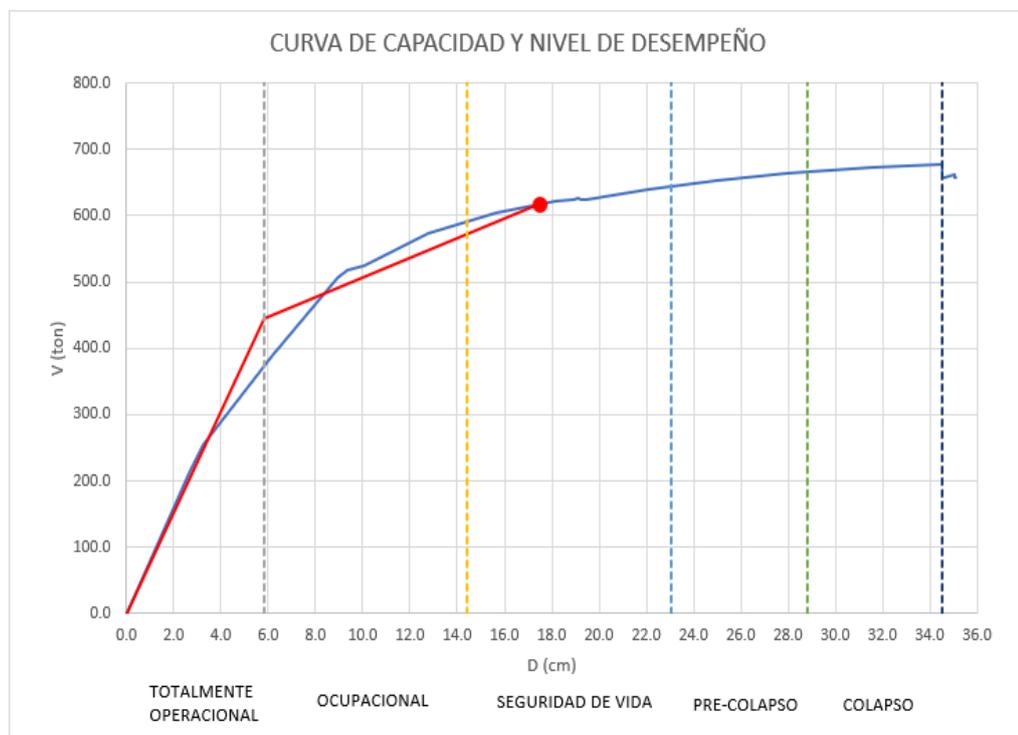


Figura N° 87 Nivel de desempeño sin reforzamiento a DBE (Tr 475 años) según ASCE 41.

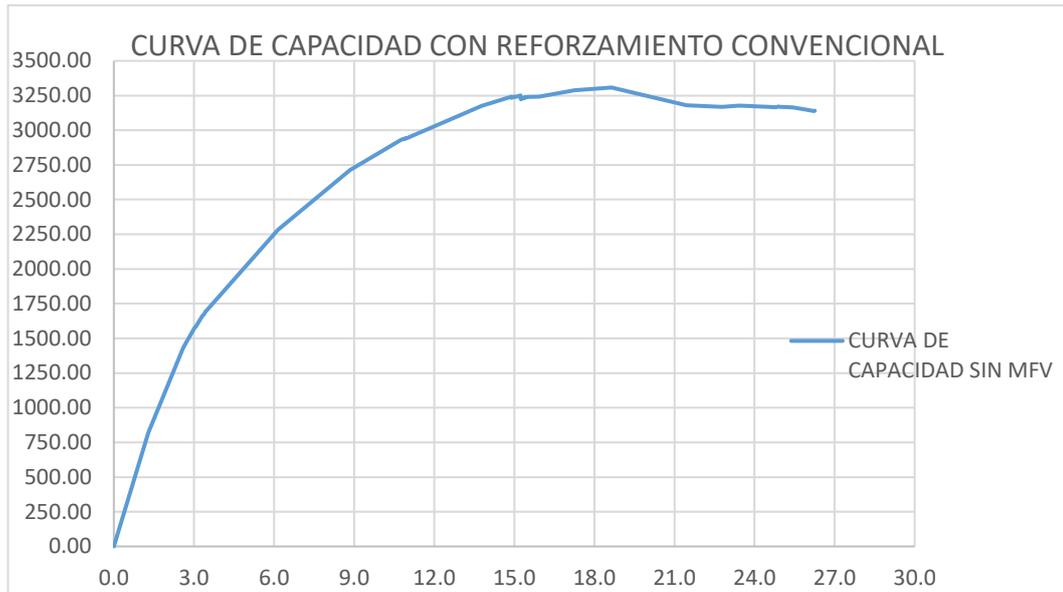


Figura N° 88 Curva de capacidad con reforzamiento convencional.

Tabla 57 Curva bilineal y punto de desempeño con reforzamiento convencional a MCE según ASCE 41.

CURVA BILINEAL		
Desplazamiento	Cortante basal	
cm	tonf	
0.0	0.0	
3.5	2007.7	Punto de fluencia
14.0	3192.0	Punto de desempeño
26.3	3140.3	Punto de falla

Tabla 58 Parámetros del análisis por desempeño con reforzamiento convencional a MCE.

PARÁMETROS (Tr = 2475 años)	
M (tonf*s ² /m)	528.08
W (tonf)	5180.42
Ti (seg)	0.40
Ki (tonf/m)	63981.01
Ke (tonf/m)	57123.42
Te (seg)	0.42
Sa (g)	1.63
Cm	1.00
μs	4.17
Co	1.43
C1	1.30
C2	1.07
δt (cm)	14.18

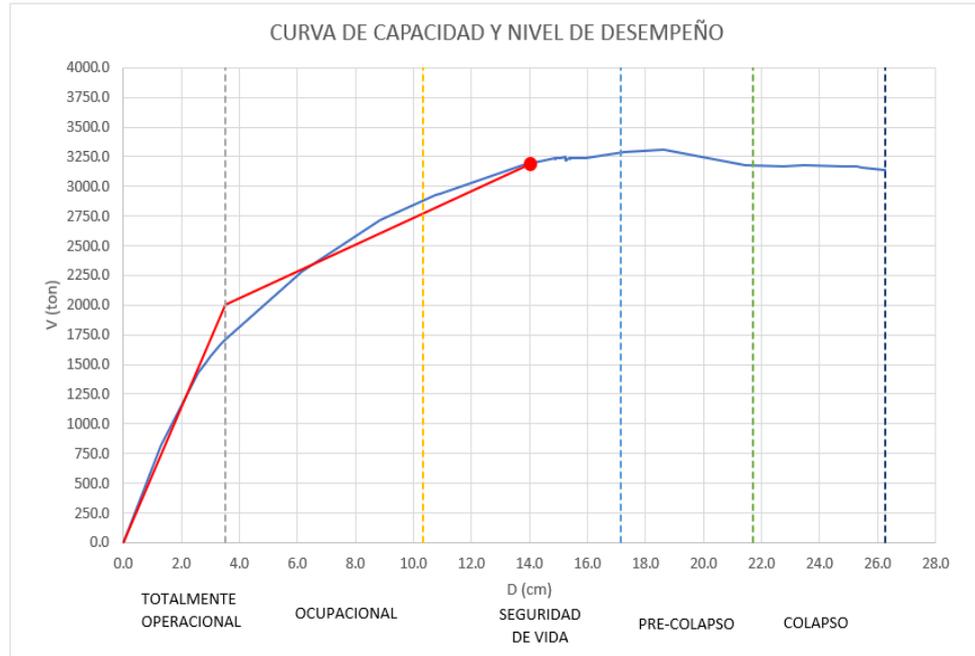


Figura N° 89 Nivel de desempeño con reforzamiento convencional a MCE (Tr 2475 años) según ASCE 41.

Tabla 59 Curva bilineal y punto de desempeño con reforzamiento convencional a DBE según ASCE 41.

CURVA BILINEAL		
Desplazamiento	Cortante basal	
cm	tonf	
0.0	0.0	
2.5	1546.9	Punto de fluencia
8.7	2692.5	Punto de desempeño
26.3	3140.3	Punto de falla

Tabla 60 Parámetros del análisis por desempeño con reforzamiento convencional a DBE.

PARÁMETROS (Tr = 475 años)	
M (ton*s ² /m)	528.08
W (tonf)	5180.42
Ti (seg)	0.40
Ki (tonf/m)	63981.01
Ke (tonf/m)	61660.46
Te (seg)	0.41
Sa (g)	1.11
Cm	1.00
μs	3.73
Co	1.43
C1	1.28
C2	1.06
δt (cm)	8.78

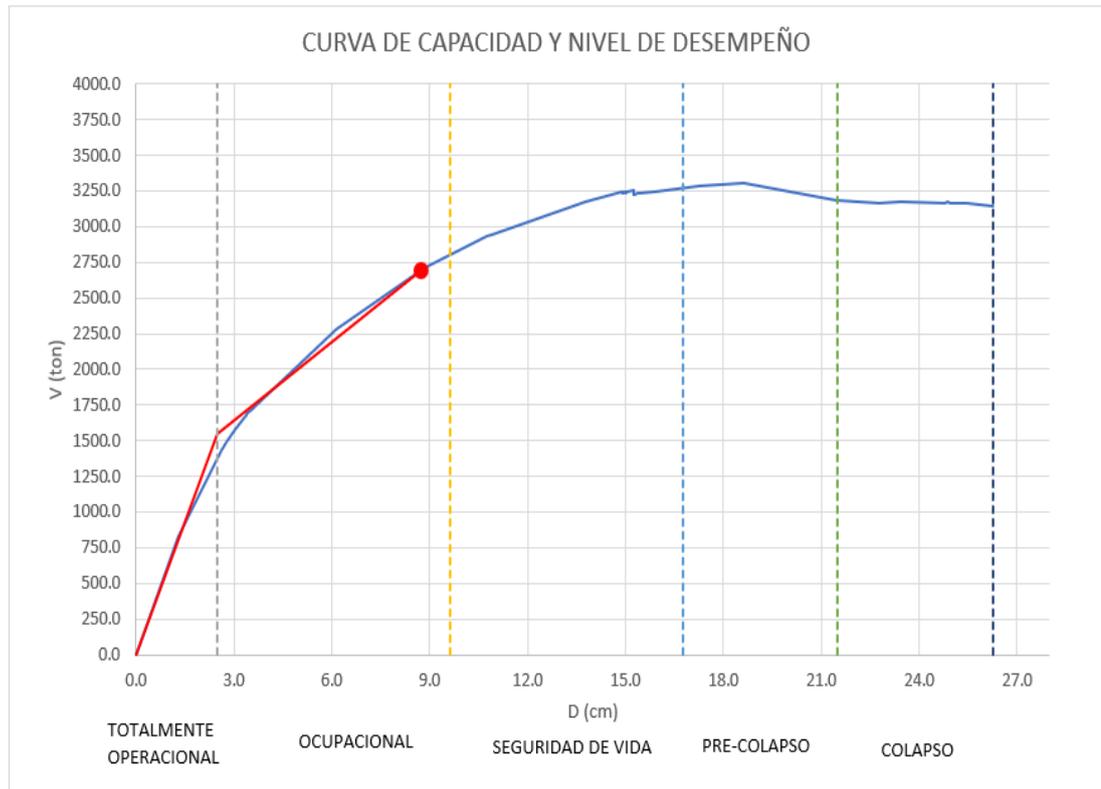


Figura N° 90 Curva de capacidad con reforzamiento convencional a DBE (Tr 475 años) según ASCE 41.

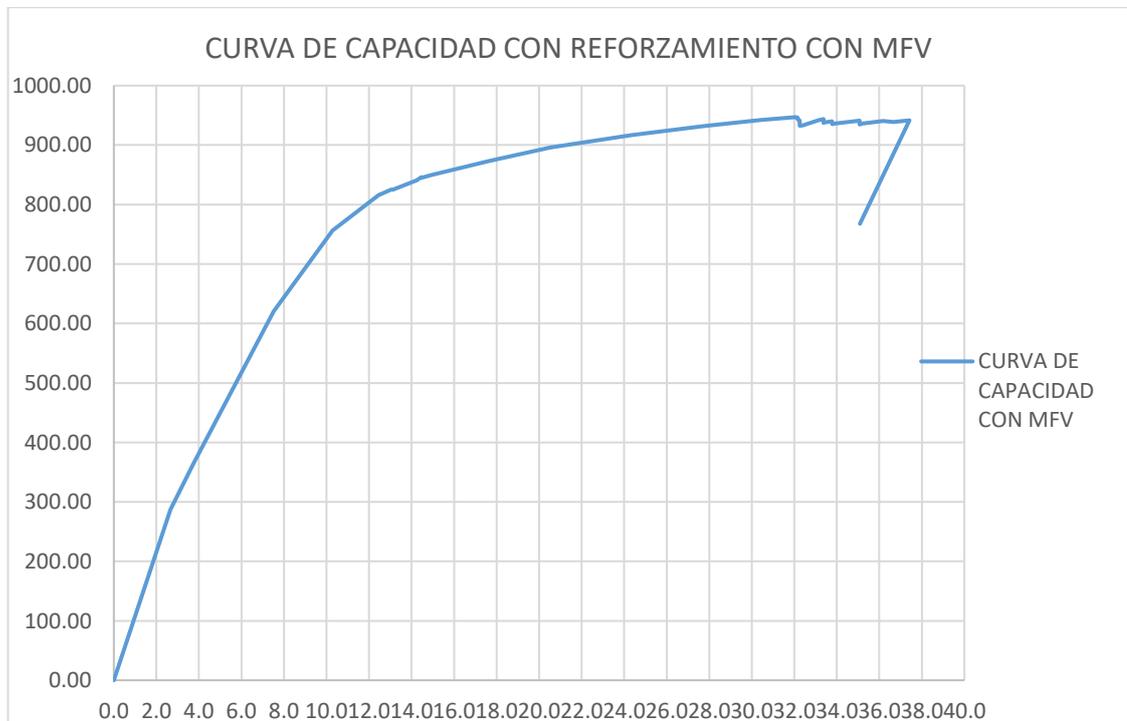


Figura N° 91 Curva de capacidad con reforzamiento con MFV

Tabla 61 Curva bilineal y punto de desempeño con reforzamiento con MFV a MCE según ASCE 41.

CURVA BILINEAL		
Desplazamiento	Cortante basal	
cm	tonf	
0.00	0.00	
5.40	549.54	Punto de fluencia
13.60	832.06	Punto de desempeño
37.42	941.68	Punto de falla

Tabla 62 Parámetros del análisis por desempeño con reforzamiento con MFV a MCE.

PARÁMETROS (Tr = 2475 años)	
M (tonf*s ² /m)	462.91
W (tonf)	4541.16
Ti (seg)	0.95
Ki (tonf/m)	10765.04
Ke (tonf/m)	10180.80
Te (seg)	0.98
Sa (g)	0.41
Cm	1.00
μs	3.42
Co	1.34
C1	1.05
C2	1.00
δt (cm)	13.9

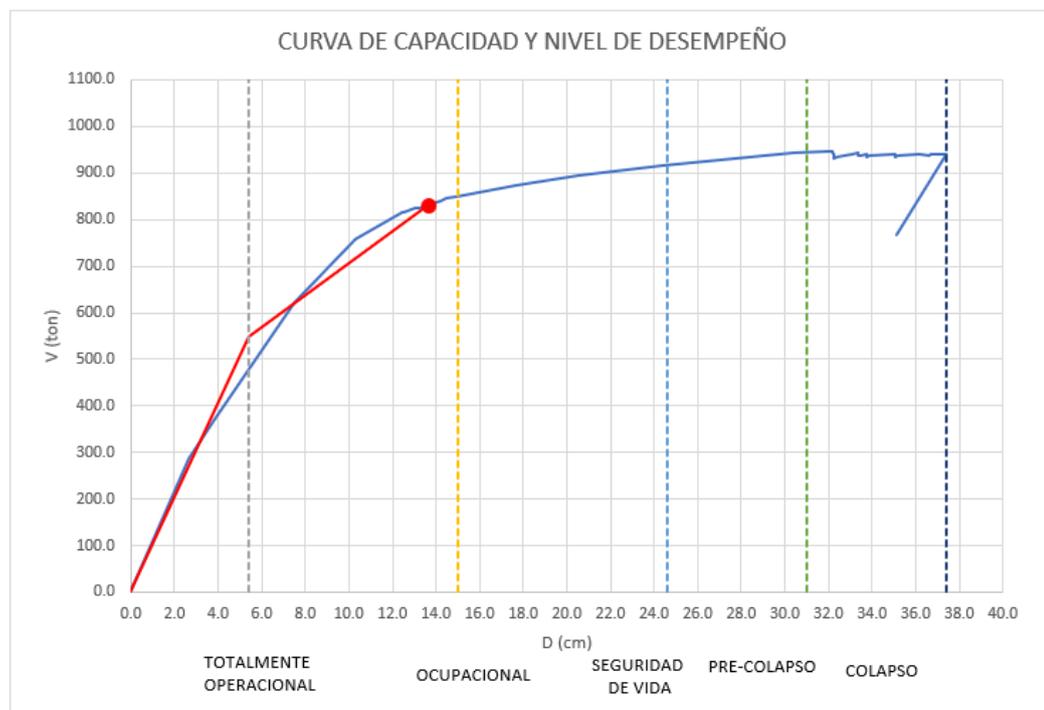


Figura N° 92 Curva de capacidad con reforzamiento con MFV a MCE (Tr 2475 años) según ASCE 41.

Tabla 63 Curva bilineal y punto de desempeño con reforzamiento con MFV a DBE según ASCE 41.

CURVA BILINEAL		
Desplazamiento	Cortante basal	
cm	tonf	
0.0	0.0	
3.3	351.3	Punto de fluencia
9.1	698.5	Punto de desempeño
37.4	941.7	Punto de falla

Tabla 64 Parámetros del análisis por desempeño con reforzamiento con MFV a DBE.

PARÁMETROS (Tr = 475 años)	
M (tonf*s ² /m)	462.91
W (ton)	4541.16
Ti (seg)	0.95
Ki (tonf/m)	10765.04
Ke (tonf/m)	10764.92
Te (seg)	0.95
Sa (g)	0.28
Cm	1.00
μs	3.68
Co	1.36
C1	1.05
C2	1.00
δt (cm)	9.18

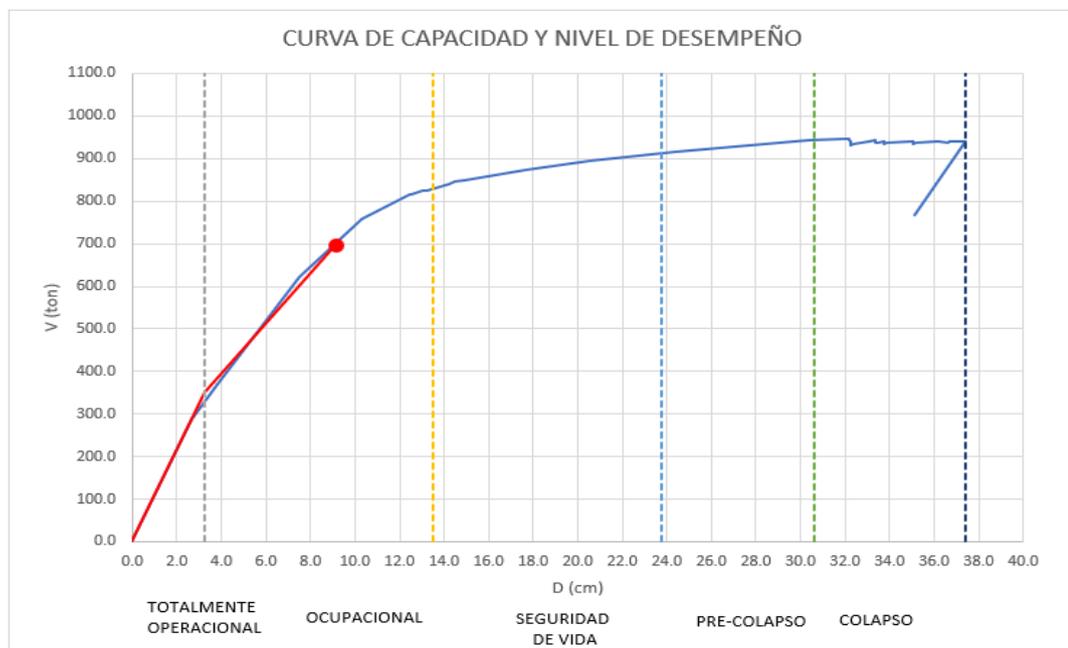


Figura N° 93 Curva de capacidad con reforzamiento con MFV a DBE (Tr 475 años) según ASCE 41.

CAPÍTULO VIII. ANÁLISIS Y RESULTADOS**8.1 ANÁLISIS COMPARATIVO CONVENCIONAL Y CON MUROS DE FLUIDO VISOCO**

Como resultado de los análisis lineales y no lineales se presentarán mediante cuadros comparativos el comportamiento sísmico de la estructura con y sin muros de fluido viscoso mediante los siguientes parámetros de desempeño como: derivas, aceleraciones, fuerza cortante en la base, energía disipada y comportamiento modal, todo ello teniendo en cuenta los dos niveles de sismo, planteado, tanto el sismo de diseño como el sismo máximo considerado.

8.1.1 Periodos y modos de vibración

Como se puede observar en la Tabla 65 y Tabla 66 el comportamiento modal de la estructura no se ve alterada al incorporar los muros viscoso, tal como se describió el sistema de muros de fluido viscoso sólo incrementa el amortiguamiento del sistema sin alterar la rigidez de esta manteniendo los periodos y comportamiento modal del sistema.

Tabla 65 Modos de vibración de la estructura sin reforzamiento.

Tabla: Relación modal de masa participativa								
Caso	Modo	Periodo	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
Modal	1	0.801	0.7382	0.0014	74%	0%	0.0195	2%
Modal	2	0.502	0.0116	0.5014	75%	50%	0.2261	25%
Modal	3	0.371	0.0034	0.1681	75%	67%	0.2606	51%
Modal	4	0.348	0.0037	0.0662	76%	74%	0.2325	74%
Modal	5	0.226	0.1517	0.0009	91%	74%	0.0041	74%
Modal	6	0.139	0.0031	0.1182	91%	86%	0.0679	81%
Modal	7	0.128	0.0000	0.0000	91%	86%	0.0000	81%
Modal	8	0.107	0.0515	0.0006	96%	86%	0.0028	81%
Modal	9	0.09	0.0047	0.0748	97%	93%	0.1221	94%
Modal	10	0.069	0.0178	0.0025	99%	93%	0.0031	94%
Modal	11	0.068	0.0054	0.0246	99%	96%	0.0062	94%
Modal	12	0.055	0.0057	0.0004	100%	96%	0.0004	95%

Tabla 66 Modos de vibración de la estructura con muros de fluido viscoso.

Tabla: Relación modal de masa participativa								
Caso	Modo	Periodo	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ	SumRZ
Modal	1	0.897	0.72	0.0001	72%	0%	0.0119	1%
Modal	2	0.563	0.004	0.5041	72%	50%	0.219	23%
Modal	3	0.337	0.0044	0.2148	73%	72%	0.4911	72%
Modal	4	0.232	0.15	0.0008	88%	72%	0.0012	72%
Modal	5	0.143	0.0045	0.1257	88%	85%	0.0538	78%
Modal	6	0.118	0.0488	0.0009	93%	85%	0.0035	78%
Modal	7	0.088	0.0091	0.0238	94%	87%	0.0218	80%
Modal	8	0.077	0.0047	0.0378	95%	91%	0.099	90%
Modal	9	0.073	0.0231	0.0048	97%	91%	0.0209	92%
Modal	10	0.07	0.0005	0.0345	97%	95%	0.0109	93%

8.1.2 Análisis comparativo de derivas de entrepiso

Las derivas de entrepiso al incorporar los muros de fluido viscoso se lograron reducir entre un 30 a 45% en ambas direcciones como se muestran desde la Tabla 67 hasta la Tabla 68. Los niveles de deriva alcanzados cumplen con los límites de la norma E.030 de diseño Sismorresistente como se puede apreciar desde la Figura N° 94 hasta la Figura N° 95. Así mismo, se puede visualizar la reducción de las derivas al emplear los muros de fluido viscoso en la dirección X e Y, tanto para el sismo máximo como para el sismo de diseño.

Tabla 67 Reducción de derivas en X a MCE con muros de fluido viscoso.

DERIVAS XX			
	ATHNL	ATHL	ATHL
PISO	REFORZAMIENTO CON MFV	REFORZAMIENTO CONVENCIONAL	ESTRUCTURA SIN REFORZAMIENTO
PISO 5	3.88	6.36	10.86
PISO 4	5.34	6.56	12.30
PISO 3	6.44	6.11	12.50
PISO 2	6.30	4.81	10.90
PISO 1	3.29	2.38	5.87

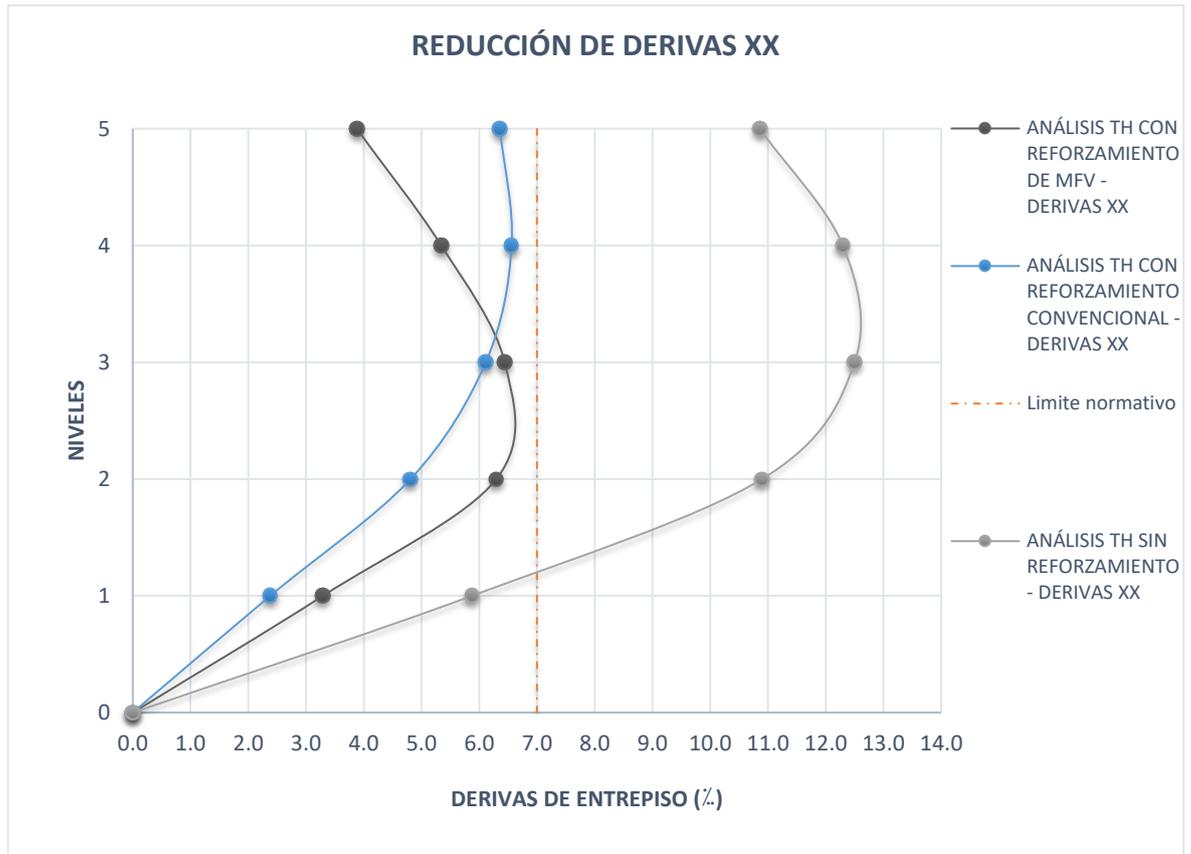


Figura N° 94 Reducción de derivas en X a sismo máximo.

Tabla 68 Reducción de derivas en Y a sismo máximo con muros de fluido viscoso.

DERIVAS MÁXIMAS YY			
	ATHNL	ATHL	ADME
PISO	REFORZAMIENTO CON MFV	REFORZAMIENTO CONVENCIONAL	ESTRUCTURA SIN REFORZAMIENTO
PISO 5	5.08	4.95	9.93
PISO 4	6.11	5.16	10.91
PISO 3	6.39	4.89	10.56
PISO 2	5.98	3.97	8.85
PISO 1	3.58	2.08	4.85

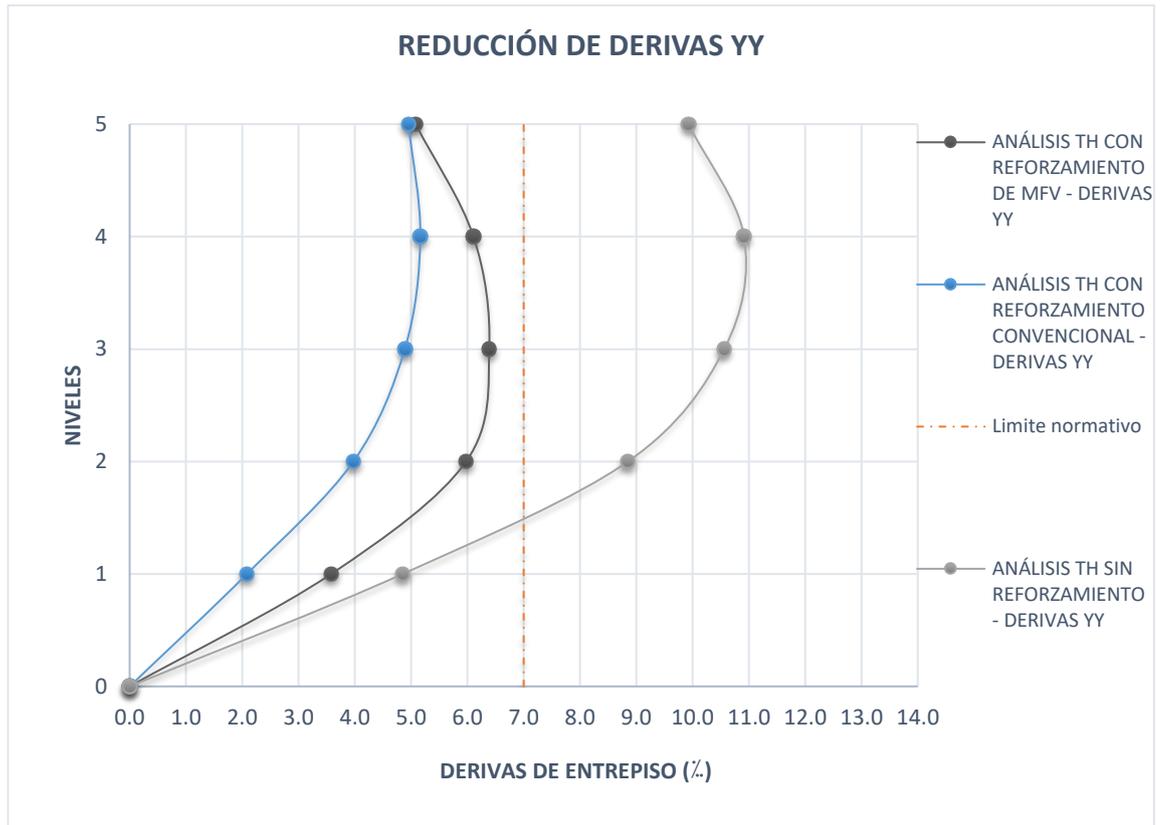


Figura N° 95 Reducción de derivas en Y a sismo máximo.

8.1.3 Análisis comparativo de aceleraciones máximas

Las aceleraciones se redujeron en un rango de entre 35 a 45% como se muestra desde la Tabla 69 hasta la Tabla 70; la evaluación se realizó teniendo en cuenta dos niveles de sismo tanto a sismo máximo, obteniendo reducciones importantes tanto en la dirección X como Y como se muestra en desde la Figura N° 96 hasta la Figura N° 97.

Tabla 69 Reducción de aceleraciones en X a sismo máximo.

ACELERACIONES MÁXIMAS XX (g)			
	ATHNL	ATHL	ATHL
PISO	REFORZAMIENTO CON MFV	REFORZAMIENTO CONVENCIONAL	SIN REFORZAMIENTO
PISO 5	1.36	2.59	1.46
PISO 4	1.07	1.80	1.01
PISO 3	1.03	1.41	0.98
PISO 2	0.86	1.09	0.95
PISO 1	0.76	0.89	0.79

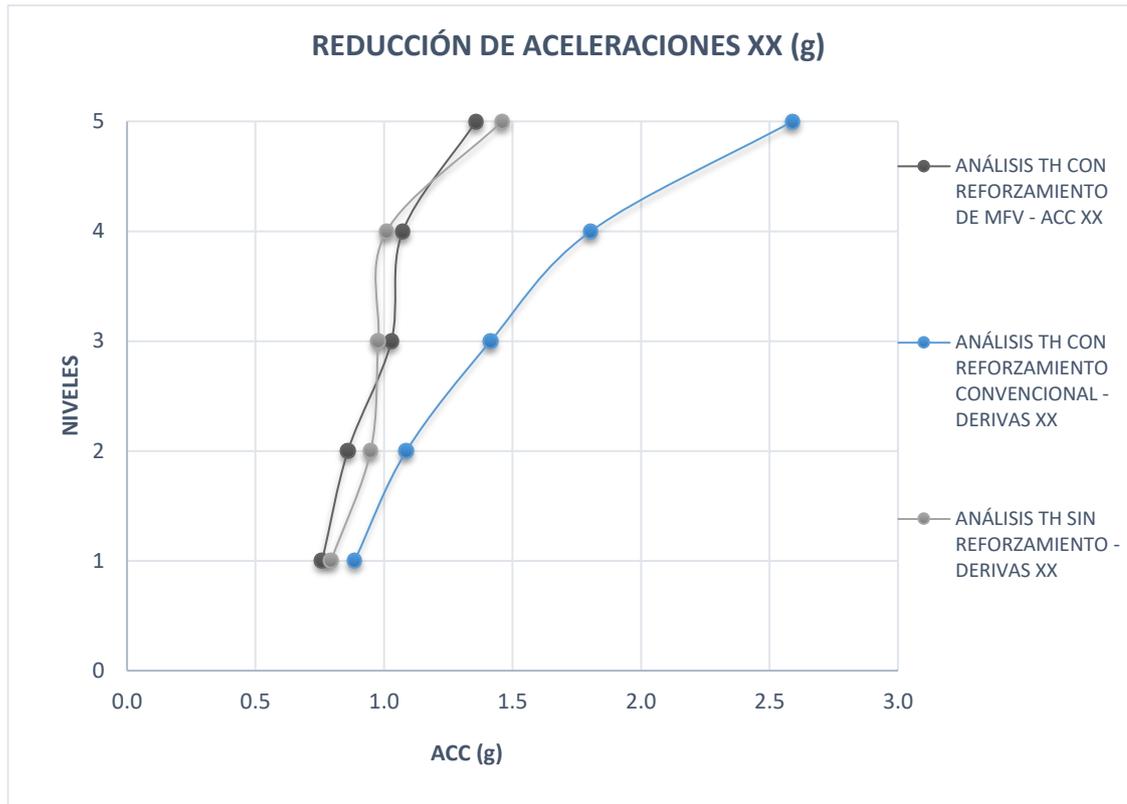


Figura N° 96 Reducción de aceleraciones en X a sismo máximo.

Tabla 70 Reducción de aceleraciones en Y a sismo máximo.

ACELERACIONES MÁXIMAS YY (g)			
	ATHNL	ATHL	ATHL
PISO	REFORZAMIENTO CON MFV	REFORZAMIENTO CONVENCIONAL	SIN REFORZAMIENTO
PISO 5	2.35	3.04	3.22
PISO 4	1.74	2.23	2.22
PISO 3	1.27	1.66	1.81
PISO 2	1.21	1.25	1.53
PISO 1	0.99	0.87	1.02

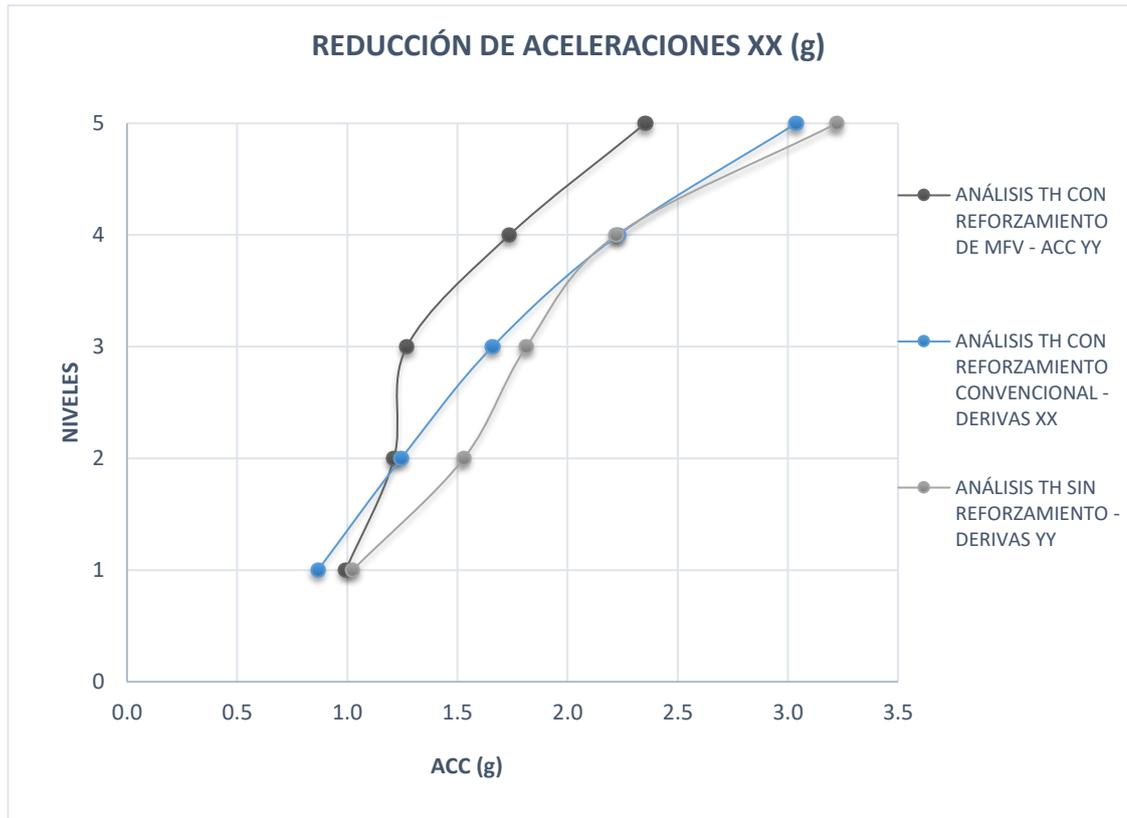


Figura N° 97 Reducción de aceleraciones en Y con muros de fluido viscoso a sismo máximo.

8.1.4 Análisis comparativo de energía disipada

Un balance de energía representado gráficamente permite apreciar la participación de los muros de fluido viscoso y de la estructura en la disipación de la energía total generada debido al sismo. Además, puede evaluarse la efectividad del sistema empleando los muros de fluido viscoso de acuerdo con la configuración empleada y a su distribución.

La energía disipada para los dos niveles de sismo se muestra en las Figura N° 98 y Figura N° 99.

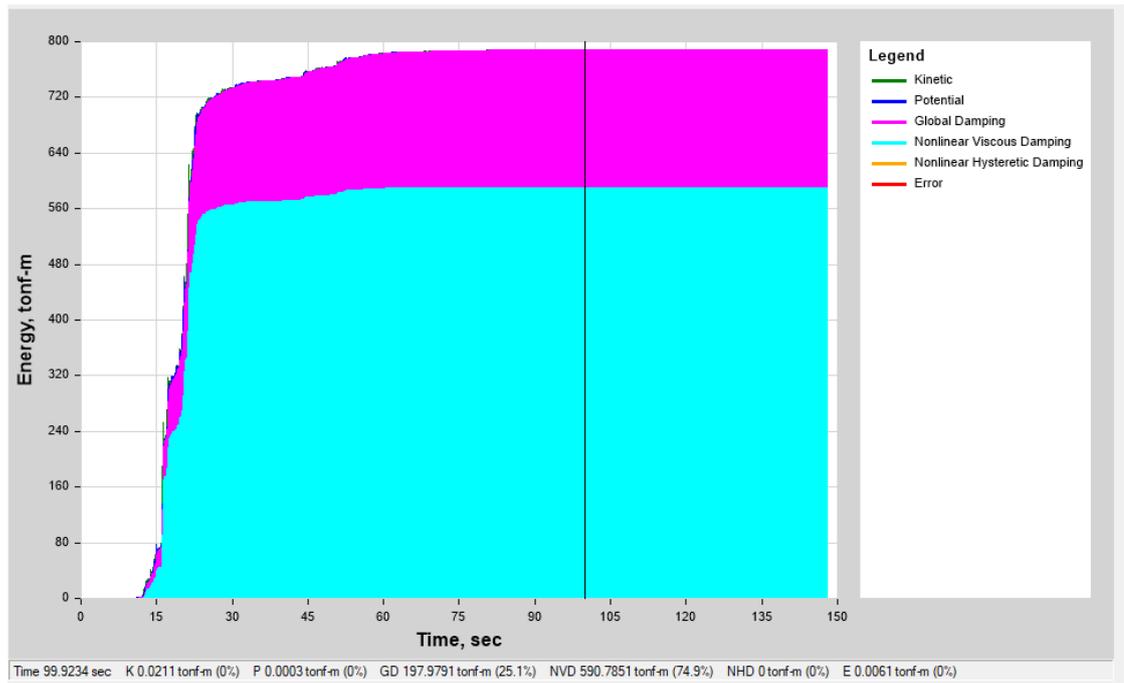


Figura N° 98 Disipación de energía a sismo máximo con muros de fluido viscoso.

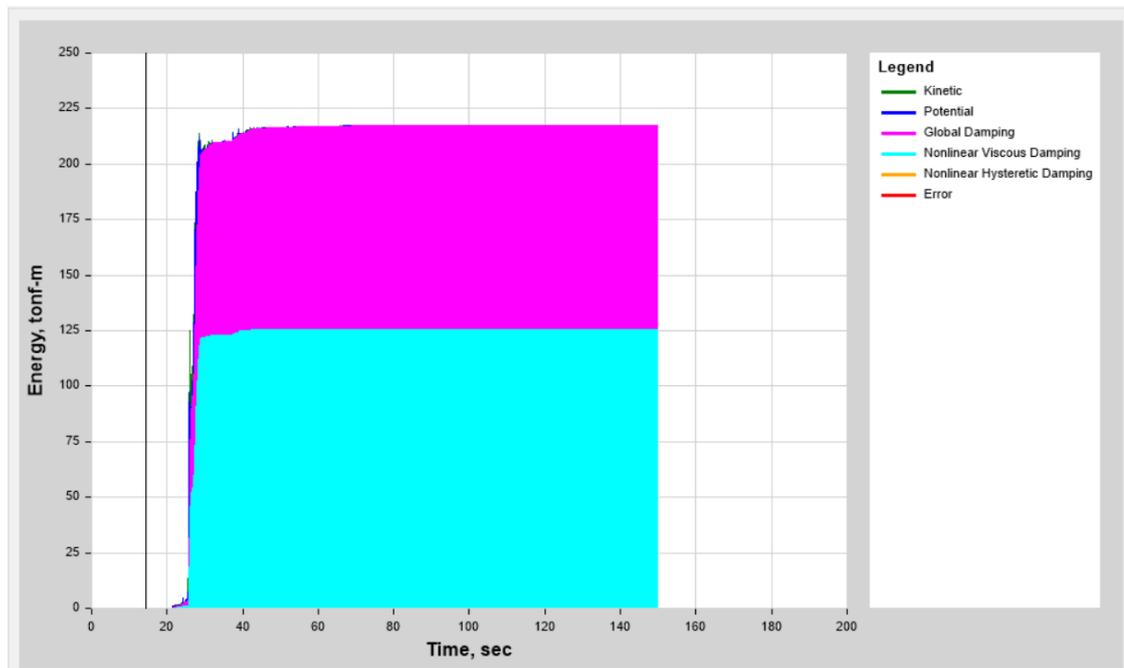


Figura N° 99 Disipación de energía a sismo de diseño con muros de fluido viscoso.

CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos de la presente tesis se puede concluir lo siguiente:

El edificio reforzado con muros de fluido viscoso tuvo un mejor comportamiento sísmico que el edificio con un reforzamiento mínimo, a través de muros estructurales, la influencia de los muros de fluido viscoso mostró una disminución significativa de las derivas en las dos direcciones de análisis, en la dirección X se logró una reducción del 48% y en la dirección Y del 44% para un nivel de sismo máximo.

Por otro lado, el reforzamiento del edificio con MFV ha logrado incrementar el nivel de amortiguamiento efectivo del sistema en 20% y se logró alcanzar un nivel de disipación de energía del orden del 75%.

De los resultados del análisis no lineal se ha podido comprobar el objetivo esperado de lograr un desempeño mayor al de seguridad de vida para un sismo máximo esperado al implementar los muros de fluido viscoso.

De la misma forma con los muros de fluido viscoso se logró una disminución significativa de las aceleraciones de piso en las dos direcciones de análisis, en la dirección X se logró una reducción del (20%) y en la dirección Y (30%) para un nivel de sismo máximo.

Comparando las fuerzas de corte del edificio con MFV con el edificio sin MFV, se puede indicar que las fuerzas de corte se redujeron en un 59%, debido al incremento del amortiguamiento. Sin embargo, para verificar la resistencia de los elementos estructurales se tuvo en cuenta que la cortante basal con MFV dinámica sea mayor o igual al 75% del cortante estático sin MFV según las indicaciones de la norma ASCE 7.

Todo el análisis de la estructura muestra que no hay modificación de los períodos de la estructura, pero si una reducción considerable de la respuesta de la estructura (desplazamiento, velocidad y aceleración). Todos estos resultados concluyen que los daños en los elementos estructurales debido a las cargas sísmicas pueden reducirse considerablemente.

El nivel de desempeño alcanzado con el sistema de muros de fluido viscoso es superior al nivel de seguridad de vida para un sismo máximo considerado algo que no se pudo alcanzar con el reforzamiento convencional.

RECOMENDACIONES

Para efectos de revisión de ensayos y dispositivos prototipos se recomienda solicitar a los fabricantes los documentos de obtención de sus factores de modificación de propiedades debidamente sustentado, los cuales deberán estar dentro de los límites establecidos en la ASCE-7 y en esta investigación.

Los muros de fluido viscoso son dispositivos que se pueden emplear en el análisis y diseño de edificaciones nuevas como existentes, su óptimo desempeño se logra en estructuras de mayor importancia por ello se recomienda aplicarlos en estructuras de gran área en planta y edificios altos.

Para un mejor procedimiento y análisis se recomienda previamente realizar un análisis tiempo historia de respuesta modal empleando un solo registro sísmico a la estructura sin muros viscosos y evaluar los desplazamientos y aceleraciones a sismo máximo, luego emplear el procedimiento de diseño del anexo 1 para determinar las propiedades iniciales a iterar en el análisis final.

Se recomienda siempre realizar un análisis tiempo historia no lineal a los dispositivos sísmicos ya que para su modelamiento se emplea parámetros no lineales.

Se recomienda siempre verificar las curvas histeréticas de cada uno de los dispositivos sísmicos durante el análisis tiempo historia con los amortiguadores y descartar aquellos que disipen menor cantidad de energía.

Emplear especificaciones técnicas teniendo en cuenta las propiedades dinámicas teóricas, límites de resultados de los ensayos, cargas máximas de ensayo, deformaciones axiales en los dispositivos a emplear, los factores de modificación de propiedades empleados en el diseño, tablas con las secuencias de ensayos a las que serán sometidas los muros viscosos indicando fuerzas y deformaciones. Valores límites de aceptación para los controles de calidad durante el ensayo.

Los muros de fluido viscoso se pueden emplear tanto en estructuras metálicas como de concreto armado y mixtas, para ello se recomienda tener en cuenta las dimensiones de los dispositivos de algunos proveedores como base de datos para compatibilizar los planos con otras especialidades como arquitectura.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, R. (2011). *El mega sismo de Chile 2010 y lecciones para Ecuador* (1.^a ed.). Fondo Editorial IPGH.
- American Society of Civil Engineers. (2016). *Minimum design loads and associated criteria for buildings and other structures* (ASCE-7). American Society of Civil Engineers.
- American Society of Civil Engineers. (2013). *Seismic evaluation and retrofit of existing buildings* (ASCE 41). American Society of Civil Engineers.
- Bozzo, L. M. (2019). *Diseño sismorresistente de edificios: Técnicas convencionales y avanzadas*. Editorial Reverté.
- Díaz La Rosa Sánchez, M. A. (2016). *Diseño de edificios sismorresistentes con disipadores de energía viscosos* [Tesis de pregrado, Universidad Privada Antenor Orrego].
- Dynamic Isolation Systems. (2016). *Viscous wall dampers: Guidelines for modeling*. http://www.dis-inc.com/products.html#viscous_wall_dampers
- Taylor, D. P. (2018). *Dampers: How viscous dampers protect structures*. Taylor Publishing.
- Farzard, N., & Kelly, J. M. (1999). *Design of seismic isolated structures: From theory to practice*. Universidad de California, Berkeley.
- Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings* (FEMA 356).
- Federal Emergency Management Agency. (2005). *Improvement of nonlinear static seismic analysis procedures* (FEMA 440).
- Gluck, J., Ribakov, Y., & Dancygier, A. N. (2000). Selective control of base-isolated structures with CS dampers. *Earthquake Spectra*, 16(3).
- Gresia Munayco, J. E. A. (2019). *Evaluación y comparación del desempeño sísmico de 3 edificaciones duales de concreto armado de diferentes alturas* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Guevara y Torres. (2012). *Diseño de un edificio aporticado con amortiguadores de fluido-viscoso en disposición diagonal* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- Heinz, P. (2019). *Análisis estructural y reforzamiento de un edificio irregular con disipadores histeréticos* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].

- Sasaki, K., Miyazaki, M., & Sawada, T. (2012). Characteristics of viscous wall dampers of intense oscillation test against large earthquakes. En *15th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE)*, Lisboa.
- Kelly, J. M. (1991). Base isolation: Linear theory and design. *Earthquake Spectra*. Universidad de California, Berkeley.
- Miyamoto, & Gilani, A. (2011). Performance-based engineering by using seismic dampers for improved performance and reduction in repair cost. *Miyamoto International*.
- Oviedo Sarmiento, R. A. (2008). *Dispositivos pasivos de disipación de energía para diseño sismorresistente de estructuras* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Palomino Romaní, G. M. (2019). *Verificación de la reducción de daños en edificios con disipadores sísmicos a través del análisis no lineal estático* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Ramirez, O. M. (2000). *Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems* [Tesis de doctorado, Universidad de Buffalo].
- Structural Engineers Association of California. (1995). *Vision 2000: Performance-based seismic engineering of buildings*.

ANEXOS

- ANEXO 1. DISEÑO DE MUROS DE FLUIDO VISCOSO (MFV).....143
- ANEXO 2. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN EN PYTHON.....153

ANEXO 1. DISEÑO DE MUROS DE FLUIDO VISCOSO (MFV)

AMORTIGUAMIENTO VISCOSO
E030-2018 / ASCE 7-22

1. Parámetros sísmicos

$Z := 0.45$	Zona sísmica del Perú
$U := 1.50$	Importancia del edificio
$S := 1.00$	Factor del suelo
$T_p := 0.40 \text{ s}$	
$T_L := 2.5 \text{ s}$	
$R := 6$	Coefficiente de reducción sísmica
$\Omega := 3$	Factor de sobre resistencia ASCE 7-16 Tabla 12.2.1
$C_d := \frac{3}{4} \cdot R = 4.5$	Factor de amplificación para comportamiento inelástico

2. Parámetros de iteración para el cálculo de las propiedades de los muros viscosos

$T := 0.800 \text{ s}$ Período fundamental de la estructura

$M := 484.83 \text{ tonnef} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}}$ Peso de la estructura

$K := 10765.04 \frac{\text{tonnef}}{\text{m}}$ Rigidez de la estructura

$\omega := \frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot \text{rad} = 7.85 \frac{1}{\text{s}}$ Frecuencia angular de vibración

$C_c := 2 \cdot \omega \cdot M = 7615.69 \frac{\text{tonnef} \cdot \text{s}}{\text{m}}$

$C := \begin{cases} \text{if } T < T_p & = 1.25 \\ \parallel 2.5 \\ \text{else if } T_p < T < T_L & \\ \parallel 2.5 \cdot \left(\frac{T_p}{T}\right) \\ \text{else} & \\ \parallel 2.5 \cdot \left(\frac{T_p \cdot T_L}{T^2}\right) \end{cases}$

$S_a := Z \cdot U \cdot C \cdot S \cdot g = 0.84 \text{ g}$

Aceleración espectral a sismo máximo (MCE)

$$S_d := \frac{S_a}{\omega^2} = 13.41 \text{ cm}$$

Desplazamiento espectral elástico a MCE

$$S_{dr} := \frac{S_d}{R} = 2.24 \text{ cm}$$

Desplazamiento espectral elástico reducido

$$S_{dy} := S_{dr} \cdot \Omega = 6.71 \text{ cm}$$

Desplazamiento de fluencia

$$S_{diseño} := S_{dr} \cdot C_d = 10.06 \text{ cm}$$

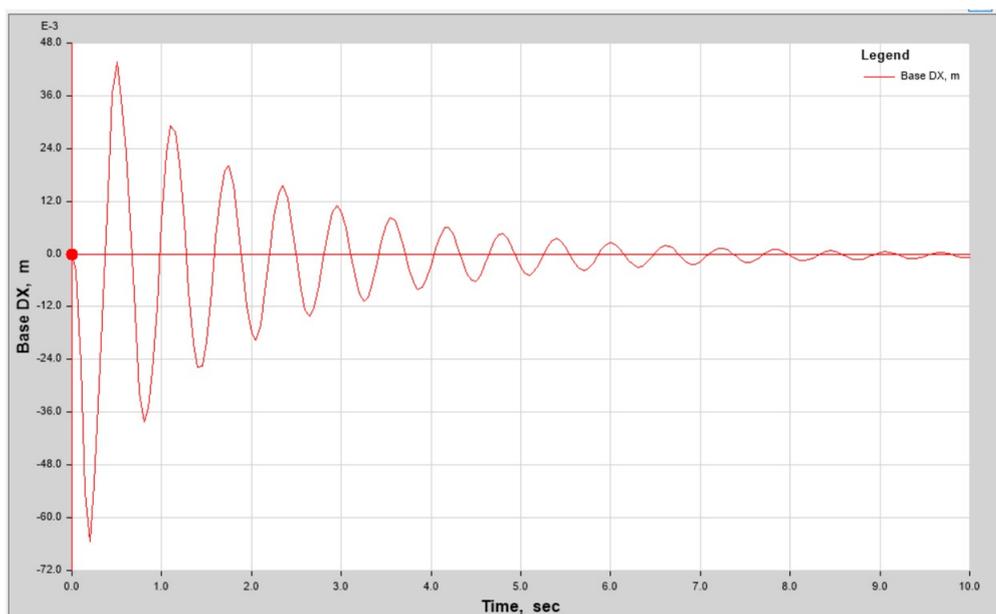
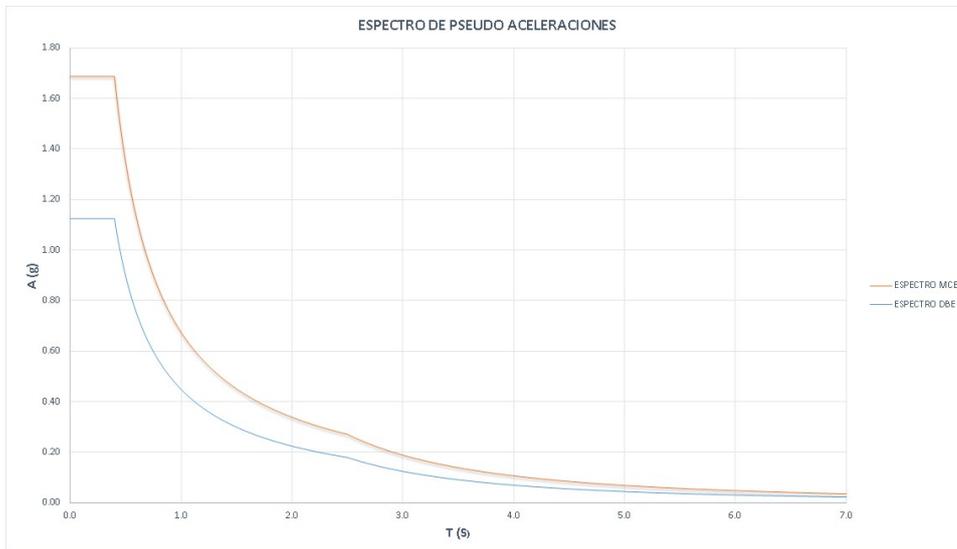
Desplazamiento de diseño

$$\mu := \frac{S_{diseño}}{S_{dy}} = 1.50$$

Ductilidad

$$F_y := \frac{M \cdot S_a}{R \cdot \Omega} = 222.87 \text{ tonnef}$$

Fuerza de fluencia



$$D_{max} := 0.0117$$

Deriva máxima

$$D_{obj} := 0.0065$$

Deriva objetivo

$$B := \frac{D_{max}}{D_{obj}} = 1.8$$

Coefficiente de reducción por amortiguamiento

$$\Delta_i := -0.000755 \quad r := 8$$

$$\Delta_{i_r} := -0.000059$$

$$\beta_I := 5.20$$

$$\beta_{mM} := e^{\left(\frac{2.31}{0.41} - \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_I)}{B \cdot 0.41} \right)} = 30.57$$

Amortiguamiento total efectivo del modo fundamental

Considerando una estructura elástica:

$$\beta_{eff} := \beta_{mM} = 30.57$$

Amortiguamiento total (viscoso + inherente)

$$\beta_I = 5.20$$

Amortiguamiento inherente

$$\beta_V := \beta_{eff} - \beta_I = 25.37$$

Amortiguamiento viscoso

$$C := \beta_V \cdot C_c = 193202.5 \frac{\text{tonnef} \cdot \text{s}}{\text{m}}$$

3. Amortiguamiento y desplazamiento inelástico:

$$q_H := 0.64 \cdot \frac{T_p}{T} = 0.32$$

Factor de ajuste de la curva histerética

$$q_H := \left\| \begin{array}{l} \text{if } q_H < 0.5 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} 0.5 \\ \text{else if } q_H > 1 \\ \quad \left\| \begin{array}{l} 1 \\ \text{else} \\ \quad \left\| q_H \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \right. = 0.5$$

$$\beta_{HM} := q_H \cdot \left(0.64 - \frac{\beta_I}{100} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) = 0.10$$

Amortiguamiento histerética de la estructura

$$T_M := T \cdot \sqrt{\mu} = 0.98 \text{ s}$$

Periodo modificado por la respuesta inelástica

$$\omega_M := \frac{2 \cdot \pi}{T_M} = 6.41 \frac{1}{\text{s}}$$

Frecuencia angular

$$C_M := \begin{cases} \text{if } T_M < T_p & = 1.02 \\ \left\| \begin{array}{l} 2.5 \\ \text{else if } T_p < T_M < T_L \\ \left\| \begin{array}{l} 2.5 \cdot \left(\frac{T_p}{T_M} \right) \\ \text{else} \\ \left\| \begin{array}{l} 2.5 \cdot \left(\frac{T_p \cdot T_L}{T_M^2} \right) \end{array} \right. \end{array} \right. \end{array} \end{cases}$$

$$S_{aM} := Z \cdot U \cdot C_M \cdot S \cdot g = 0.69 \text{ g}$$

Aceleración sísmica

$$S_{dM} := \frac{S_{aM}}{\omega_M^2} = 16.43 \text{ cm}$$

Desplazamiento elástico

$$B_{mM} := \frac{S_{dM}}{S_{\text{diseño}}} = 1.63$$

Coefficiente de reducción por amortiguamiento

$$\beta_{mM} := e^{\left(\frac{2.31}{0.41} - \frac{2.31 - 0.41 \cdot \ln(\beta_I)}{B \cdot 0.41} \right)} = 30.57$$

Amortiguamiento total
(viscoso + inherente + hysterético)

$$\beta_{VM} := \frac{(\beta_{mM} - \beta_I - \beta_{HM})}{\sqrt{\mu}} = 20.63$$

Amortiguamiento viscoso

$$M := \begin{bmatrix} 102.88 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 102.88 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 102.88 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 103.19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 72.99 \end{bmatrix} \text{ tonnef} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}} \quad \text{Matriz de masas}$$

$$\Phi := \begin{bmatrix} 0.0036 \\ 0.0102 \\ 0.0177 \\ 0.0248 \\ 0.0307 \end{bmatrix} \quad \phi_1 := \frac{\Phi}{\Phi_4} = \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.33 \\ 0.58 \\ 0.81 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Vectores de forma modal fundamental

$$\phi_r := \begin{bmatrix} \phi_{1_0} \\ \phi_{1_1} - \phi_{1_0} \\ \phi_{1_2} - \phi_{1_1} \\ \phi_{1_3} - \phi_{1_2} \\ \phi_{1_4} - \phi_{1_3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.12 \\ 0.21 \\ 0.24 \\ 0.23 \\ 0.19 \end{bmatrix}$$

Vector modales residuales

$$\theta := \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\cos(\theta) = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$I := \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\Gamma := \frac{\phi_1^T \cdot M \cdot I}{\phi_1^T \cdot M \cdot \phi_1} = 1.4$$

Factor de participación fundamental

$$B_M := \left(\frac{\beta_{mM}}{100} \right)^{0.3} = 1.72$$

Razón de amortiguamiento

$$A := \left(\frac{T_M^2}{4 \cdot \pi^2} \right) \cdot \frac{S_{aM}}{B_M} \cdot \Gamma = 13.35 \text{ cm}$$

$\lambda := 3.5$

$$\alpha := 0.5$$

$$C := \frac{\beta_{VM} \cdot 2 \cdot \pi \cdot A^{1-\alpha} \cdot \omega_M^{2-\alpha} \cdot (\phi_1^T \cdot M \cdot \phi_1)}{\lambda \cdot \phi_r^{1+\alpha} \cdot \cos(\theta)^{1+\alpha}} = 902.473 \text{ tonnef} \cdot \left(\frac{s}{m} \right)^{0.5}$$

$$Ci := \frac{C}{4} = 225.62 \text{ tonnef} \cdot \left(\frac{s}{m} \right)^{0.5}$$

Coefficiente de amortiguamiento

5. Fuerza de corte

$$S_{aB} := \frac{S_{aM}}{R \cdot B_M} = 0.65 \frac{m}{s^2}$$

Aceleración espectral reducida

$$\Gamma = 1.4$$

Factor de participación modal

$$S_{api} := \Gamma \cdot \phi_1 \cdot S_{aB} = \begin{bmatrix} 0.11 \\ 0.30 \\ 0.53 \\ 0.74 \\ 0.91 \end{bmatrix} \frac{m}{s^2}$$

Aceleración por niveles

$$Fi := M \cdot S_{api} = \begin{bmatrix} 11.03 \\ 31.26 \\ 54.25 \\ 76.25 \\ 66.76 \end{bmatrix} \text{ tonnef}$$

Fuerzas laterales de diseño

$$V_i := \begin{bmatrix} F_i_0 + F_i_1 + F_i_2 + F_i_3 + F_i_4 \\ F_i_1 + F_i_2 + F_i_3 + F_i_4 \\ F_i_2 + F_i_3 + F_i_4 \\ F_i_3 + F_i_4 \\ F_i_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 239.56 \\ 228.53 \\ 197.26 \\ 143.01 \\ 66.76 \end{bmatrix} \text{ tonnef}$$

Fuerza cortante mínima basal

$$V := 764.13 \text{ tonnef}$$

Fuerza de corte del análisis de FLE

$$V_{min1} := 0.75 \cdot V = 573.1 \text{ tonnef}$$

$$\beta_{VI} := \beta_{VM} + \beta_I = 25.83$$

$$B_{VI} := \left(\frac{\beta_{VI}}{100} \right)^{0.3} = 1.64$$

$$V_{min2} := \frac{V}{B_{VI}} = 466.88 \text{ tonnef}$$

$$V_{min} := \max(V_{min1}, V_{min2}) = 573.1 \text{ tonnef}$$

$$V_b := \max(V_i_0, V_{min}) = 573.1 \text{ tonnef}$$

$$V_b = 573.1 \text{ tonnef}$$

ANEXO 2. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN EN PYTHON

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN EN PYTHON

Código de programación en Python para analizar el espectro de respuesta para un modelo de un grado de libertad empleando una señal al incrementar el nivel de amortiguamiento:

```
import numpy as np

def Newmark(p, u0=0, v0=0, Tn=0.7, ζ=0.05, Δt=0.01, β=1/4, γ=1/2):
    """
    γ: parametro de presición, generalmente 1/2
    β: razón de la variacion de la aceleración, generalmente entre 1/4 y 1/6
        Para β=1/6, método de la aceleración lineal
        Para β=1/4, método de la aceleración de promedio constante

    El método es convergente si  $\Delta t/T_n < (1/\pi\sqrt{2}) [1/\sqrt{\gamma - 2\beta}]$ 

    """

    m=1.0
    k = m*(2*np.pi/Tn)**2
    Wn = 2*np.pi/Tn
    c = 2*ζ*m*Wn

    x1 = m/(β*Δt**2) + γ*c/(β*Δt)
    x2 = m/(β*Δt) + (γ/β - 1)*c
    x3 = (1/(2*β) - 1)*m + Δt*(γ/(2*β) - 1)*c
    kt = k + x1
    ##

    u = np.zeros(len(p))
    u[0] = u0
    v = np.zeros(len(p))
    v[0] = v0
    a = np.zeros(len(p))
    a[0] = (p[0] - c*v0 - k*u0)/m

    for i in range(len(p)-1):
        pti_1 = p[i+1] + x1*u[i] + x2*v[i] + x3*a[i]
        u[i+1] = pti_1/kt
        v[i+1] = ( γ/(β*Δt) )*(u[i+1] - u[i]) + (1 - γ/β)*v[i] + Δt*( 1 - γ/(2*β) )*a[i]
        a[i+1] = (u[i+1] - u[i])/(β*Δt**2) - v[i]/(β*Δt) - ( 1/(2*β) - 1 )*a[i]

    return u,v,a

def tridiag(b=2.1, n=5):
    aa=[-b for i in range(n-1)]
    bb=[2*b for i in range(n)]
    bb[-1]=b
    cc=[-b for i in range(n-1)]
    return np.diag(aa, -1) + np.diag(bb, 0) + np.diag(cc, 1)
```

```

##### RESPUESTA DE 1GDL #####

ug=np.genfromtxt("./Lima 70 EW.txt")
dt=0.01
N=len(ug)
t=[i*dt for i in range(N)]

x, xp, xpp = fun.Newmark(-ug, Tn=0.7, ζ=0.35, Δt=dt, β=1/4, γ=1/2)

plt.plot(t, ug, lw=0.6)
plt.plot(t, xpp+ug, lw=0.6, alpha=0.4)
plt.title("Respuesta de 1GDL para Tn=0.7")
plt.show()

```

```

##### ESPECTRO DE RESPUESTA #####

T=[t*0.01 for t in range(1,200)]
PGA=np.amax(np.abs(ug))
ER5=[PGA]
ER15=[PGA]
ER25=[PGA]
ER35=[PGA]

start=time.time()

for t in T[1:200]:
    x, xp, xpp = fun.Newmark(-ug, Tn=t, ζ=0.05, Δt=dt, β=1/4, γ=1/2)
    rmax=np.amax(np.abs(xpp+ug))
    ER5.append(rmax)
for t in T[1:200]:
    x, xp, xpp = fun.Newmark(-ug, Tn=t, ζ=0.15, Δt=dt, β=1/4, γ=1/2)
    rmax=np.amax(np.abs(xpp+ug))
    ER15.append(rmax)
for t in T[1:200]:
    x, xp, xpp = fun.Newmark(-ug, Tn=t, ζ=0.25, Δt=dt, β=1/4, γ=1/2)
    rmax=np.amax(np.abs(xpp+ug))
    ER25.append(rmax)
for t in T[1:200]:
    x, xp, xpp = fun.Newmark(-ug, Tn=t, ζ=0.35, Δt=dt, β=1/4, γ=1/2)
    rmax=np.amax(np.abs(xpp+ug))
    ER35.append(rmax)

print("se demoró (s):", time.time()-start)

plt.plot(T, ER5)
plt.plot(T, ER15)
plt.plot(T, ER25)
plt.plot(T, ER35)
plt.title("Espectro de respuesta")
plt.show()

```