



Evaluación del desempeño de una edificación con dos tipos de disipadores sísmicos controlados por deformación (TADAS y arriostramiento restringido al pandeo) frente a diversos eventos sísmicos.

Rómulo Andrés Guerrero Cuervo

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2022

Evaluación del desempeño de una edificación con dos tipos de disipadores sísmicos controlados por deformación (TADAS y arriostramiento restringido al pandeo) frente a diversos eventos sísmicos.

Rómulo Andrés Guerrero Cuervo

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería-Estructuras

Director:

Ph.D. Gabriel Andrés Bernal Granados

Codirectora:

Ph.D. Maritzabel Molina Herrena

Línea de Investigación:

Análisis Estructural

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola
Bogotá, Colombia
2022

*A mi sobrino Thomas,
que su alegría nunca termine*

Agradecimientos

Agradezco a mis padres y hermana por acompañarme durante todo el proceso de mi formación académica, indicándome siempre el mejor camino por cursar durante toda mi vida. También agradezco a mi sobrino por brindarme siempre compañía y alegría cuando más se necesita.

Agradezco a todos los compañeros de la Universidad Nacional de los cuales aprendí tanto durante toda mi formación. A mis amigas Fernanda y Erika que me tuvieron siempre tanta paciencia y me acompañaron siempre en este recorrido. Y también a Juan David Velásquez y Hugo Cano por permitirme continuar las líneas de investigación que ellos iniciaron, y por la colaboración en la investigación.

A todos los profesores de la Universidad Nacional por sus enseñanzas en todos los aspectos, y en especial a los Ingenieros Maritzabel Molina y Gabriel Bernal por guiarme adecuadamente en la realización de la presente investigación y permitirme culminar con éxito este gran reto.

Por último, agradezco a la Universidad Nacional por permitirme cursar el camino de la formación académica siempre dentro de sus aulas, tanto a nivel de pregrado como ahora en el nivel de posgrado.

Resumen

Evaluación del desempeño de una edificación con dos tipos de disipadores sísmicos controlados por deformación (TADAS y arriostramiento restringido al pandeo) frente a diversos eventos sísmicos.

Dentro del contexto actual del diseño de edificaciones las técnicas de control sísmico cada día tienen mayor importancia, dado que con los dispositivos disipadores o aisladores se puede controlar la respuesta de la edificación ante eventos sísmicos. Igualmente, los códigos de construcción sismorresistente se están proyectando hacia una perspectiva de evaluación del desempeño, en donde el diseño no se limita al caso del sismo de diseño, sino que, según los objetivos marcados para la estructura, se evalúa su desempeño ante diversos escenarios sísmicos, incluyendo eventos extremos.

En esta investigación, se integraron los dos aspectos mencionados en una metodología basada en la simulación de movimiento fuerte por sismos extremos y la evaluación del desempeño de edificaciones en concreto reforzado sometidas a esta demanda sísmica. Específicamente se analizaron tres edificaciones de 12 niveles con irregularidad en planta y geometrías iguales, como se describe a continuación: i) una primera edificación convencional en pórticos de concreto reforzado resistentes a momento (sin sistema de protección), ii) una edificación también en pórticos con disipadores histeréticos metálicos triangulares (TADAS¹) controlados por deformación y, iii) una última edificación con disipadores de riostras de pandeo restringido (BRB²) también controladas por deformación. Las edificaciones se asumieron ubicadas en la ciudad de Popayán y fueron inicialmente diseñadas siguiendo la norma NSR 10.

Posteriormente, y basándose en los fundamentos del análisis no lineal dinámico, se realizó la evaluación del desempeño de cada edificación frente a la acción de 5 eventos sísmicos extremos simulados por medio de un enfoque sismológico de fuente finita, compatibles con la amenaza en roca de la ubicación seleccionada, y transitados hasta superficie por medio de un modelo unidimensional no lineal de respuesta de suelos blandos correspondiente al modelo geotécnico vigente aplicado en la microzonificación sísmica de Popayán.

Palabras clave: Disipadores sísmicos, desempeño, acelerogramas sintéticos, Análisis no lineal dinámico cronológico, TADAS y BRB.

¹ Por sus siglas en inglés “Triangular Plate Added Damping and Stiffness”.

² Por sus siglas en inglés “Buckling Restrained Braces”.

Abstract

PERFORMANCE EVALUATION OF A BUILDING DESIGNED WITH TWO TYPES OF SEISMIC DISSIPATORS CONTROLLED BY DEFORMATION (TADAS Y BRB) ON EXTREME SEISMIC EVENTS.

In the context of building design, seismic control techniques are becoming more important every day, since dissipating or isolating devices can control the response of the building to seismic events. Earthquake-resistant construction codes are being projected towards a performance evaluation perspective, where the design is not limited to the case of the design earthquake. According to the objectives set for the structure, its performance is evaluated in various scenarios. seismic, including extreme events.

In this research, the two aspects mentioned were integrated into a methodology based on the simulation of strong movements due to extreme earthquakes and the evaluation of the performance of reinforced concrete buildings subjected to this seismic demand. Three buildings of 12 levels with irregularity in plan and equal geometries were analyzed, as described below: i) a first conventional building in reinforced concrete moment frames (without protection system), ii) a building also in frames with triangular metallic hysteretic dampers (TADAS) controlled by deformation and, iii) a last building with restrained buckling brace dampers (BRB) also controlled by deformation. The buildings were assumed to be located in the city of Popayán and were initially designed following the NSR 10 standard.

Subsequently, and based on the fundamentals of dynamic nonlinear analysis, the performance of each building was evaluated against the action of 5 seismic events extremes simulated using a finite source seismological approach, compatible with the rock threat of the selected location, and transited to the surface by means of a one-dimensional non-linear model of soft soil response corresponding to the current geotechnical model applied in the seismic microzoning of Popayán.

Keywords: Seismic dissipators, Synthetic accelerogram, Performance, Non-linear Dynamic analysis, TADAS and BRB.

Contenido

Introducción	33
Objetivos	35
Objetivo general	35
Objetivos específicos	35
Capítulo I	39
1 Estado del arte	40
1.1 Contexto del diseño y la normativa sismorresistente en el país	40
1.2 Evaluación del desempeño	41
1.3 Sistemas de protección sísmica en edificaciones	42
Capítulo II	46
2 Marco Teórico	46
2.1 Lineamientos sobre evaluación del desempeño y generación de eventos sísmicos	46
2.1.1 Evaluación del desempeño	47
2.1.2 Generación de acelerogramas y respuesta de sitio	51
2.1.3 Análisis no lineal dinámico cronológico	54
2.2 Disipadores histeréticos metálicos del tipo TADAS	55
2.2.1 Funcionamiento de los disipadores tipo TADAS	55
2.2.2 Comportamiento teórico del dispositivo TADAS	58
2.3 Disipadores de arriostramiento restringido de pandeo (BRB)	62
2.3.1 Funcionamiento de los disipadores BRB	62
2.3.2 Comportamiento teórico de los dispositivos BRB	64
2.4 Requerimientos y normativa para el diseño de estructuras con disipadores	67
2.4.1 Parámetros para estructuras con disipadores según ASCE-7-16	67
2.4.2 Enfoque de diseño de Oviedo para estructuras con disipadores	69
2.4.3 Análisis no lineal estático de plastificación progresiva (<i>Push over</i>)	71
Capítulo III	72
3 Modelación de los disipadores	72
3.1 Modelación de los disipadores tipo TADAS	73
3.1.1 Simulación numérica del comportamiento de los disipadores TADAS	73

3.1.2	Calibración de dispositivos TADAS como elemento <i>frame</i> con rótulas	79
3.2	Modelación de los disipadores tipo BRB	83
3.2.1	Calibración de dispositivos BRB como elemento <i>link</i> (modelo Wen)	83
3.2.2	Propuesta de modelación de dispositivos BRB como elemento <i>frame</i> con propiedades inelásticas controladas por fuerza.	87
3.2.3	Comparación de funcionamiento de los modelos de dispositivos BRB	93
3.3	Estudio de localización de los Disipadores en estructuras tipo pórtico	96
3.3.1	Localización de disipadores tipo TADAS	97
3.3.2	Localización de disipadores tipo BRB	100
Capítulo IV		102
4	Metodología para el diseño de edificaciones con disipadores tipo TADAS, con disipadores tipo BRB y con sistema de pórticos, y para la evaluación del desempeño ante eventos sísmicos extremos	102
4.1	Análisis y diseño estructural de las edificaciones	105
4.1.1	Metodología de diseño para edificaciones con disipadores (ASCE-7-16)	105
4.1.2	Definición de las características de disipadores TADAS	130
4.1.3	Definición de las características de disipadores BRB	134
4.1.4	Análisis y diseño de la edificación en concreto reforzado con sistema de pórticos	136
4.2	Definición de los escenarios sísmicos y evaluación del desempeño	138
4.2.1	Metodología para definición de escenarios sísmicos	138
4.2.2	Análisis no lineal dinámico cronológico	141
4.2.3	Evaluación del desempeño	144
CAPÍTULO V		148
5	Configuración de las estructuras y su ubicación	148
5.1	Definición de características geométricas (altura y planta)	149
5.2	Selección de ubicación y características del suelo	150
5.3	Definición de cargas	151
5.3.1	Carga muerta	151
5.3.2	Carga viva	153
5.3.3	Carga sísmica	153
5.4	Propiedades de los materiales	154
5.5	Selección de fuentes generadoras de eventos	154

Capítulo VI.....	156
6 Análisis y diseño estructural	156
6.1 Análisis y diseño estructural de la edificación con disipadores TADAS.....	157
6.1.1 Prediseño de la estructura principal.....	157
6.1.2 Definición de las características de los disipadores TADAS.....	185
6.1.3 Verificación del diseño de la edificación con disipadores TADAS.....	200
6.2 Análisis y diseño estructural de la edificación con disipadores BRB.....	226
6.2.1 Prediseño de la estructural principal.....	227
6.2.2 Definición de las características de los disipadores BRB	232
6.2.3 Verificaciones del diseño de la edificación con disipadores BRB.....	244
6.3 Análisis y diseño estructural de la edificación en concreto reforzado con sistema de pórticos	267
6.3.1 Análisis y diseño estructural de la edificación de concreto reforzado con sistema de pórticos.....	267
6.3.2 Análisis de plastificación progresiva push over de la estructura en concreto reforzado con solo sistema de pórticos.....	277
CAPITULO VII.....	280
7 Análisis no lineal dinámico cronológico y evaluación de desempeño para los escenarios sísmicos planteados	280
7.1 Definición de eventos sísmicos.....	281
7.1.1 Selección de eventos significativos para cada fuente	281
7.1.2 Simulación de movimiento fuerte y generación de acelerogramas en el sitio	282
7.1.3 Verificación de los sismos obtenidos y tratamiento de la señal.....	291
7.1.4 Acelerogramas definidos para los escenarios sísmicos	294
7.2 Análisis no lineal dinámico cronológico	296
7.2.1 Estudio de objetividad de los métodos de integración directa.....	296
7.2.2 Realización de los análisis para cada evento sísmico definido en las estructuras propuestas.....	300
7.3 Evaluación del desempeño	310
7.3.1 Punto de desempeño.....	310
7.3.2 Estados de plastificación y niveles de desempeño	322
7.3.3 Energía disipada por amortiguación.....	328

Capítulo VIII.....	333
8 Análisis de resultados.....	333
8.1 Análisis comparativo de la configuración de diseño de las edificaciones	334
8.1.1 Propiedades del análisis modal	334
8.1.2 Comparación de derivas obtenidas por el análisis modal espectral.....	335
8.1.3 Propiedades de amortiguamiento.....	336
8.1.4 Comparación de masa.....	338
8.2 Análisis de resultados para la capacidad de diseño.....	339
8.2.1 Capacidad de las estructuras	339
8.2.2 Comparación de la capacidad en formato ADRS y punto de desempeño	342
8.2.3 Comparación del estado de plastificación en el punto de desempeño	344
8.3 Análisis de resultados del desempeño de las tres edificaciones ante los eventos sísmicos.....	353
8.3.1 Comparación de la capacidad en los eventos sísmicos frente a la capacidad de diseño 353	
8.3.2 Comparación de estados de plastificación de las estructuras en los eventos sísmicos frente al estado de plastificación de la capacidad de diseño	364
8.3.3 Comparación de respuestas estructurales en las edificaciones ante los eventos sísmicos	386
8.3.4 Comparación del estado de plastificación de las edificaciones ante los eventos sísmicos. 405	
8.3.5 Comparación de la energía de disipación por amortiguación.....	433
8.4 Evaluación y análisis de costos	439
8.4.1 Evaluación de costos Iniciales	439
8.4.2 Evaluación de costos de reparación para cada escenario sísmicos	443
8.4.3 Análisis comparativo de costos de las tres edificaciones respecto a los eventos sísmicos 448	
8.5 Comparación adicional de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño ..	453
8.5.1 Comparación del prediseño frente a las edificaciones con disipadores en la etapa de diseño	455
8.5.2 Comparación del prediseño frente a las edificaciones con disipadores ante los eventos sísmicos	465
Capítulo IX.....	480

9	Conclusiones.....	480
9.1	Conclusiones generales.....	480
9.2	Conclusiones de la etapa de diseño.....	482
9.3	Conclusiones de la etapa de evaluación de desempeño	483
9.4	Recomendaciones.....	484
	Bibliografía.....	487
	Anexos.....	489

Lista de tablas

Tabla 2-1 Niveles de desempeño y descripción cualitativa del daño asociado	50
Tabla 2-2 Niveles de desempeño (ATC, 1996)	51
Tabla 2-3 Parámetros para el punto de fluencia en las platinas del TADAS (Cano, 2020)	61
Tabla 2-4 Parámetros para el punto de fluencia en las platinas del TADAS (Cano, 2020)	62
Tabla 3-1 Propiedades de las riostras BRB de la investigación de (Cancelado, 2013) utilizadas para la calibración del elemento Link	85
Tabla 3-2 Valor del último para las zonas elástica y plástica del BRB-1	91
Tabla 3-3 Valor del punto de fluencia y punto último para el BRB-1	91
Tabla 3-4 Definición de rotula plástica para el modelo BRB-1	92
Tabla 4-1 Coeficientes de amortiguamiento (Tomado del ASCE-7-16-C.18)	125
Tabla 5-1 Propiedades generales del perfil del suelo de la ubicación	151
Tabla 5-2 Carga por peso propio de la losa aligerada	152
Tabla 5-3 Carga muerta sobreimpuesta entrepiso	152
Tabla 5-4 Carga muerta sobreimpuesta cubierta	152
Tabla 5-5 Referencias para valores de carga muerta	152
Tabla 5-6 Carga Viva	153
Tabla 5-7 Propiedades de los materiales	154
Tabla 5-8 Fuentes sismogénicas seleccionadas para los análisis	156
Tabla 6-1 Alturas mínimas para vigas según título C	158
Tabla 6-2 Secciones propuestas para las vigas	158
Tabla 6-3 Secciones propuestas para las columnas	158
Tabla 6-4 Dirección de la dimensión mayor para las columnas perimetrales	160
Tabla 6-5 Periodos fundamentales obtenidos para el prediseño	161
Tabla 6-6 Periodos y participación de masa para el análisis modal del prediseño	162
Tabla 6-7 Peso por carga muerta no estructural	162
Tabla 6-8 Peso propio de la estructura para entrepiso	162
Tabla 6-9 Peso propio para la estructura cubierta	163
Tabla 6-10 Peso total de la edificación	163
Tabla 6-11 Cortante en la base por el método de fuerza horizontal equivalente	163
Tabla 6-12 Comprobación de participación de cortante para el análisis modal espectral	163
Tabla 6-13 Extremo con mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X	165
Tabla 6-14 Extremo opuesto al de mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X	165
Tabla 6-15 Extremo con mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección Y	166
Tabla 6-16 Extremo opuesto al de mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección Y	166
Tabla 6-17 Evaluación de irregularidad torsional para el análisis modal espectral en dirección X	167
Tabla 6-18 Evaluación de irregularidad torsional para el análisis modal espectral en dirección Y	167
Tabla 6-19 Evaluación del índice de estabilidad en la dirección X	168
Tabla 6-20 Evaluación del índice de estabilidad en la dirección Y	169
Tabla 6-21 Cargas de diseño críticas para las vigas perimetrales	170
Tabla 6-22 Cargas de diseño críticas para vigas internas	170
Tabla 6-23 Refuerzo propuesta para las secciones de vigas perimetrales	171
Tabla 6-24 Refuerzo propuesto para las secciones de vigas internas	171

Tabla 6-25 Refuerzo propuesto para las vigas perimetrales en donde se instalarán los disipadores TADAS	172
Tabla 6-26 Cuantías de refuerzo propuestas para columnas internas	172
Tabla 6-27 Cuantías de refuerzo propuestas para columnas perimetrales.....	172
Tabla 6-28 Asignación de cuantías de refuerzo para las columnas de la estructura principal	173
Tabla 6-29 Punto de fluencia y último para momento negativo en la VG-1	175
Tabla 6-30 Punto de fluencia y último para momento positivo en la VG-1.....	176
Tabla 6-31 Diagrama momento-rotación normalizado para la VG-1 (Perimetral sin disipadores)	178
Tabla 6-32 Diagrama momento-rotación normalizado para columna 0.7 x 0.7 (1.7%) carga máxima-0°	180
Tabla 6-33 Diagrama momento-rotación normalizado para columna 0.7 x 0.7 (1.7%) carga máxima-45°	181
Tabla 6-34 Diagrama momento-rotación normalizado para columna 0.7 x 0.7 (1.7%) carga mínima-0°	181
Tabla 6-35 Diagrama momento-rotación normalizado para columna 0.7 x 0.7 (1.7%) carga mínima-45°	181
Tabla 6-36 Límites de aceptación para los niveles de desempeño según ASCE-41-13.....	182
Tabla 6-37 Valores de deriva y cortante de fluencia en cada nivel para el prediseño de la estructura principal.....	186
Tabla 6-38 Definición características sistemas de disipación (Niveles 1-6)	190
Tabla 6-39 Definición características sistemas de disipación (Niveles 7-12).....	191
Tabla 6-40 Características geométricas para las platinas TADAS en la dirección X	193
Tabla 6-41 Características mecánicas para las platinas TADAS en la dirección X.....	193
Tabla 6-42 Diagrama de momento-rotación para los TADAS en el nivel 1 dirección X	195
Tabla 6-43 Modos y periodos en la dirección X del análisis modal para la estructura con disipadores TADAS.....	201
Tabla 6-44 Matriz de modos de vibración en la dirección X.....	202
Tabla 6-45 Peso de la edificación total para la estructura con disipadores TADAS	202
Tabla 6-46 Parámetros de masa efectiva y factor de participación para los modos en dirección X del análisis modal	202
Tabla 6-47 Valores de ductilidad asumidos para la dirección X.....	203
Tabla 6-48 Valores de desplazamiento y aceleración espectral para los modos de análisis en la dirección X.....	204
Tabla 6-49 Desplazamientos en la estructura principal para el análisis en la dirección X.....	204
Tabla 6-50 Fuerzas en la estructura principal para el análisis en la dirección X	204
Tabla 6-51 Desplazamientos relativos en las platinas TADAS en la dirección X	205
Tabla 6-52 Desplazamientos relativos en las riostras de los dispositivos para la dirección X	206
Tabla 6-53 Fuerzas en las platinas TADAS para la dirección X	207
Tabla 6-54 Fuerzas en las riostras de los dispositivos para la dirección X	208
Tabla 6-55 Trabajo en la estructura principal	208
Tabla 6-56 Trabajo en las platinas TADAS para la dirección X	209
Tabla 6-57 Trabajo total en el sistema de disipación para la dirección X.....	210
Tabla 6-58 Amortiguamiento viscoso para los 4 modos de análisis en la dirección X.....	210
Tabla 6-59 Amortiguamiento efectivo total por modo para la dirección X.....	211
Tabla 6-60 Coeficientes de amortiguamiento para la dirección X.....	211
Tabla 6-61 Cortante en la base para cada modo considerando en el análisis modal espectral en la dirección X.....	213
Tabla 6-62 Fuerzas laterales por piso y modo para el análisis modal espectral en la dirección X	214
Tabla 6-63 Cortantes por nivel y modo para el análisis modal espectral en dirección X	215

Tabla 6-64 Fuerzas laterales y cortante de diseño obtenidos para el análisis modal espectral en la dirección X.....	215
Tabla 6-65 Desplazamientos de techo para el sismo MCD en el análisis modal espectral en la dirección X	215
Tabla 6-66 Desplazamientos de techo para el sismo MCE en el análisis modal espectral en la dirección X	215
Tabla 6-67 Desplazamientos por nivel y modo para el análisis modal espectral en dirección X del sismo MCD	216
Tabla 6-68 Desplazamientos por nivel y modo para el análisis modal espectral en dirección X del sismo MCE	217
Tabla 6-69 Derivas por nivel y modo para el análisis modal espectral en dirección X del sismo MCD	217
Tabla 6-70 Derivas por nivel y modo para el análisis modal espectral en dirección X del sismo MCE	217
Tabla 6-71 Derivas de piso para el sismo MCD resultantes del análisis modal espectral en dirección X	218
Tabla 6-72 Derivas de piso para el sismo MCE resultantes del análisis modal espectral en dirección X	218
Tabla 6-73 Verificación del sistema de disipación para la dirección X y para el sismo MCD	219
Tabla 6-74 Verificación del sistema de disipación para la dirección X y para el sismo MCE	220
Tabla 6-75 Periodos fundamentales obtenidos para la edificación con disipadores TADAS	220
Tabla 6-76 Periodos y participación de masa para el análisis modal de la estructura con disipadores TADAS.....	221
Tabla 6-77 Peso total de la edificación con disipadores TADAS	221
Tabla 6-78 Cortante en la base por el método de la fuerza horizontal para la edificación con disipadores TADAS.....	221
Tabla 6-79 Comprobación de participación de cortante para el análisis modal espectral de la estructura con disipadores TADAS.....	222
Tabla 6-80 Extremo con mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X de la edificación con disipadores TADAS.....	222
Tabla 6-81 Extremo opuesto al de mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X de la edificación con disipadores TADAS	223
Tabla 6-82 Extremo con mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección Y de la edificación con disipadores TADAS.....	223
Tabla 6-83 Extremo opuesto al de mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X de la edificación con disipadores TADAS	224
Tabla 6-84 Evaluación de irregularidad torsional para el análisis modal espectral en dirección X para la estructura con disipadores TADAS	224
Tabla 6-85 Evaluación de irregularidad torsional para el análisis modal espectral en dirección Y para la estructura con disipadores TADAS	225
Tabla 6-86 Evaluación del índice de estabilidad en la dirección X para la estructura con disipadores TADAS.....	225
Tabla 6-87Evaluación del índice de estabilidad en la dirección Y para la estructura con disipadores TADAS.....	226
Tabla 6-88 Cuantías de refuerzo propuestas para columnas perimetrales para la edificación con BRB ...	227
Tabla 6-89 Asignación de cuantías de refuerzo para las columnas de la estructura principal de la edificación con BRB	228
Tabla 6-90 Valores de deriva y cortante de fluencia en cada nivel para el prediseño de la estructura principal de la edificación con BRB	232

Tabla 6-91 Diseño de los arriostramientos BRB como sistema de disipación para la dirección X (Niveles 1-6)	237
Tabla 6-92 Diseño de los arriostramientos BRB como sistema de disipación para la dirección X (Niveles 7-12).....	238
Tabla 6-93 Punto de fluencia y punto último para elemento frame que simula el comportamiento del BRB (N1-dirección X)	241
Tabla 6-94 Diagrama fuerza-desplazamiento para los BRB para nivel 1 y dirección X	241
Tabla 6-95 Modos y periodos en la dirección X del análisis modal para la estructura con disipadores BRB	245
Tabla 6-96 Matriz de modos de vibración en la dirección X	245
Tabla 6-97 Peso de la edificación total para la estructura con disipadores BRB	246
Tabla 6-98 Parámetros de masa efectiva y factor de participación para los modos en dirección X del análisis modal	246
Tabla 6-99 Valores de ductilidad asumidos para la dirección X (BRB)	246
Tabla 6-100 Valores de desplazamiento y aceleración espectral para los modos de análisis en la dirección X.....	247
Tabla 6-101 Desplazamientos en la estructura principal para el análisis en la dirección X	248
Tabla 6-102 Fuerzas en la estructura principal para el análisis en la dirección X	248
Tabla 6-103 Desplazamientos relativos en las riostras BRB en la dirección X.....	249
Tabla 6-104 Propiedades recalculadas para los disipadores BRB en dirección X	250
Tabla 6-105 Fuerzas en las riostras BRB para la dirección X	250
Tabla 6-106 Trabajo en la estructura principal	251
Tabla 6-107 Trabajo total en el sistema de disipación BRB para la dirección X.....	252
Tabla 6-108 Amortiguamiento viscoso para los 4 modos de análisis en la dirección X para edificio con BRB.....	252
Tabla 6-109 Amortiguamiento efectivo total por modo para la dirección X en el edificio con BRB	253
Tabla 6-110 Coeficientes de amortiguamiento para el análisis en dirección X de la edificación con BRB	253
Tabla 6-111 Cortante en la base para cada modo considerando en el análisis modal espectral en la dirección X para edificación con BRB.....	254
Tabla 6-112 Fuerzas laterales por piso y modo para el análisis modal espectral en la dirección X para edificación con BRB	255
Tabla 6-113 Cortantes por piso y modo para el análisis modal espectral en la dirección X para edificación con BRB	255
Tabla 6-114 Fuerzas laterales y cortante de diseño obtenidos para el análisis modal espectral en la dirección X para la edificación con BRB	256
Tabla 6-115 Desplazamientos de techo para el sismo MCD en el análisis modal espectral en la dirección X para edificación con BRB	256
Tabla 6-116 Desplazamientos de techo para el sismo MCE en el análisis modal espectral en la dirección X para edificación con BRB	256
Tabla 6-117 Desplazamientos por nivel y modo para el análisis modal espectral en dirección X del sismo MCD para la edificación con BRB.....	257
Tabla 6-118 Desplazamientos por nivel y modo para el análisis modal espectral en dirección X del sismo MCE para la edificación con BRB.....	257
Tabla 6-119 Derivas por nivel y modo para el análisis modal espectral en dirección X del sismo MCD para la edificación con BRB.....	258

Tabla 6-120 Derivas por nivel y modo para el análisis modal espectral en dirección X del sismo MCE para la edificación con BRB	258
Tabla 6-121 Derivas de piso para el sismo MCD resultantes del análisis modal espectral en dirección X para la edificación con BRB	259
Tabla 6-122 Derivas de piso para el sismo MCE resultantes del análisis modal espectral en dirección X para la edificación con BRB	259
Tabla 6-123 Verificación del sistema de disipación BRB para el sismo MCD en la dirección X	260
Tabla 6-124 Verificación del sistema de disipación BRB para el sismo MCE en la dirección X	261
Tabla 6-125 Periodos fundamentales obtenidos para la edificación con disipadores BRB	261
Tabla 6-126 Periodos y participación de masa para el análisis modal de la estructura con disipadores BRB	261
Tabla 6-127 Peso total de la edificación con disipadores BRB	262
Tabla 6-128 Cortante en la base por el método de la fuerza horizontal para la edificación con disipadores BRB	262
Tabla 6-129 Comprobación de participación de cortante para el análisis modal espectral de la estructura con disipadores BRB	262
Tabla 6-130 Extremo con mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X de la edificación con disipadores BRB	263
Tabla 6-131 Extremo opuesto al de mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X de la edificación con disipadores BRB	263
Tabla 6-132 Extremo con mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección Y de la edificación con disipadores BRB	264
Tabla 6-133 Extremo opuesto al de mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X de la edificación con disipadores BRB	264
Tabla 6-134 Evaluación de irregularidad torsional para el análisis modal espectral en dirección X para la estructura con disipadores BRB	265
Tabla 6-135 Evaluación de irregularidad torsional para el análisis modal espectral en dirección Y para la estructura con disipadores BRB	265
Tabla 6-136 Evaluación del índice de estabilidad en la dirección X para la estructura con disipadores BRB	266
Tabla 6-137 Evaluación del índice de estabilidad en la dirección Y para la estructura con disipadores BRB	266
Tabla 6-138 Secciones propuesta para las vigas en la edificación con solo sistema de porticos	268
Tabla 6-139 Secciones propuestas para las columnas en la edificación con solo sistema de pórticos	268
Tabla 6-140 Periodos naturales para la estructura solo sistema de porticos	269
Tabla 6-141 Periodos y participación de masas en el análisis modal de la estructura solo sistema de porticos	269
Tabla 6-142 Peso propio de la estructura con solo sistema de porticos entrepiso	269
Tabla 6-143 Peso propio de la estructura con solo sistema de porticos	270
Tabla 6-144 Peso total de la edificación con solo sistema de porticos	270
Tabla 6-145 Cortante en la base por el método de fuerza horizontal equivalente para la estructura con solo sistema de porticos	270
Tabla 6-146 Comprobación de participación de cortante para el análisis modal espectral de la estructura con solo sistema de porticos	270

Tabla 6-147 Extremo con mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X para la edificación con solo sistema de porticos	271
Tabla 6-148 Extremo opuesto al de mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección X para la edificación con solo sistema de porticos	271
Tabla 6-149 Extremo con mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección Y para la edificación con solo sistema de porticos	272
Tabla 6-150 Extremo opuesto al de mayor deriva para el análisis modal espectral en la dirección Y para la edificación con solo sistema de porticos	272
Tabla 6-151 Evaluación de irregularidad torsional para el análisis modal espectral en dirección X para la edificación con solo sistema de porticos	273
Tabla 6-152 Evaluación de irregularidad torsional para el análisis modal espectral en dirección Y para la edificación con solo sistema de porticos	273
Tabla 6-153 Evaluación del índice de estabilidad en la dirección X para la edificación con solo sistema de porticos.....	274
Tabla 6-154 Evaluación del índice de estabilidad en la dirección Y para la edificación con solo sistema de porticos.....	274
Tabla 6-155 Cargas de diseño críticas para vigas perimetrales en la edificación con solo sistema de porticos.....	275
Tabla 6-156 Cargas de diseño críticas para vigas perimetrales en la edificación con solo sistema de porticos.....	275
Tabla 6-157 Refuerzo propuesto para las secciones de vigas perimetrales en la edificación con solo sistema de porticos.....	276
Tabla 6-158 Refuerzo propuesto para las secciones de vigas internas en la edificación con solo sistema de porticos.....	276
Tabla 6-159 Cuantías de refuerzo propuestas para columnas internas para la edificación con solo sistema de porticos	277
Tabla 6-160 Cuantías de refuerzo propuestas para columnas perimetrales para la edificación con solo sistema de porticos.....	277
Tabla 6-161 Asignación de cuantías de refuerzo para las columnas de la estructura con solo sistema de porticos.....	277
Tabla 7-1 Magnitud de momento para los eventos seleccionadas en cada fuente	282
Tabla 7-2 Parametros para el área de ruptura en las distintas fuentes	283
Tabla 7-3 Parametros de distancia para las distintas fuentes.....	283
Tabla 7-4 Propiedades del perfil de suelo utilizadas.....	288
Tabla 7-5 Propiedades de los acelerogramas escogidos para los escenarios sísmicos	294
Tabla 7-6 Valores para los parametros utilizados en lo método de integración	298
Tabla 7-7 Punto de desempeño para la edificación con TADAS	314
Tabla 7-8 Puntos de desempeño para la edificación solo con pórticos	321
Tabla 8-1 Comparación de resultados análisis modal en la dirección X	334
Tabla 8-2 Comparación de resultados análisis modal en la dirección Y.....	334
Tabla 8-3 Comparación del modo torsional mayor para las tres edificaciones.....	335
Tabla 8-4 Derivas mayores para las edificaciones diseñadas	336
Tabla 8-5 Amortiguamientos para las edificaciones en la dirección X	336
Tabla 8-6 Amortiguamientos para las edificaciones en la dirección Y	337
Tabla 8-7 Peso total de las edificaciones de 12 niveles	338

Tabla 8-8 Puntos de desempeño para las edificaciones.....	343
Tabla 8-9 Niveles de desempeño estructural.....	347
Tabla 8-10 Valores máximos de los análisis cronológicos realizados en las tres edificaciones para la dirección X.....	404
Tabla 8-11 Valores máximos de los análisis cronológicos realizados en las tres edificaciones para la dirección Y.....	404
Tabla 8-12 Porcentajes máximos de cantidad de rotulas y niveles de desempeño para los análisis cronológicos de los eventos sísmicos en dirección X.....	432
Tabla 8-13 Porcentajes máximos de cantidad de rotulas y niveles de desempeño para los análisis cronológicos de los eventos sísmicos en dirección Y.....	432
Tabla 8-14 Presupuesto para la estructura de la edificación con TADAS.....	441
Tabla 8-15 Presupuesto para la estructura de la edificación con BRB.....	442
Tabla 8-16 Presupuesto para la estructura de la edificación con solo pórticos.....	443
Tabla 8-17 Asociación de los niveles de desempeño con los costos de reparación en los dispositivos TADAS.....	444
Tabla 8-18 Asociación de los niveles de desempeño con los costos de reparación en las columnas para la edificación con TADAS.....	445
Tabla 8-19 Asociación de los niveles de desempeño con los costos de reparación en las vigas para la edificación con TADAS.....	445
Tabla 8-20 Costos de reparación para los eventos en dirección X para la edificación con TADAS.....	446
Tabla 8-21 Costos de reparación para los eventos en dirección Y para la edificación con TADAS.....	446
Tabla 8-22 Asociación de los niveles de desempeño con los costos de reparación en los dispositivos BRB.....	446
Tabla 8-23 Asociación de los niveles de desempeño con los costos de reparación en las columnas para la edificación con BRB.....	447
Tabla 8-24 Asociación de los niveles de desempeño con los costos de reparación en las vigas para la edificación con BRB.....	447
Tabla 8-25 Costos de reparación para los eventos en dirección X para la edificación con BRB.....	447
Tabla 8-26 Costos de reparación para los eventos en dirección Y para la edificación con BRB.....	447
Tabla 8-27 Asociación de los niveles de desempeño con los costos de reparación en las columnas para la edificación con solo pórticos.....	448
Tabla 8-28 Asociación de los niveles de desempeño con los costos de reparación en las columnas para la edificación con solo pórticos.....	448
Tabla 8-29 Costos de reparación para los eventos en dirección X para la edificación con solo pórticos.....	448
Tabla 8-30 Costos de reparación para los eventos en dirección Y para la edificación con solo pórticos.....	448
Tabla 8-31 Comparación de costo inicial para la estructura de las edificaciones.....	449
Tabla 8-32 Comparación de costos de reparación para los eventos en la dirección X.....	450
Tabla 8-33 Comparación de costos de reparación para los eventos en la dirección Y.....	451
Tabla 8-34 Comparación de los periodos para los modos fundamentales de las edificaciones con disipadores frente al prediseño.....	456
Tabla 8-35 Valores de cortante de fluencia y último para la dirección X en comparación con el prediseño.....	458
Tabla 8-36 Valores de cortante de fluencia y último para la dirección Y en comparación con el prediseño.....	458

Tabla 8-37 Comparación del punto de desempeño para las edificaciones con disipadores frente a su prediseño	459
--	-----

Lista de figuras

Figura 1-1 Disipadores histeréticos metálicos del tipo TADAS (Sobarriba Gómez, 2012).....	44
---	----

Figura 1-2 Disipadores de arriostramiento de pandeo restringido BRB (Oviedo & Duque, 2009)	45
Figura 2-1 Curva de capacidad de las estructuras en términos de ADRS (ASCE 7-16)	48
Figura 2-2 Ejemplo de espectros de aceleraciones y desplazamientos espectrales	48
Figura 2-3 Curva de demanda asociada a los espectros de la imagen 2.2	49
Figura 2-4 Asociación entre el nivel de plastificación y deformación con los niveles de desempeño (Deierlein & Moehle, 2004)	50
Figura 2-5 Disipador TADAS sobre contraviento Chevrón (Aguiar et al., 2017)	56
Figura 2-6 Comportamiento del dispositivo TADAS a flexión por carga lateral (Cano, 2020).....	57
Figura 2-7 Modelo bilineal para el comportamiento histerético (Aguiar et al., 2016).....	58
Figura 2-8 Diagrama de deformación en una sección transversal del TADAS (Cano, 2020).....	59
Figura 2-9 Elementos de las riostras de pandeo restringido BRB (Velásquez, 2020)	64
Figura 2-10 Modelo de Wen para el comportamiento de las riostras BRB (Velásquez, 2020)	65
Figura 2-11 Comportamiento del disipador como sistema en serie (Velásquez, 2020)	66
Figura 2-12 Enfoque en sistema en paralelo de Oviedo et al. (a la izquierda el esquema de combinación en paralelo a la derecha el comportamiento de una edificación con sistema de disipación (Velásquez, 2020)	69
Figura 3-1 Modelación de la forma de los disipadores TADAS dentro de SAP2000	74
Figura 3-2 Secciones para los extremos de la sección no prismática (Ej base=0.26m)	74
Figura 3-3 Definición de sección no prismática para las platinas TADAS (Ej: Largo=0.26m).....	75
Figura 3-4 Escalamiento de las propiedades al número de platinas (Ej: 6 Platinas).....	76
Figura 3-5 Liberación de las acciones a momento y cortante en el inicio del elemento que corresponde al extremo inferior de las platinas.....	76
Figura 3-6 Representación del comportamiento de materiales en rango elástico e inelástico según el ASCE 41-13.	77
Figura 3-7 Ingreso de propiedades para la rótula plástica en el rango no lineal	78
Figura 3-8 Modelamiento del disipador en SAP2000 (Notar que solo el elemento de viga y las platinas tienen rotula asignada no los arriostramientos)	78
Figura 3-9 Detalle de la geometría de los pórticos del ensayo de laboratorio (TahamouliRoudsari et al., 2018)	80
Figura 3-10 Resultados de calibración para el pórtico sin disipadores.....	80
Figura 3-11 Resultados de calibración para el pórtico con TADAS (2 Platinas)	81
Figura 3-12 Resultados de calibración para el pórtico con TADAS (4 Platinas)	81
Figura 3-13 Resultados de calibración para el pórtico con TADAS (6 Platinas)	82
Figura 3-14 Estados de plastificación para los pórticos de la calibración de la modelación de disipadores TADAS.....	83
Figura 3-15 Configuración del elemento link a partir del modelo de Wen dentro de SAP2000.....	84
Figura 3-16 Secciones de las riostras BRB utilizadas en la calibración. Tomado de (Cancelado, 2012)	85
Figura 3-17 Comparación de los resultados experimentales frente al modelamiento con el elemento Link (modelo de Wen) en SAP200.	86
Figura 3-18 Opción para definición de rotulas plásticas trabajando a fuerza axial	87
Figura 3-19 Opciones descartada para modelación como elemento frame del BRB (Izquierda opción con sección no prismática y derecha opción con el sección designer).....	88
Figura 3-20 Modelamiento a fuerza axial de la sección para la zona elástica del BRB-1	90
Figura 3-21 Modelamiento a fuerza axial de la sección para la zona plástica del BRB-1.....	90
Figura 3-22 Propiedades para la rótula plástica del BRB-1 en SAP2000.....	93

Figura 3-23 Calibración del modelamiento del disipador BRB-1.....	94
Figura 3-24 Calibración del modelamiento del disipador BRB-2.....	94
Figura 3-25 Calibración del modelamiento del disipador BRB-3.....	94
Figura 3-26 Calibración del modelamiento del disipador BRB-4.....	95
Figura 3-27 Comparación de modelaciones aplicadas para los disipadores BRB en el modelo a escala 195	
Figura 3-28 Estados de plastificación para el BRB-1.....	96
Figura 3-29 Ubicación de disipadores para la opción 1.....	98
Figura 3-30 Ubicación de disipadores para la opción 2	98
Figura 3-31 Ubicación de disipadores para la opción 3	99
Figura 3-32 Comparación para la capacidad en dirección X de las tres opciones de ubicación consideradas para los disipadores TADAS	99
Figura 3-33 Comparación para la capacidad en dirección X de las tres opciones de ubicación consideradas para los disipadores BRB	100
Figura 4-1 Diagrama de flujo metodología general propuesta	104
Figura 4-2 Diagrama de flujo metodología de diseño para edificaciones con disipadores	106
Figura 4-3 Modelo bilineal normalizada para el diagrama momento curvatura (tomado del ASCE-41-13)	114
Figura 4-4 Ejemplo de reporte de software Xtract. Se observa el diagrama momento curvatura de la sección.....	114
Figura 4-5 Ventana de ingreso de propiedades de rotula plástica para vigas en SAP2000	115
Figura 4-6 Ventana de ingreso de propiedades de rotula plástica para columnas en SAP2000.....	115
Figura 4-7 Ventana de configuración de análisis no lineal estático en SAP2000.....	117
Figura 4-8 Ejemplo de resultados de análisis no lineal estático (push over). A la izquierda estado de plastificación y la derecha curva de capacidad. Resaltado en rojo nudo de control	118
Figura 4-9 Relación entre cortante y deriva de piso, y aproximación bilineal.	119
Figura 4-10 Diagrama de flujo para dimensionamiento de disipadores TADAS	133
Figura 4-11 Diagrama de flujo para dimensionamiento de disipadores BRB.....	136
Figura 4-12 Diagrama de flujo para el diseño de la edificación solo con pórticos.....	137
Figura 4-13 Ventana de configuración para simulación de movimiento fuerte en SMA.	139
Figura 4-14 Diagrama de flujo para la generación de acelerogramas sintéticos	141
Figura 4-15 Ventana para configuración de análisis dinámico cronológico inelástico	143
Figura 4-16 Estado de plastificación en un análisis cronológico inelástico (izquierda) y ciclos de carga y descarga (derecha)	146
Figura 4-17 Parámetros de energía para un análisis cronológico en SAP2000	147
Figura 5-1 Geometría en planta propuesta para las edificaciones (Medidas en metros).....	150
Figura 5-2 Espectro de aceleraciones de diseño	153
Figura 5-3 Fuentes sismogénicas en Colombia (AIS-2009).....	155
Figura 6-1 Secciones propuestas para la etapa de prediseño.....	159
Figura 6-2 Irregularidades en planta -NSR-10-Título A.....	164
Figura 6-3 Comportamiento no lineal para la sección VG-1 a momento negativo.....	174
Figura 6-4 Comportamiento no lineal para la sección VG-1 a momento positivo	175
Figura 6-5 Comportamiento no lineal para la sección 0.7 x 0.7 (1.7%) para carga máxima y con dirección 0°.....	178
Figura 6-6 Comportamiento no lineal para la sección 0.7 x 0.7 (1.7%) para carga máxima y con dirección 45°.....	179

Figura 6-7 Comportamiento no lineal para la sección 0.7 x 0.7 (1.7%) para carga mínima y con dirección 0°	179
Figura 6-8 Comportamiento no lineal para la sección 0.7 x 0.7 (1.7%) para carga mínima y con dirección 45°	180
Figura 6-9 Curva de capacidad para el análisis push over del prediseño en la dirección X	182
Figura 6-10 Estado de plastificación final para el análisis push over del prediseño en la dirección X	183
Figura 6-11 Curva de capacidad para el análisis push over del prediseño en la dirección Y	183
Figura 6-12 Estado de plastificación final para el análisis push over del prediseño en la dirección Y	184
Figura 6-13 Curvas de capacidad por cada piso para el prediseño de la estructura principal (Continuación)	185
Figura 6-14 Disposición de los disipadores en los pórticos de la edificación en la dirección X	194
Figura 6-15 Disposición de los disipadores en los pórticos de la edificación en la dirección Y	194
Figura 6-16 Ventana de ingreso de las propiedades de la rótula para los dispositivos TADAS en el nivel 1 dirección X	196
Figura 6-17 Curva de capacidad para la edificación con disipadores TADAS-Dirección X	198
Figura 6-18 Estado de plastificación final para el análisis push over de la edificación con TADAS en la dirección X	198
Figura 6-19 Curva de capacidad para la edificación con disipadores TADAS-Dirección Y	199
Figura 6-20 Estado de plastificación final para el análisis push over de la edificación con TADAS en la dirección Y	199
Figura 6-21 Curva de capacidad para el análisis push over del prediseño en la dirección X para la estructura con disipadores BRB	229
Figura 6-22 Estado de plastificación final para el análisis push over del prediseño en la dirección X para la edificación con disipadores BRB	229
Figura 6-23 Curva de capacidad para el análisis push over del prediseño en la dirección Y para la estructura con disipadores BRB	230
Figura 6-24 Estado de plastificación final para el análisis push over del prediseño en la dirección Y para la edificación con disipadores BRB	230
Figura 6-25 Curvas de capacidad por cada piso para el prediseño de la estructura principal en dirección X para la edificación con disipadores BRB	231
Figura 6-26 Reporte de resultados del software para el modelamiento del BRB para el nivel 1-Dirección X	235
Figura 6-27 Comportamiento de la riostra BRB para el nivel 1 en la dirección X	236
Figura 6-28 Reporte de modelamiento a compresión de la sección del BRB para nivel 1 en dirección X	239
Figura 6-29 Reporte de modelamiento a tensión de la sección del BRB para nivel 1 en dirección X	240
Figura 6-30 Curva de capacidad para la edificación con disipadores BRB-Dirección X	242
Figura 6-31 Estado de plastificación final para el análisis push over de la edificación con BRB en la dirección X	242
Figura 6-32 Curva de capacidad para la edificación con disipadores BRB-Dirección Y	243
Figura 6-33 Estado de plastificación final para el análisis push over de la edificación con BRB en la dirección Y	243
Figura 6-34 Secciones propuestas para la edificación con solo sistema de porticos	268
Figura 6-35 Curva de capacidad para el análisis push over del prediseño en la dirección X para la edificación con solo sistema de porticos	278

Figura 6-36 Estado de plastificación final para el análisis push over del prediseño en la dirección X para la estructura con solo sistema de porticos.....	279
Figura 6-37 Curva de capacidad para el análisis push over del prediseño en la dirección Y para la edificación con solo sistema de porticos	279
Figura 6-38 Estado de plastificación final para el análisis push over del prediseño en la dirección Y para la estructura con solo sistema de porticos.....	280
Figura 7-1 Ventana de configuración de movimiento fuerte para la fuente 38-Romeral-Mw=7.4	284
Figura 7-2 Previsualización de la ruptura sobre el plano de falla para la fuente 38-romeral-Mw=7.2.....	284
Figura 7-3 Acelerogramas a nivel de roca para la fuente 38-romeral-Mw=7.4.....	286
Figura 7-4 Ingreso del perfil del suelo en SMA para el análisis de respuesta de sitio	288
Figura 7-5 Funciones de transferencia del EDF para las 10 señales analizadas para la fuente 38-Romeral	288
Figura 7-6 Acelerograma a nivel de superficie para la fuente 38-romeral-Mw=7.4.....	289
Figura 7-7 Espectro de amplitudes de Fourier para las señales asociadas al evento de Mw=7.4 (Romeral)	291
Figura 7-8 Espectros de aceleración para los acelerogramas generados para la fuente 38-Romeral (1-5)	292
Figura 7-9 Espectros de aceleración para los acelerogramas generados para la fuente 38-Romeral (6-10)	292
Figura 7-10 Acelerograma 4 de la simulación realizado para el evento de Mw=7.4 fuente 38-Romeral	293
Figura 7-11 Recorte a fase intensa del acelerograma 4 de la fuente 38-Romeral.....	294
Figura 7-12 Acelerograma para fuente 38-Romeral-Mw=7.40	294
Figura 7-13 Acelerograma para fuente 20-Cauca-Mw=7.31	295
Figura 7-14 Acelerograma para fuente 9-Benioff Sur-Mw=7.97	295
Figura 7-15 Acelerograma para fuente 8-Benioff Central- Mw=7.50	295
Figura 7-16 Acelerograma para fuente 14-Subducción Pacifico Central Mw=8.80	295
Figura 7-17 Espectro de aceleraciones para el 5% de amortiguamiento para las distintas señales	296
Figura 7-18 Método de integración directa disponibles en SAP2000 para análisis de tiempo historia.....	297
Figura 7-19 Modelo utilizando para validar la influencia del método de integración en los resultados de los análisis de tiempo historia.....	297
Figura 7-20 Desplazamiento de control por la señal 38-Romeral para los distintos métodos de integración directa en la estructura principal de la edificación de 4 niveles regular en dirección X.....	298
Figura 7-21 Cortante en la base por la señal 38-Romeral para los distintos métodos de integración directa en la estructura principal de la edificación de 4 niveles regular en dirección X.....	299
Figura 7-22 Desplazamiento de control por la señal 38-Romeral para los distintos métodos de integración directa en la edificación de 4 niveles regular en dirección X con disipadores.....	299
Figura 7-23 Cortante en la base por la señal 38-Romeral para los distintos métodos de integración directa en la edificación de 4 niveles regular en dirección X con disipadores.....	300
Figura 7-24 Ventana de configuración para el análisis cronológico inelástico de la edificación con TADAS de 12 niveles en dirección X para la fuente 38-Romeral.....	301
Figura 7-25 Desplazamiento máximo en el último nivel vs duración para la edificación con TADAS y el análisis de la fuente 38-Romeral	302
Figura 7-30 Cortante en la base vs duración para la edificación con TADAS y el análisis de la fuente 38-Romeral	302

Figura 7-27 Niveles de la relación cortante-desplazamiento para el análisis de la fuente 38-Romeral en la dirección X.....	303
Figura 7-28 Ciclos de carga para la fuente 38-Romeral en la dirección X en la edificación con TADAS junto a la envolvente.....	304
Figura 7-37 Envolventes (curvas de capacidad) para las señales analizadas en la dirección X para la edificación con TADAS	304
Figura 7-38 Envolventes (curvas de capacidad) para las señales analizadas en la dirección Y para la edificación con TADAS	305
Figura 7-39 Desplazamiento máximo en el último nivel vs duración para la edificación con BRB y el análisis de la fuente 38-Romeral	305
Figura 7-44 Cortante en la base vs duración para la edificación con BRB y el análisis de la fuente 38-Romeral.....	306
Figura 7-49 Envolventes (curvas de capacidad) para las señales analizadas en la dirección X para la edificación con BRB	306
Figura 7-50 Envolventes (curvas de capacidad) para las señales analizadas en la dirección Y para la edificación con BRB	307
Figura 7-51 Desplazamiento máximo en el último nivel vs duración para la edificación con solo porticos y el análisis de la fuente 38-Romeral.....	308
Figura 7-56 Cortante en la base vs duración para la edificación con solo porticos y el análisis de la fuente 38-Romeral.....	308
Figura 7-61 Envolventes (curvas de capacidad) para las señales analizadas en la dirección X para la edificación con solo porticos	309
Figura 7-62 Envolventes (curvas de capacidad) para las señales analizadas en la dirección Y para la edificación con solo porticos	309
Figura 7-63 Curva de capacidad para la dirección X en la edificación con TADAS en formato ADRS	311
Figura 7-64 Curva de capacidad para la dirección Y en la edificación con TADAS en formato ADRS	311
Figura 7-65 Curva de demanda reducida para la dirección X en la edificación con TADAS	312
Figura 7-66 Curva de demanda reducida para la dirección Y en la edificación con TADAS	313
Figura 7-67 Capacidad y demanda para la estructura con disipadores TADAS en la dirección X	313
Figura 7-68 Capacidad y demanda para la estructura con disipadores TADAS en la dirección Y	314
Figura 7-69 Estado de plastificación en el punto de desempeño para la edificación con TADAS en dirección X.....	315
Figura 7-70 Estado de plastificación en el punto de desempeño para la edificación con TADAS en dirección Y	315
Figura 7-71 Capacidad y demanda para la estructura con disipadores BRB en la dirección X.....	316
Figura 7-72 Capacidad y demanda para la estructura con disipadores BRB en la dirección Y	317
Figura 7-73 Puntos de desempeño para la edificación con BRB	317
Figura 7-74 Estado de plastificación en el punto de desempeño para la edificación con BRB en dirección X.....	318
Figura 7-75 Estado de plastificación en el punto de desempeño para la edificación con BRB en dirección Y.....	319
Figura 7-76 Capacidad y demanda para la estructura solo con pórticos en la dirección X	320
Figura 7-77 Capacidad y demanda para la estructura solo con porticos en la dirección Y	320
Figura 7-78 Estado de plastificación en el punto de desempeño para la edificación solo con pórticos en dirección X.....	321

Figura 7-79 Estado de plastificación en el punto de desempeño para la edificación solo con pórticos en dirección Y	322
Figura 7-80 Estado de plastificación para la edificación con TADAS en la dirección X para la fuente 38-Romeral	323
Figura 7-81 Estado de plastificación para la edificación con TADAS en la dirección Y para la fuente 38-Romeral	324
Figura 7-90 Estado de plastificación para la edificación con BRB en la dirección X para la fuente 38-Romeral	325
Figura 7-95 Estado de plastificación para la edificación con BRB en la dirección Y para la fuente 38-Romeral	326
Figura 7-100 Estado de plastificación para la edificación solo con porticos en la dirección X para la fuente 38-Romeral	327
Figura 7-105 Estado de plastificación para la edificación solo con porticos en la dirección Y para la fuente 38-Romeral	328
Figura 7-110 Energía disipada por amortiguación en la edificación con TADAS en la dirección X	329
Figura 7-111 Energía disipada por amortiguación en la edificación con TADAS en la dirección Y	329
Figura 7-112 Energía disipada por amortiguación en la edificación con BRB en la dirección X.....	330
Figura 7-113 Energía disipada por amortiguación en la edificación con BRB en la dirección Y.....	331
Figura 7-114 Energía disipada por amortiguación en la edificación solo con pórticos en la dirección X.....	331
Figura 7-115 Energía disipada por amortiguación en la edificación solo con pórticos en la dirección Y.....	332
Figura 8-1 Comparación de peso en las edificaciones	338
Figura 8-2 Curvas de capacidad push over para las edificaciones en la dirección X.....	340
Figura 8-3 Curvas de capacidad push over para las edificaciones en la dirección Y.....	340
Figura 8-4 Punto de fluencia y punto último para las edificaciones en dirección X	341
Figura 8-5 Punto de fluencia y punto último para las edificaciones en dirección Y.....	342
Figura 8-6 Curvas de capacidad push over formato ASDR para las edificaciones en la dirección X.....	342
Figura 8-7 Curvas de capacidad push over formato ASDR para las edificaciones en la dirección Y.....	343
Figura 8-8 Estados de plastificación para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección X	345
Figura 8-9 Estados de plastificación para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección Y	346
Figura 8-10 Conteo de rotulas en el sistema de disipación para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección X.....	348
Figura 8-11 Conteo de rotulas en el sistema de disipación para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección Y	348
Figura 8-12 Conteo de rotulas en vigas para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección X.....	349
Figura 8-13 Conteo de rotulas en vigas para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección Y.....	350
Figura 8-14 Conteo de rotulas en columnas para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección X.....	351
Figura 8-15 Conteo de rotulas en columnas para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección Y.....	351
Figura 8-16 Conteo de rotulas totales para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección X	352

Figura 8-17 Conteo de rotulas totales para las edificaciones en el punto de desempeño en la dirección Y	352
Figura 8-18 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto a parámetros de capacidad de diseño en la dirección X para la edificación con TADAS.....	354
Figura 8-19 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto a parámetros de capacidad de diseño en la dirección Y para la edificación con TADAS.....	355
Figura 8-20 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con TADAS	356
Figura 8-21 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con TADAS	357
Figura 8-22 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto a parámetros de capacidad de diseño en la dirección X para la edificación con BRB.....	358
Figura 8-23 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto a parámetros de capacidad de diseño en la dirección Y para la edificación con BRB.....	358
Figura 8-24 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con BRB	359
Figura 8-25 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con BRB	360
Figura 8-26 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto a parámetros de capacidad de diseño en la dirección X para la edificación con solo pórticos	361
Figura 8-27 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto a parámetros de capacidad de diseño en la dirección Y para la edificación con solo porticos.....	362
Figura 8-28 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con solo pórticos	362
Figura 8-29 Curvas de capacidad frente a los eventos sísmicos junto al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con solo pórticos	363
Figura 8-30 Comparación del estado de plastificación del punto de desempeño frente al estado final del evento de la fuente 38 en dirección X para la edificación con TADAS	365
Figura 8-31 Comparación del estado de plastificación del punto de desempeño frente al estado final del evento de la fuente 38 en dirección X para la edificación con BRB	366
Figura 8-32 Comparación del estado de plastificación del punto de desempeño frente al estado final del evento de la fuente 38 en dirección X para la edificación con solo pórticos	367
Figura 8-33 Comparación del conteo de rotulas generadas en los TADAS para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con TADAS	368
Figura 8-34 Comparación del conteo de rotulas generadas en los TADAS para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con TADAS	369
Figura 8-35 Comparación del conteo de rotulas generadas en vigas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con TADAS	370
Figura 8-36 Comparación del conteo de rotulas generadas en vigas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con TADAS.....	370
Figura 8-37 Comparación del conteo de rotulas generadas en columnas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con TADAS	371
Figura 8-38 Comparación del conteo de rotulas generadas en columnas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con TADAS	372

Figura 8-39 Comparación del conteo de rotulas totales para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con TADAS	373
Figura 8-40 Comparación del conteo de rotulas totales para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con TADAS.....	373
Figura 8-41 Comparación del conteo de rotulas generadas en los TADAS para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con BRB	375
Figura 8-42 Comparación del conteo de rotulas generadas en los TADAS para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con BRB	375
Figura 8-43 Comparación del conteo de rotulas generadas en vigas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con BRB	376
Figura 8-44 Comparación del conteo de rotulas generadas en vigas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con BRB.....	377
Figura 8-45 Comparación del conteo de rotulas generadas en columnas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con BRB	378
Figura 8-46 Comparación del conteo de rotulas generadas en columnas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con BRB	378
Figura 8-47 Comparación del conteo de rotulas totales para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con BRB	379
Figura 8-48 Comparación del conteo de rotulas totales para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación con BRB.....	379
Figura 8-49 Comparación del conteo de rotulas en vigas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación solo con pórticos	380
Figura 8-50 Comparación del conteo de rotulas en vigas para los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación solo con pórticos	381
Figura 8-51 Comparación del conteo de rotulas en columnas los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación solo con pórticos	382
Figura 8-52 Comparación del conteo de rotulas en columnas los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación solo con pórticos	382
Figura 8-53 Comparación del conteo de rotulas totales en los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección X para la edificación con solo pórticos	383
Figura 8-54 Comparación del conteo de rotulas totales en los eventos sísmicos frente al punto de desempeño en la dirección Y para la edificación sin disipadores.....	384
Figura 8-55 Desplazamiento de control máximo en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 38.....	386
Figura 8-56 Cortante en la base en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 38....	387
Figura 8-57 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección X para el evento de la fuente 38.....	388
Figura 8-58 Desplazamiento de control máximo en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 38.....	388
Figura 8-59 Cortante en la base en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 38....	389
Figura 8-60 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección Y para el evento de la fuente 38.....	389
Figura 8-61 Desplazamiento de control máximo en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 20.....	390
Figura 8-62 Cortante en la base en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 20....	390
Figura 8-63 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección X para el evento de la fuente 20.....	391

Figura 8-64 Desplazamiento de control máximo en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 20.....	392
Figura 8-65 Cortante en la base en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 20....	392
Figura 8-66 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección Y para el evento de la fuente 20.....	393
Figura 8-67 Desplazamiento de control máximo en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 9	394
Figura 8-68 Cortante en la base en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 9.....	394
Figura 8-69 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección X para el evento de la fuente 9	395
Figura 8-70 Desplazamiento de control máximo en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 9	395
Figura 8-71 Cortante en la base en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 9	396
Figura 8-72 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección Y para el evento de la fuente 9	396
Figura 8-73 Desplazamiento de control máximo en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 8	397
Figura 8-74 Cortante en la base en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 8.....	397
Figura 8-75 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección X para el evento de la fuente 8	398
Figura 8-76 Desplazamiento de control máximo en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 8	399
Figura 8-77 Cortante en la base en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 8	399
Figura 8-78 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección Y para el evento de la fuente 8	400
Figura 8-79 Desplazamiento de control máximo en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 14	401
Figura 8-80 Cortante en la base en dirección X para las edificaciones ante el evento de la fuente 14	401
Figura 8-81 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección X para el evento de la fuente 14	402
Figura 8-82 Desplazamiento de control máximo en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 14	402
Figura 8-83 Cortante en la base en dirección Y para las edificaciones ante el evento de la fuente 14	403
Figura 8-84 Curvas de capacidad de las edificaciones en dirección Y para el evento de la fuente 14	403
Figura 8-85 Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección X durante el evento de la fuente 38.....	406
Figura 8-86 Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección Y durante el evento de la fuente 38.....	406
Figura 8-87 Conteo de rotulas en vigas para la dirección X durante el evento de la fuente 38.....	408
Figura 8-88 Conteo de rotulas en vigas para la dirección Y durante el evento de la fuente 38.....	408
Figura 8-89 Conteo de rotulas en columnas para la dirección X durante el evento de la fuente 38	409
Figura 8-90 Conteo de rotulas en columnas para la dirección Y durante el evento de la fuente 38	409
Figura 8-91 Conteo de rotulas totales para la dirección X durante el evento de la fuente 38	410
Figura 8-92 Conteo de rotulas totales para la dirección Y durante el evento de la fuente 38.....	411
Figura 8-93 Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección X durante el evento de la fuente 20.....	412
Figura 8-94 Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección Y durante el evento de la fuente 20.....	412
Figura 8-95 Conteo de rotulas en vigas para la dirección X durante el evento de la fuente 20.....	413
Figura 8-96 Conteo de rotulas en vigas para la dirección Y durante el evento de la fuente 20	413
Figura 8-97 Conteo de rotulas en columnas para la dirección X durante el evento de la fuente 20	414

Figura 8-98	Conteo de rotulas en columnas para la dirección Y durante el evento de la fuente 20	415
Figura 8-99	Conteo de rotulas totales para la dirección X durante el evento de la fuente 20.....	415
Figura 8-100	Conteo de rotulas totales para la dirección Y durante el evento de la fuente 20	416
Figura 8-101	Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección X durante el evento de la fuente 9	417
Figura 8-102	Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección Y durante el evento de la fuente 9	417
Figura 8-103	Conteo de rotulas en vigas para la dirección X durante el evento de la fuente 9	418
Figura 8-104	Conteo de rotulas en vigas para la dirección Y durante el evento de la fuente 38	418
Figura 8-105	Conteo de rotulas en columnas para la dirección X durante el evento de la fuente 9.....	419
Figura 8-106	Conteo de rotulas en columnas para la dirección Y durante el evento de la fuente 9.....	420
Figura 8-107	Conteo de rotulas totales para la dirección X durante el evento de la fuente 9.....	420
Figura 8-108	Conteo de rotulas totales para la dirección Y durante el evento de la fuente 9.....	421
Figura 8-109	Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección X durante el evento de la fuente 8	422
Figura 8-110	Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección Y durante el evento de la fuente 8	423
Figura 8-111	Conteo de rotulas en vigas para la dirección X durante el evento de la fuente 8	423
Figura 8-112	Conteo de rotulas en vigas para la dirección Y durante el evento de la fuente 8	424
Figura 8-113	Conteo de rotulas en columnas para la dirección X durante el evento de la fuente 8	425
Figura 8-114	Conteo de rotulas en columnas para la dirección Y durante el evento de la fuente 8	425
Figura 8-115	Conteo de rotulas totales para la dirección X durante el evento de la fuente 8	426
Figura 8-116	Conteo de rotulas totales para la dirección Y durante el evento de la fuente 8	426
Figura 8-117	Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección X durante el evento de la fuente 14	427
Figura 8-118	Conteo de rotulas en el sistema de disipación para la dirección Y durante el evento de la fuente 14	428
Figura 8-119	Conteo de rotulas en vigas para la dirección X durante el evento de la fuente 14	428
Figura 8-120	Conteo de rotulas en vigas para la dirección Y durante el evento de la fuente 14.....	429
Figura 8-121	Conteo de rotulas en columnas para la dirección X durante el evento de la fuente 14.....	429
Figura 8-122	Conteo de rotulas en columnas para la dirección Y durante el evento de la fuente 14	430
Figura 8-123	Conteo de rotulas totales para la dirección X durante el evento de la fuente 14.....	430
Figura 8-124	Conteo de rotulas totales para la dirección Y durante el evento de la fuente 38	431
Figura 8-125	Comparación de energía de disipación para la fuente 38 en dirección X	433
Figura 8-126	Comparación de energía de disipación para la fuente 38 en dirección Y	434
Figura 8-127	Comparación de energía de disipación para la fuente 20 en dirección X	435
Figura 8-128	Comparación de energía de disipación para la fuente 20 en dirección Y	435
Figura 8-129	Comparación de energía de disipación para la fuente 9 en dirección X.....	436
Figura 8-130	Comparación de energía de disipación para la fuente 9 en dirección Y	436
Figura 8-131	Comparación de energía de disipación para la fuente 8 en dirección X	437
Figura 8-132	Comparación de energía de disipación para la fuente 8 en dirección Y	437
Figura 8-133	Comparación de energía de disipación para la fuente 14 en dirección X	438
Figura 8-134	Comparación de energía de disipación para la fuente 14 en dirección Y	438
Figura 8-135	Comparación de costo inicial para la estructura de las edificaciones	449
Figura 8-136	Costos de reparación totales para los eventos en la dirección X en las edificaciones	451

Figura 8-137 Costos de reparación totales para los eventos en la dirección Y en las edificaciones	452
Figura 8-138 Comparación de las curvas de capacidad de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección X	457
Figura 8-139 Comparación de las curvas de capacidad de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección Y	457
Figura 8-140 Comparación de estados de plastificación en el punto de desempeño para las edificaciones con disipadores frente al prediseño en dirección X	460
Figura 8-141 Comparación de estados de plastificación en el punto de desempeño para las edificaciones con disipadores frente al prediseño en dirección Y	461
Figura 8-142 Comparación del porcentaje de rotulas en vigas de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección X	462
Figura 8-143 Comparación del porcentaje de rotulas en vigas de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección Y	462
Figura 8-144 Comparación del porcentaje de rotulas en columnas de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección X	463
Figura 8-145 Comparación del porcentaje de rotulas en columnas de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección Y	463
Figura 8-146 Comparación del porcentaje de rotulas totales en las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección X	464
Figura 8-147 Comparación del porcentaje de rotulas totales en las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección Y	464
Figura 8-148 Desplazamiento máximo en función del tiempo para las edificaciones con disipadores y su prediseño en la dirección X para el evento de la fuente 38	466
Figura 8-149 Desplazamiento máximo en función del tiempo para las edificaciones con disipadores y su prediseño en la dirección Y para el evento de la fuente 38	466
Figura 8-150 Cortante en la base en función del tiempo para las edificaciones con disipadores y su prediseño en la dirección X para el evento de la fuente 38	467
Figura 8-151 Cortante en la base en función del tiempo para las edificaciones con disipadores y su prediseño en la dirección Y para el evento de la fuente 38	467
Figura 8-152 Curva de capacidad para el prediseño en el evento de la fuente 38 para la dirección X	468
Figura 8-153 Curva de capacidad para el prediseño en el evento de la fuente 38 para la dirección Y	469
Figura 8-154 Comparación de las curvas de capacidad de las edificaciones con disipadores frente al prediseño en la dirección X para el evento de la fuente 38	470
Figura 8-155 Comparación de las curvas de capacidad de las edificaciones con disipadores frente al prediseño en la dirección Y para el evento de la fuente 38	470
Figura 8-156 Comparación del estado de plastificación de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección X para el evento de la fuente 38	472
Figura 8-157 Comparación del estado de plastificación de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección Y para el evento de la fuente 38	473
Figura 8-158 Comparación del porcentaje de rotulas en vigas de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección X para el evento de la fuente 38	474
Figura 8-159 Comparación del porcentaje de rotulas en vigas de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección Y para el evento de la fuente 38	474
Figura 8-160 Comparación del porcentaje de rotulas en columnas de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección X para el evento de la fuente 38	475

Figura 8-161 Comparación del porcentaje de rotulas en columnas de las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección Y para el evento de la fuente 38	476
Figura 8-162 Comparación del porcentaje de rotulas totales en las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección X para el evento de la fuente 38	477
Figura 8-163 Comparación del porcentaje de rotulas totales en las edificaciones con disipadores frente a su prediseño en dirección X para el evento de la fuente 38	477
Figura 8-164 Energía disipada por amortiguación en las edificaciones con disipadores en comparación al prediseño para el evento de la fuente 38 en dirección X	478
Figura 8-165 Energía disipada por amortiguación en las edificaciones con disipadores en comparación al prediseño para el evento de la fuente 38 en dirección Y	479

Introducción

El siguiente documento presenta la investigación denominada "Evaluación del desempeño de una edificación con dos tipos de disipadores sísmicos controlados por deformación (TADAS y arriostramiento restringido al pandeo) frente a diversos eventos sísmicos", la cual se enfoca en integrar la evaluación del desempeño y los sistemas de control sísmico, dos aspectos relevantes en el campo del diseño de edificaciones sismorresistentes.

La evaluación del desempeño de las edificaciones es una filosofía que se está integrando a los códigos de construcción sismorresistente, mientras que la implementación de sistemas de control sísmico como los aisladores, los disipadores, sistemas de control de masa, etc. se han investigado y utilizado ampliamente en países con tradición en el área de la ingeniería sísmica, y se presentan como alternativas adicionales para el diseño sismorresistente de edificaciones.

De esta forma, la conexión de ambos aspectos se pretende realizar a través de la evaluación del desempeño del comportamiento de una edificación frente a la acción de eventos sísmicos de carácter extremo, considerando la implementación de dos tipos particulares de disipadores sísmicos controlados por deformación, los disipadores histeréticos metálicos triangulares tipo TADAS y las riostras de pandeo restringido (BRB).

En la presente investigación se evaluó el desempeño de tres edificaciones frente a la acción de eventos sísmicos de carácter extremo. Estas edificaciones en concreto reforzado tienen la misma configuración en planta, una de ellas está conformada sólo por pórticos, y en las otras dos se implementaron a los pórticos disipadores sísmicos controlados por deformación, un caso con disipadores histeréticos metálicos triangulares tipo TADAS, y el otro con riostras de pandeo restringido (BRB).

Las características de la edificación diseñada se presentan con mayor detalle más adelante, pero hay que resaltar que, para hacer la evaluación en un contexto más crítico, se seleccionó una zona de amenaza sísmica alta además de considerar la configuración irregular en planta. Esto brindará la oportunidad de analizar el desempeño de las estructuras equipadas con los dispositivos de disipación ante una de las situaciones más complejas presentadas en la realidad y comparar el comportamiento frente a la edificación con sistema de pórticos.

Con el propósito de hacer un análisis integral aparte de analizar el desempeño ante diversos eventos sísmicos, también se realizó una evaluación de los costos de

construcción de cada edificación, así como de los gastos de reparación asociados a la ocurrencia de los eventos. Lo anterior permitió comparar las tres edificaciones diseñadas también desde el punto de vista económico.

La principal motivación para la realización de la presente investigación es que el uso de los sistemas de control sísmico, así como la evaluación del desempeño y la consideración de eventos sísmicos extremos, es todavía muy limitado en nuestro país. Por lo anterior, con la presente investigación que continua las líneas de investigación de Análisis y Diseño Estructural del programa de Maestría en Estructuras de la Universidad de Colombia, se pretende motivar el uso a futuro tanto de los sistemas de protección como de la evaluación de desempeño en el diseño sismorresistente de edificaciones.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar el desempeño de una edificación, ante múltiples escenarios de excitación sísmica, considerando la implementación de disipadores histeréticos metálicos tipos TADAS y disipadores de arriostramiento restringido al pandeo.

Objetivos específicos

- Realizar el diseño de una edificación irregular (sin sistema de protección sísmico alternativo, con disipadores TADAS y con disipadores de arriostramiento restringido al pandeo BRB).
- Analizar el comportamiento de la edificación, con la implementación de los dos tipos de disipadores y sin la implementación, bajo la acción en el tiempo de múltiples sismos (incluyendo eventos extremos), y determinar el nivel de daño asociado.
- Establecer la eficiencia técnica y pertinencia económica de los tipos de disipadores analizados.

Justificación y planteamiento del problema

El método de diseño de la norma sismorresistente actual en Colombia indica que los elementos del sistema estructural (vigas y columnas etc.) sean los encargados de resistir las solicitaciones de diseño mediante su rigidez y amortiguación. En contraste las edificaciones con sistemas de control sísmico, como los disipadores, presentan estos elementos adicionales diseñados específicamente para disipar la energía del sismo, protegiendo con esto a la estructura principal.

También hay que destacar que la NSR-10 desarrolla al anterior método mediante prescripciones diseñadas para que los sismos de bajo nivel tengan una respuesta en el rango lineal, y sismos de alto nivel puedan hacer incursionar a la estructura en el rango no lineal, pero localizando la plastificación en las vigas. No obstante, como el análisis estructural bajo ciertas condiciones pueden desarrollarse en el rango lineal, muchas veces no se puede apreciar el desarrollo del anterior mecanismo, y verificar posteriormente el nivel de daño alcanzado en los elementos de la estructura.

Y nuevamente en contraste, la evaluación del desempeño de la estructura sí permite identificar el estado de plastificación y de daño de la edificación ante los diversos escenarios a lo que probabilísticamente se enfrentará durante su vida útil, consiguiendo con esto una evaluación amplia de comportamiento, lo que permite optimizar el diseño.

De esta forma, en la presente investigación se pretende establecer una relación entre los dos aspectos de la ingeniería sísmica (evaluación del desempeño y sistemas de control sísmico), porque como se indicó vienen a contrastar la metodología de la NSR-10, y difundiendo el estado de conocimiento de estos aspectos, a futuro podrían venir a integrarse y complementar futuras ediciones del código de construcción sismorresistente de Colombia.

Igualmente, los aspectos investigados en este documento son importantes desde el punto de vista social y económico. Ante la acción de un evento sísmico de magnitud considerable las pérdidas en vidas humanas y en infraestructura pueden llegar a niveles lamentables, por ejemplo, considerar los niveles de destrucción de las edificaciones y las pérdidas de vidas ocurridos durante el sismo de Armenia (1999). De allí que sea imprescindible explorar medidas que puedan reducir estos efectos sísmicos en las edificaciones, pesando siempre en mejorar y optimizar su comportamiento.

Siendo evidente entonces la necesidad de aumentar el estado de conocimiento de los sistema de control sísmica en el país dadas las ventajas que pueden presentar (Oviedo & Duque, 2009) y la evaluación del desempeño, surge el interrogante acerca de la causa de que estos métodos no se han expandido en nuestro país, dado que su aplicación se limita a casos excepcionales. A esto hay que responder que el aspecto económico y la falta de experiencia y lineamientos de diseño pueden ser las causas del uso limitado de los aspectos investigados en el presente documento.

Por los motivos anteriores también se integró en la presente investigación la comparación de los costos de construcción y de daños de reparación de las edificaciones, para poder establecer posibles ventajas o desventajas de los sistemas de disipación TADAS y BRB desde el punto de vista económico. Además también se consideran con detalle los pasos de diseño de los sistemas de disipación para continuar ampliando el conocimiento de estos dispositivos y que puedan servir como referencia para futuras aplicaciones.

Contenido del documento

Para cumplir con los objetivos destacados la investigación realizada plantea el diseño de las tres edificaciones mencionadas (TADAS, BRB y sin disipadores) siguiendo los requisitos normativos establecidos para las mismas, además de apoyarse en los trabajos de (Cano, 2020) y (Velásquez, 2020) que son investigaciones recientes sobre los disipadores TADAS y BRB respectivamente. Se continua con la definición de los eventos sísmicos y la evaluación del desempeño de las tres edificaciones al ser sometidas a los acelerogramas de cada uno de estos eventos. Estos pasos se organizaron en los siguientes capítulos que conforman el documento:

Capítulo 1- Estado del arte: Se presenta brevemente el contexto actual de los sistemas de control sísmico y la evaluación del desempeño en edificaciones, haciendo énfasis en la situación actual de estos aspectos en el país.

Capítulo 2- Marco Teórico: Se presentan las consideraciones básicas y las ecuaciones que representan el comportamiento de los sistemas de disipación considerados, así como los elementos teóricos asociados a la simulación de eventos sísmicos y la evaluación del desempeño de edificaciones.

Capítulo 3-Modelación de los disipadores: Este capítulo contiene las técnicas utilizadas para la simulación numéricas de los disipadores considerados y su acople a la estructura principal dentro un modelo de software de análisis estructural.

Capítulo 4- Metodología para el diseño de edificaciones con disipadores tipo TADAS, con disipadores tipo BRB y con sistema de pórticos, y para la evaluación del desempeño ante eventos sísmicos extremos: Establece los pasos a seguir para realizar el diseño de las edificaciones y su posterior evaluación de desempeño ante los eventos sísmicos. Se considera una metodología general para el diseño de las edificaciones con disipadores, y apartados adicionales para la definición del sistema de disipación TADAS o BRB. También se considera la metodología para el diseño de la edificación sin disipadores.

Capítulo 5 Definición de características de diseño y ubicación de las estructuras por analizar: Presenta las características y propiedades de diseño comunes para las edificaciones, así como la selección de aspectos de ubicación y propiedades del suelo adoptadas para el trabajo.

Capítulo 6 Análisis y diseño estructural: Contiene la aplicación de la metodología para el diseño las edificaciones, es decir para la edificación con disipadores TADAS, la edificación con disipadores BRB y la edificación sin disipadores.

Capítulo 7 Análisis no lineal dinámico cronológico y evaluación de desempeño para los escenarios sísmicos planteados: Las edificaciones diseñadas se somete a los escenarios sísmicos planteados y se realiza su evaluación del desempeño. Se obtienen las respuestas estructurales para cada evento en cada edificación, así como la obtención del punto de desempeño, y los estados de plastificación y daño para cada evento.

Capítulo 8 Análisis de resultados: Realiza la comparación de los resultados obtenidos en las edificaciones. Se comparan las respuestas estructurales, las curvas de capacidad y los estados de plastificación en cada edificación para cada evento. También se realiza la evaluación de costos de costos iniciales y de reparación en las edificaciones.

Capítulo 9 Conclusiones: El último capítulo contiene las conclusiones generales de la presente investigación, así como las conclusiones de la etapa de diseño y de la etapa de evaluación del desempeño. También se destacan las recomendaciones para continuar la línea de investigación de estos aspectos a futuro.

Capítulo I

1 Estado del arte

El presente capítulo tiene como objetivo describir brevemente el contexto en el cual se desarrolla la presente investigación. Para ello, se presenta en primer lugar el contexto general de la normativa sismorresistente en el país para continuar con los antecedentes relacionados con la evaluación del desempeño de las edificaciones. Se continua con los métodos de control sísmico entre los que se incluyen los sistemas de disipación controlados por la deformación.

1.1 Contexto del diseño y la normativa sismorresistente en el país

Dentro del campo de la ingeniería civil, las estructuras son diseñadas para soportar diversas de cargas durante su vida útil de servicio, desde las más comunes como las cargas vivas y muertas (las cuales se pueden cuantificar y modelar con un nivel de

confianza relativamente alto), hasta las más complejas de considerar por su naturaleza impredecible y variabilidad en el tiempo como lo son los sismos y los vientos.

Respecto a las acciones impuestas por los sismos, a pesar de tener un alto nivel de investigación dentro del campo de la geología y la sismología, la naturaleza misma de estos eventos hace que hoy no se pueda predecir la localización y magnitud de los terremotos

Esta incertidumbre ha generado la necesidad de implementar códigos o normas, las cuales tienen como objetivo formular los requerimientos por cumplir y los métodos de diseño aceptados para que las edificaciones presenten un comportamiento sismorresistente, y con esto lograr “Reducir a un mínimo el riesgo de la pérdida de vidas humanas, y defender en lo posible el Patrimonio del Estado y de los ciudadanos” (NSR-10-A.1.2.2.1).

En el país se han implementado un total de tres normativas sismorresistentes, el Decreto 1400 del año 1984, el cual fue una adaptación del código Norteamericano ATC-3 realizada en el contexto de reconstrucción de la ciudad de Popayán tras ser fuertemente afectada por un sismo en el año, y se continuó con las versiones de 1998 y 2010 del reglamento de construcción sismorresistente, que vinieron a complementar el decreto original con la inclusión de más materiales estructurales (guadua y madera), un título dedicado a los estudios geotécnicos, protección contra el fuego etc.

La experiencia con la implementación de estas normativas ha sido exitosa, según (García, 2015), pero no escapa a las dificultades que este tipo de códigos han presentado. Destaca también (García, 2015) que “Históricamente los códigos han sido prescriptivos, fijan unas reglas, lo que se permite hacer y lo que no”, y por esto mismo se convierte en una colección bastante extensa de lineamientos mínimos por cumplir, pero que lógicamente no puede abarcar todas las posibles situaciones, y más con el paso del tiempo y la llegada de nuevas tendencias e investigaciones en el área.

En particular, los dos aspectos del diseño sismorresistente considerados en la presente investigación, la evaluación del desempeño y los sistemas de protección sísmica no están desarrollados en norma actual NSR-10, y por eso se hace importante destacar estos aspectos para que las normativas futuras puedan incluirlos.

1.2 Evaluación del desempeño

La formulación prescriptiva puede reducir el diseño al cumplimiento de “requerimientos mínimos” y tras cumplir con estos, las particularidades y respuestas de una estructura pueden dejarse de lado, en vista de que se está cumpliendo con la norma. Esto se materializa en nuestra norma con el espectro de diseño. Las edificaciones se diseñan para resistir un único sismo de diseño con periodo de retorno de 475 años (probabilidad de ocurrencia del 10% en 50 años), pero el diseño no se evalúa la respuesta de la edificación frente a la posible ocurrencia de sismos de mayor intensidad, con lo cual no se conoce el desempeño de la estructura frente a eventos extremos.

En la actualidad las normas de sismoresistencia en el mundo están evolucionando hacia los códigos por desempeño (García, 2015). En esta metodología se escogen unos objetivos que la estructura debe alcanzar, y partiendo de la formulación de diseño prescriptiva los resultados se evalúan ante múltiples escenarios, incluyendo los eventos extremos cuando sea el caso. El diseño se ajusta posteriormente con base a los resultados de la evaluación del desempeño, logrando con esto una optimización en relación con los objetivos específicos definidos para la estructura.

Los análisis utilizados en la evaluación del desempeño son los no lineales, los cuales implican la modelación de la entrada de la edificación en este rango y la identificación de los mecánicos de falla a través de la generación de rotulas plásticas en los elementos estructurales. El nivel de plastificación alcanzado en los elementos se puede relacionar con el nivel de daño en los mismos, consiguiendo con esto verificar el estado de la estructura ante las cargas sísmicas, siendo esto una ventaja adicional que brinda este enfoque.

1.3 Sistemas de protección sísmica en edificaciones

Como se indicó anteriormente, la norma NSR-10 no contempla lineamientos en el área de los sistemas de protección para control sísmico en edificaciones, solamente deja abierta la posibilidad de usarlos y remite a otros documentos como referencia (NSR-10-A.3.8 Y A.3.9). La situación es diferente en otros países, como Japón, México y Chile, en donde los sistemas de protección sísmica han venido teniendo mayor participación en el diseño de edificaciones nuevas y en la rehabilitación de estructuras existentes, presentándose como una opción adicional válida para cumplir con los principios del diseño sismorresistente.

De esta forma, las edificaciones en este país se diseñan según la NSR-10 para que las acciones sísmicas (calculadas y evaluadas por algún método de análisis como fuerza horizontal equivalente o análisis modal espectral) sean resistidas por la rigidez y resistencia de los miembros estructurales, y por la disipación de energía causada por la entrada en plastificación y fisuración de los elementos en el rango inelástico. Con la rigidez de la estructura se garantiza la estabilidad que se requiere durante los eventos sísmicos, de allí el límite dispuesto para las derivas de piso. Mientras que con la disipación de energía en los elementos se generan un daño localizado en algunos elementos, pero que en suma previenen el colapso general de la estructura.

Bajo el anterior principio la demanda sísmica sobre las edificaciones es resistida por los mismos elementos estructurales. Por otro lado los sistemas de protección sísmica parten del otro principio: la demanda sísmica no será satisfecha exclusivamente por la misma estructura (Cardone et al., 2019), sino que un sistema de protección adicional ayuda a cubrir la demanda sobre la estructura. La forma como estos sistemas cumplen con esta función genera la diversidad de

Los sistemas de control sísmico se clasifican principalmente en tres grupos: los sistemas de control activos para disipación de energía, los sistemas de control pasivos para disipación de energía y el aislamiento sísmico (Lee et al., 2015) y (Pimiento et al., 2014). El aislamiento sísmico desacopla la estructura principal del terreno mediante unos elementos diseñados para este fin, para que los efectos del sismo no se trasladen a los elementos estructurales y no estructurales de la edificación. Mientras que los sistemas de disipación, como su nombre lo indica, utilizan mecanismos diferentes a los de la estructura para la disipación de energía, reduciendo la respuesta sobre la edificación.

La diferencia entre los sistemas de control pasivo y activo es "la fuente de potencia requerida para su funcionamiento" (Cano, 2020). Los pasivos no requieren de una fuente externa de activación y responden de forma inercial ante las cargas dependiendo de las propiedades básicas de la estructura (masa y periodo fundamental). Mientras que los sistemas de control activo sí requieren de una fuente externa para su activación y generar las fuerzas que contrarrestan las cargas sísmicas. Lo anterior se logra mediante un sistema de sensores, que, según la respuesta de la estructura, le indica a la fuente la magnitud de las fuerzas que deben generar en el sistema de control (Cano, 2020).

Enfocándose en los disipadores de respuesta pasiva, estos se clasifican en dos grupos: Disipadores dependientes de la deformación y los dependientes de la velocidad. La

diferencia radica en que la disipación de energía en el primer grupo está asociada al desplazamiento relativo entre los extremos del disipador, mientras que en el segundo grupo la disipación está asociada también la velocidad además del desplazamiento relativo entre extremos.

Dentro de los disipadores dependientes de la deformación caben destacar los disipadores metálicos. Estos dispositivos utilizan los ciclos de histéresis de los materiales metálicos para disipar la energía del sismo (Sobarriba Gómez, 2012) . La configuración típica de estos dispositivos consiste en una serie de láminas delgadas interpuestas entre los marcos del edificio y un sistema de arriostramiento que le sirve de soporte a las platinas. Según la geometría de las láminas existen varios tipos de disipadores histeréticos metálicos. Una disposición triangular genera el tipo TADAS (Triangular Plate Added Damping and Stiffness).

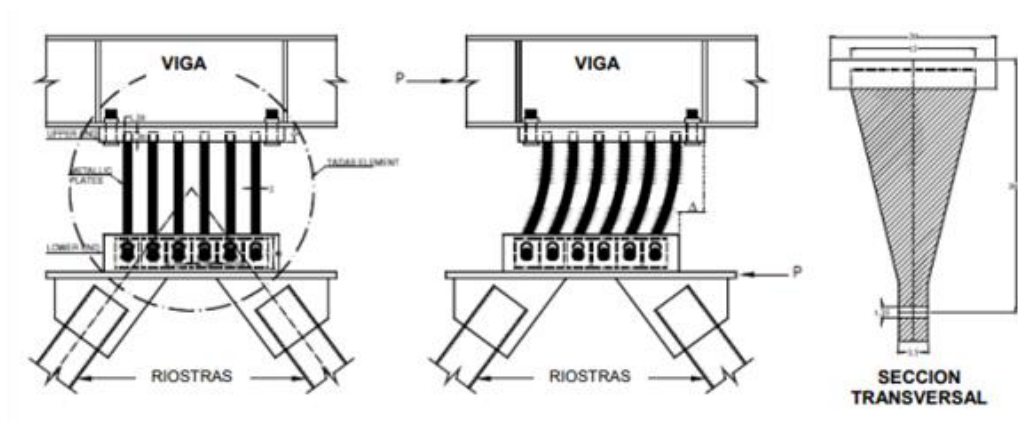


Figura 1-1 Disipadores histeréticos metálicos del tipo TADAS (Sobarriba Gómez, 2012)

Otro tipo de disipador metálico controlado por la deformación, que presenta ventajas en cuanto a su instalación directa sobre las estructuras principales de concreto o acero, son los disipadores del tipo riostra de pandeo restringido BRB (*Buckling Restrained Braces*). Estos dispositivos, en esencia similares a los arriostramientos presentes en pórticos de acero estructural, presentan una mayor ductilidad gracias a su configuración particular que se materializa en disipación de energía durante un sismo. La composición de estos disipadores consiste en un núcleo esbelto de acero recubierto en un material deslizante que a su vez se recubre en un material de relleno como mortero dispuesto en perfil tubular de acero estructural, ya sea circular o rectangular.

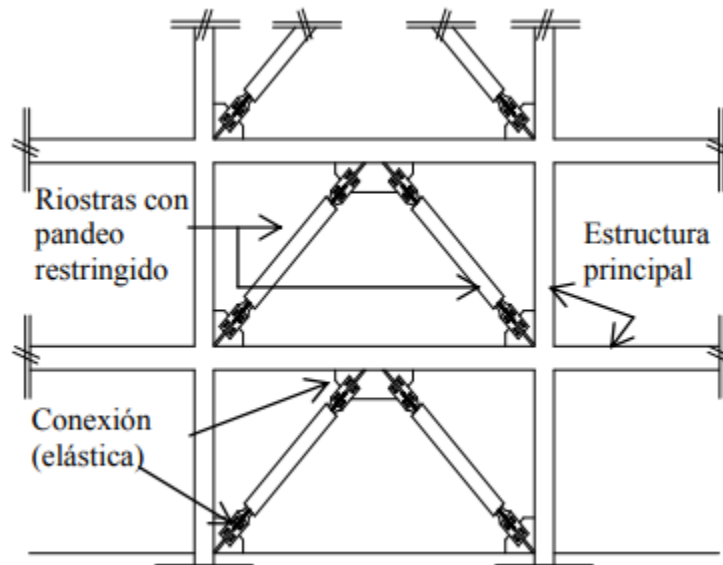


Figura 1-2 Disipadores de arriostramiento de pandeo restringido BRB (Oviedo & Duque, 2009)

Estos dos tipos de disipadores cuentan con investigaciones recientes en el país en lo que respecta a formular metodología para su diseño en edificaciones nuevas de concreto reforzado (Cano, 2020; Velásquez, 2020). De esta forma en la presente investigación se utilizarán estas metodologías para continuar con la línea de investigación de análisis y diseño estructural del programa de Maestría en estructuras de la Universidad Nacional. Estos disipadores fueron escogidos también por que el tipo de material que utilizan es más familiar para los diseñadores, y por eso mismo su costo es más reducido que otras opciones dentro de los sistemas de control sísmico.

Capítulo II

2 Marco Teórico

A continuación, se describen los conceptos teóricos asociados tanto a los dos tipos de disipadores que se van a utilizar (TADAS y BRB), como a los parámetros que se utilizan para la evaluación del desempeño de las estructuras y generación de los eventos sísmicos. Se consideran cuatro apartados para el presente capítulo. En primer lugar, se explican los lineamientos conceptuales asociados a la evaluación de desempeño y la consideración de eventos sísmicos. Se continúa explicando el funcionamiento de los dos tipos de disipadores y las ecuaciones teóricas asociadas. Y se culmina el capítulo considerando los criterios normativos para las edificaciones que utilizan disipadores sísmicos.

2.1 Lineamientos sobre evaluación del desempeño y generación de eventos sísmicos

2.1.1 Evaluación del desempeño

La evaluación del desempeño de una estructura ante un evento sísmico generalmente sigue la formulación del binomio capacidad-demanda, en donde se determina un punto de desempeño para una estructura con la intersección de dos curvas, la de capacidad y la de demanda. Este punto representa la demanda de desplazamiento que exige el sismo de diseño a la estructura, e indicará el estado de plastificación alcanzado por la estructura para la demanda sísmica considerada.

La capacidad de una estructura se define en términos cuantificables con base en la resistencia de sus componentes y la deformación asociada a las cargas que puede soportar según dicha resistencia (Bonett, 2003). En los análisis ante carga lateral producida por los sismos estos parámetros corresponden entonces al cortante en la base y los desplazamientos horizontales, y la curva de capacidad será entonces la que relaciona estos dos parámetros. Esta curva se obtiene a partir de un análisis no lineal estático de plastificación progresiva *push-over*.

Este análisis consiste en la aplicación secuencial de una serie de análisis estáticos mediante la acción de cargas laterales que van aumentando en cada paso. Al terminar cada paso el modelo de la estructura utilizado se actualiza considerando la pérdida de capacidad por la plastificación producida en los elementos, con lo que el estado final de un paso pasa a ser el inicio del siguiente paso. Las respuestas máximas de cortante y desplazamiento de cada paso se registran y grafican en conjunto para conformar la curva de capacidad. El proceso se repite hasta que se llegue a la falla de la estructura o hasta llegar a un desplazamiento de control. Las fuerzas utilizadas se formulan con la distribución lateral del método de la fuerza horizontal equivalente, es decir que solo se tiene en cuenta el aporte del modo fundamental.

Para efectos de comparar la curva de capacidad respecto a la curva de demanda esta se debe transformar a un espectro de capacidad, lo cual se consigue relacionando los valores de cortante y desplazamientos obtenidos con los valores de aceleración y desplazamiento espectral, y así obtener así la curva ADRS (por las siglas en inglés *Acceleration-Displacement-Response-Spectrum*).

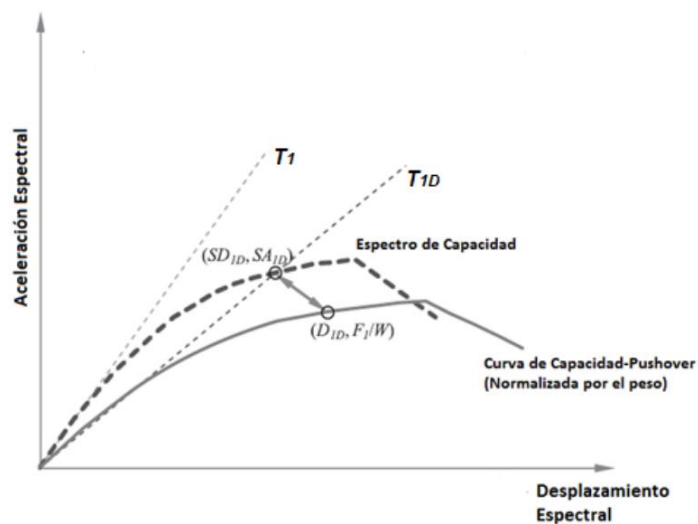


Figura 2-1 Curva de capacidad de las estructuras en términos de ADRS (ASCE 7-16)

Por otra parte, la curva de demanda se obtiene a partir de los espectros de aceleración y desplazamientos espectral de diseño. Estos valores representan las respuestas máximas de diseño para un sistema de un grado de libertad en función de su periodo natural de vibración, tal como se observa en la siguiente imagen.

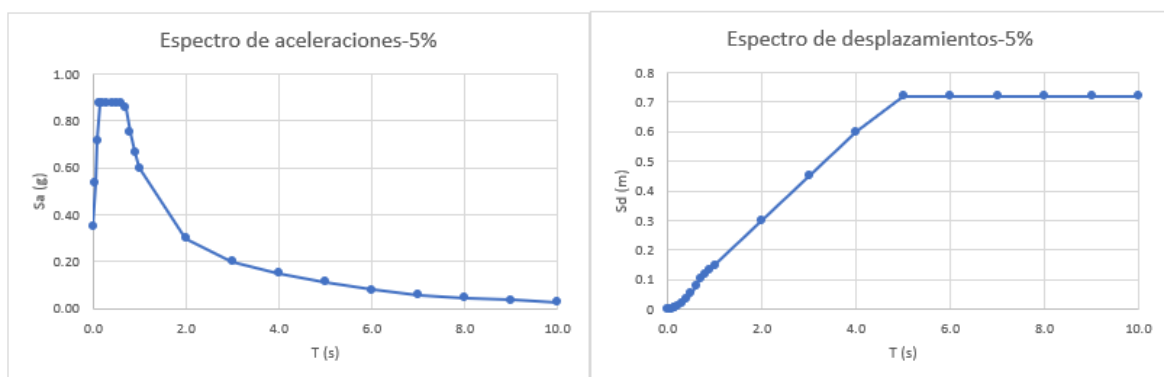


Figura 2-2 Ejemplo de espectros de aceleraciones y desplazamientos espectrales

La curva de demanda se obtiene definiendo un par ordenado mediante los valores de aceleración y desplazamiento espectral para un mismo periodo estructural. Por ejemplo, la curva de demanda asociada a los espectros de la figura 2-2 se presenta en la siguiente imagen:

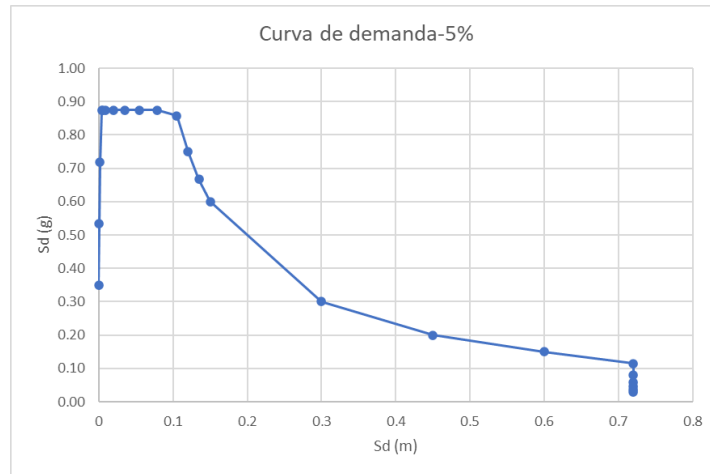


Figura 2-3 Curva de demanda asociada a los espectros de la imagen 2.2

Los espectros normalmente están asociados a un amortiguamiento del 5%. Por lo tanto, para estructuras con valores de amortiguamiento diferente se debe realizar un ajuste mediante un factor **B**, que está asociado al amortiguamiento efectivo de la estructura. El proceso para obtener este factor se encuentra en el ASCE-7-16. Este factor es indispensable para el análisis de estructuras equipadas con sistemas de disipación, en la cuales el amortiguamiento efectivo es mayor al estipulado para edificaciones convencionales del 5%.

Con la definición del punto de desempeño se obtiene una aproximación al comportamiento de la estructura, porque se logra apreciar el nivel de desplazamiento y plastificación obtenido por la estructura para la demanda utilizada en el diseño. Para interpretar adecuadamente los estados de plastificación obtenidos se suelen categorizar en una serie de *niveles de desempeño*, los cuales son una descripción cualitativa de estos estados asociada al nivel de daño en los elementos correspondiente al nivel de plastificación alcanzado.

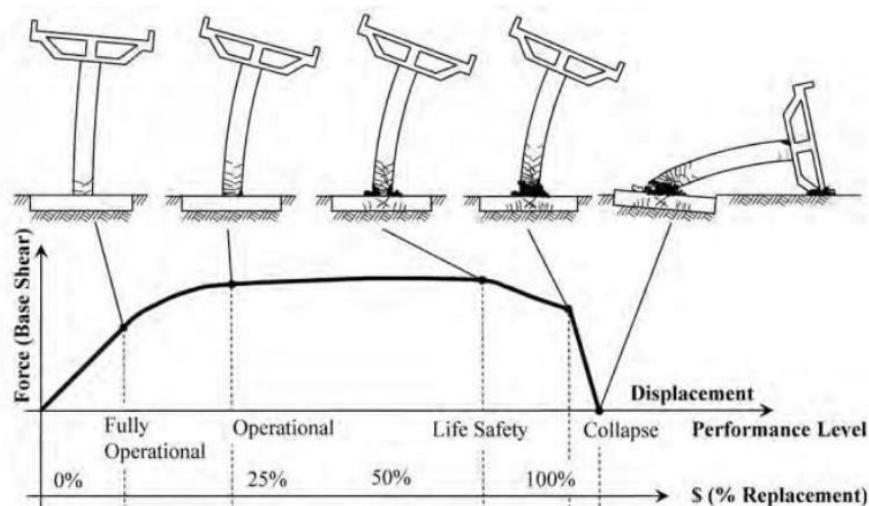


Figura 2-4 Asociación entre el nivel de plastificación y deformación con los niveles de desempeño (Deierlein & Moehle, 2004)

La descripción y caracterización de los niveles de desempeño se encuentran en varias normativas de países que han implementado esta metodología. Por ejemplo, a continuación, se reproduce la definición realizada por el comité de VISION 2000:

Estado de daño	Nivel de desempeño	Descripción de los daños
Despreciable	Totalmente Operacional	Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Los sistemas de evacuación y todas las instalaciones continúan prestando sus servicios.
Leve	Operacional	Agrietamientos en elementos estructurales. Daño entre leve y moderado en contenidos y elementos arquitectónicos. Los sistemas de seguridad y evacuación funcionan con normalidad.
Moderado	Seguridad	Daños moderados en algunos elementos. Pérdidas de resistencia y rigidez del sistema resistente de cargas laterales. El sistema permanece funcional. Algunos elementos no estructurales y contenidos pueden dañarse. Puede ser necesario cerrar el edificio temporalmente
Severo	Pre-Colapso	Daños severos en elementos estructurales. Fallo de elementos secundarios, no estructurales y contenidos. Puede llegar a ser necesario demoler el edificio.
Completo	Colapso	Pérdida parcial o total de soporte. Colapso parcial o total. No es posible la reparación

Tabla 2-1 Niveles de desempeño y descripción cualitativa del daño asociado

La dificultad radica en como clasificar una estructura que está compuesta con varios elementos (incluyendo estructurales y no estructurales) dentro de algunos de los rangos cualitativos de la anterior tabla. Para solventar esta problemática el ATC-40 establece unos niveles de desempeño independientes tanto para elementos estructurales (son más exigentes) como para elementos no estructurales. Y el nivel de desempeño de la estructura será una combinación de los efectos de ambos elementos tal como se aprecia en la siguiente tabla.

Niveles de desempeño no estructural	Niveles de desempeño estructural					
	SP-1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6
NP-A	1-A Operacional	2-A	NR	NR	NR	NR
NP-B	1-B Ocupación Inmediata	2-B	3-B	NR	NR	NR
NP-C	1-C	2-C	3-C Seguridad	4-C	5-C	6-C
NP-D	NR	2-D	3-D	4-D	5-D	6-D
NP-E	NR	NR	3-E	4-E	5-E Estabilidad Estructural	No Aplicable
NR: Combinación No Recomendada						

Tabla 2-2 Niveles de desempeño (ATC, 1996)

Para pertenecer a algunas de las categorías de niveles de desempeño normalmente se establecen criterios cuantitativos en materia de deformación en un elemento particular, dependiendo de su material y su configuración estructural. De esta forma, los softwares de análisis estructural pueden asignar un color a cada nivel de desempeño y presentar gráficamente la pertenencia de los distintos elementos a las categorías, y así brindar un panorama más amplio de desempeño de la estructura.

2.1.2 Generación de acelerogramas y respuesta de sitio

Según lo presentado en el capítulo 1 la evaluación de eventos sísmicos se limita al cumplimiento de los requerimientos estipulados en un sismo de diseño, incluso bajo el enfoque de evaluación del desempeño, los niveles presentados en la tabla 2.2 en el ATC se cruzan con tres sismos (servicio, diseño y máximo esperado), que a su vez están definidos mediante espectros de diseño. Si se pretende realizar una evaluación frente a

otros eventos, y no utilizar espectros de diseño, se puede recurrir a la simulación de acelerogramas.

La simulación de acelerogramas normalmente no es la primera elección de los diseñadores a la hora de analizar y diseñar edificaciones. Pero en casos de edificaciones indispensables o especiales donde las condiciones de análisis son más críticas de diseño, por las condiciones de amenaza sísmica además del uso de la edificación, en la misma NSR-10 (A.2.7) se establece la posibilidad de utilizar familias de acelerogramas para encontrar las cargas de diseño.

Y para definir la familia de acelerogramas la opción más sencilla es utilizar los registros sísmicos. Incluso algunos softwares de análisis estructural incluyen catálogos propios de acelerogramas para ser aplicados en las simulaciones de las estructuras. Esto lleva a que los registros sísmicos de eventos pasados sea la opción común cuando se quiere encontrar la respuesta de estructuras ante eventos sísmicos reales.

El problema de la utilización de registros sísmicos en primer lugar son las posibles limitaciones de encontrar registros de señales sísmicas para un lugar particular. Y la solución a esta limitación no puede ser aplicar un acelerograma cualquiera a una edificación, porque no se tendría en cuenta que el evento sísmico está asociado a las condiciones particulares de ubicación y de su correspondiente nivel de amenaza sísmica.

Esto quiere decir que por ejemplo no tiene sentido tomar un acelerograma de un evento de amenaza sísmica alta para diseñar una edificación en zona de amenaza sísmica baja.

Para situaciones como las anteriores la simulación de acelerogramas es una opción más adecuada para representar el efecto de los posibles sismos que se generen en la ubicación particular de la estructura, bajo sus condiciones de amenaza sísmica y también las condiciones de sitio asociadas al perfil del suelo.

El tema de simulación de terremotos es un tema bastante amplio y utilizado en diversos contextos como la calibración de modelos, complementación de catálogos, etc. y hay varias formas de hacerlo. En la presente investigación se utilizó el método estocástico propuesto por (Boore, 2003). La base del método de Boore es la consideración de que los espectros de amplitud de modelos sismológicos para frecuencias altas tienen un

movimiento aleatorio (Otalora, 2015), y este fenómeno puede representarse en los acelerogramas con la incorporación de un ruido blanco Gaussiano.

El proceso estocástico fue desarrollado en primer lugar por Boore bajo un modelo de fuente puntual, que considera la fuente sísmica concentrada en un punto y la aceleración generada del movimiento fuerte modelada bajo aspectos determinísticos y aleatorios. Los aspectos determinísticos se relacionan con los parámetros de magnitud y distancia a la fuente del terremoto que se quiera simular, y los aleatorios con el mencionado ruido Gaussiano (Otalora, 2015).

El proceso por seguir bajo esta metodología puede consultarse en (Boore, 2003) o explicado por (Otalora, 2015). Básicamente consiste en generar en una banda de tiempo el ruido blanco Gaussiano, transformarlo al dominio de las frecuencias, y afectarlo por una función que recoge las características del sismo, obteniendo en primer lugar el espectro de Fourier de la señal, y posteriormente llevándolo de nuevo al dominio del tiempo para llegar al registro de aceleración, velocidad o desplazamiento buscado. El proceso anterior es modelado por (Boore, 2003) mediante una combinación de funciones:

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f)P(R, f)S(f)I(f) \quad (2.1)$$

En donde:

M_0 : Momento sísmico

f : Frecuencia

R : Distancia entre la fuente y el punto de interés

$E(M_0, f)$: Función que considera los efectos de fuente

$P(R, f)$: Función que considera los efectos de sitio

$I(f)$: Función que considera el tipo de movimiento

(Otalora, 2015).

Las expresiones para las anteriores funciones pueden consultarse en la documentación de referencia (Boore, 2003) , sin embargo, hay que destacar que este modelo no recoge los efectos de la geometría de la falla y la distribución de la ruptura de esta

durante el evento sísmico. Por tal motivo el modelo de fuente puntual evoluciona hacia el modelo de fuente finita.

Bajo este modelo la fuente sísmica se divide en una grilla de pequeños elementos que se consideran cada uno como una fuente puntual. Los efectos de cada una de estas fuentes se superponen considerando un retraso producido por una distribución aleatoria de la dislocación del movimiento fuerte dentro del plano de falla. Con este modelo se obtuvieron mejores resultados, aunque es bastante sensible a las características de división que se le adjudican al plano de falla. Por lo tanto, en las simulaciones de acelerogramas bajo este modelo se debe tener un cuidado para definir estos parámetros.

El proceso descrito es desde el punto de vista matemático algo complejo, con lo que para aplicarlo en la presente investigación se utilizó un software en el área de tratamiento de señales sísmicas. Aplicando la metodología de (Boore, 2003) se obtiene el acelerograma del evento sísmico simulado a nivel de roca. Para encontrar la respuesta a nivel de superficie es necesario considerar los efectos sobre la señal al transitar el perfil de suelo. Esto se logra con el método de *Haskel* para traslación vertical de ondas utilizando en los análisis de respuesta dinámica de suelos.

2.1.3 Análisis no lineal dinámico cronológico

Los acelerogramas de eventos sísmicos son la base fundamental para evaluar el desempeño de las edificaciones en condiciones diferentes a las estipuladas en el diseño, porque con estos se realizan los análisis cronológicos. En un análisis dinámico cronológico la excitación externa corresponde a la aceleración del terreno producida por el sismo, y por consiguiente es variable en el tiempo. De esta forma las respuestas estructurales también son variables en el tiempo. Para un sistema de un grado de libertad las respuestas estructurales se encuentran con la aplicación de la ecuación dinámica de movimiento:

$$m\ddot{U} + c\dot{U} + kU = -m\ddot{U}_g(t) \quad (2.2)$$

En donde

U : Desplazamiento

$\dot{U}$: Velocidad

$\ddot{U}$: Aceleración

$\ddot{U}_g(t)$: Aceleración del terreno

m : Masa

c : Amortiguación

k : Rigidez

Al ser la aceleración producida por un sismo una función de características erráticas, para resolver la ecuación anterior es necesario utilizar a los métodos de integración numérica paso a paso. No obstante, las propiedades de rigidez de las estructuras no se pueden tomar como constantes porque a un nivel de carga considerable el material entrará en el rango inelástico. Para considerar este efecto en la degradación de las propiedades del material con el tiempo, el análisis dinámico cronológico se convierte en un análisis no lineal al incorporar al modelo la variabilidad de las propiedades de rigidez:

$$m\ddot{U} + c\dot{U} + k(t)U = -m\ddot{U}_g(t) \quad (2.3)$$

Con la incorporación de las propiedades en el rango no lineal el análisis tiene mayor complejidad, pero también brinda parámetros adicionales para evaluar el desempeño, en vista que el nivel de deformación alcanzado al superar el rango lineal se relaciona con el nivel de daño de los elementos, y estos a su vez se relacionan con los niveles de desempeño. De esta forma al aplicar un análisis cronológico a un modelo que considere los efectos de plastificación en el rango no lineal, no solo se obtienen las respuestas estructurales variando en el tiempo, sino también el estado de plastificación alcanzado por la estructura en cada instante de tiempo, y con ello el nivel de daño en los elementos producido por el evento sísmico.

La aplicación de este tipo de análisis sobre las edificaciones diseñadas en la presente investigación son el insumo más relevante para realizar la evaluación de las estructuras ante los escenarios sísmicos planteados.

2.2 Disipadores histeréticos metálicos del tipo TADAS

2.2.1 Funcionamiento de los disipadores tipo TADAS

Como se mencionó en el capítulo anterior la función de estos tipos de dispositivos es disipar la energía del sismo mediante la deformación del material, específicamente la deformación de las platinas TADAS, las cuales aprovechando su configuración pueden someterse a varios ciclos de histéresis sin llegar a la falla, disipando la energía durante este proceso de plastificación.

En los disipadores TADAS las platinas se colocan con su sección triangular en sentido perpendicular al eje longitudinal del pórtico tal como se observa en la siguiente figura:

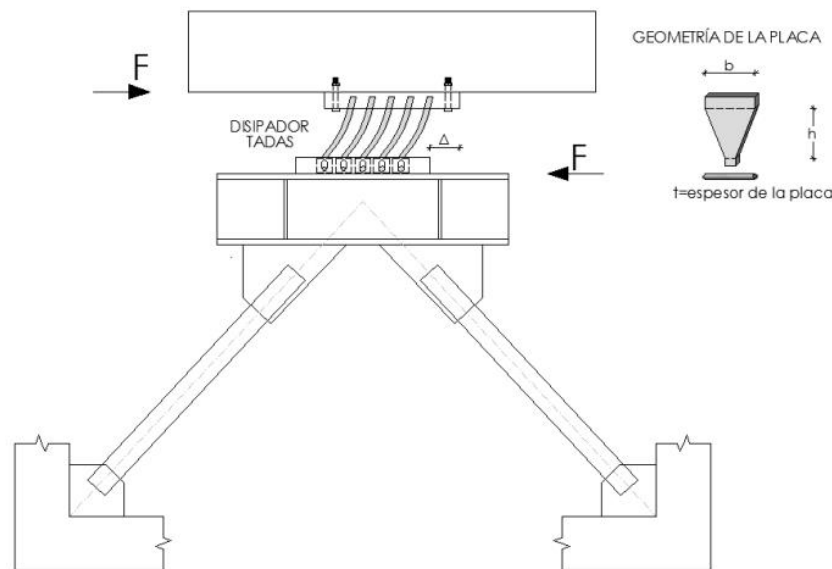


Figura 2-5 Disipador TADAS sobre contraviento Chevrón (Aguir et al., 2017)

Ante una carga lateral proveniente de un sismo las láminas se empiezan a deformar por flexión hasta llegar al rango plástico, y aprovechando las propiedades del acero para grandes deformaciones, las láminas generan un ciclo de histéresis al continuar su proceso de deformación mientras sigan actuando las cargas laterales en ambos sentidos. Bajo este comportamiento, la energía del sismo se disipará en gran medida en estos dispositivos y los daños igualmente se concentran en estos. Con lo anterior, los dispositivos TADAS se convierte en una especie de “fusibles”, y tras un evento tienen la ventaja de que se pueden reemplazar para obtener el mismo comportamiento en eventos posteriores.

Para cumplir con la anterior filosofía el dispositivo TADAS debe cumplir con las siguientes condiciones:

- Las platinas del TADAS deben ser los primeros elementos en fluir. Si esto no se cumple se tendría otro elemento adicional en la estructura que solo aporta rigidez adicional al sistema. Para cumplir esta condición las platinas se diseñan con un acero de bajo esfuerzo de fluencia.
- El contraviento Chevrón donde se ubican las platinas debe ser más rígido y resistente, y no entrar en fluencia antes que estas. Esto porque si los arriostramientos se deforman o fallan no le darán las condiciones de apoyo necesarias a las platinas para que se deformen de la manera deseada.
- Las condiciones de apoyo del dispositivo son de empotramiento en el extremo superior conectado al pórtico de concreto, y de articulación en el extremo inferior conectado al arriostramiento.

Las condiciones de apoyo mencionadas generan la deformación y diagrama de momento en los TADAS presentando en la figura 2-6. El momento tiene la misma forma triangular de la platina y es proporcional a la sección transversal del elemento, lo cual genera que se pueda tener una curvatura uniforme en toda la sección, y así todo el elemento entraría en fluencia al mismo tiempo, evitando una falla local en alguna zona de la platina.

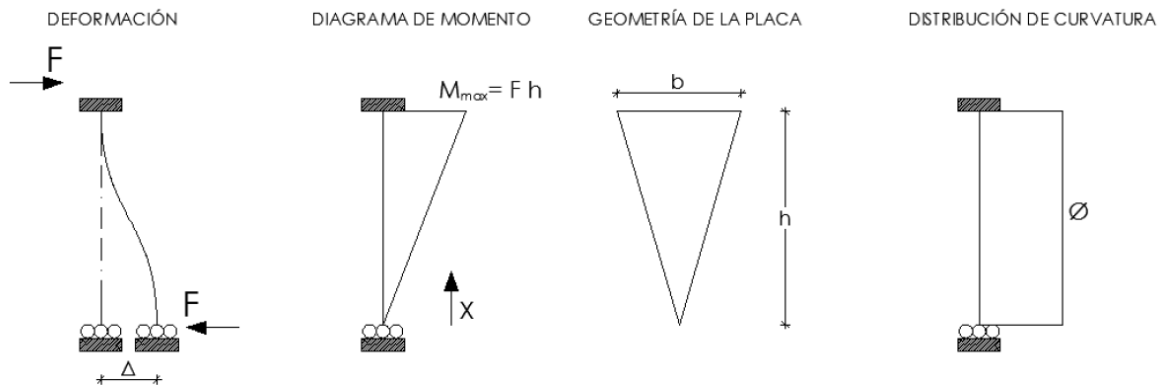


Figura 2-6 Comportamiento del dispositivo TADAS a flexión por carga lateral (Cano, 2020)

Este comportamiento mecánico de las platinas TADAS se suele modelar de manera parecida a las conexiones de acero sometidas a momento, simplificando la relación entre momento y rotación a un modelo bilineal definido por los puntos de fluencia inicial y el punto último de falla. La ventaja de este enfoque es que, siendo platinas de

acero, estos puntos son fácilmente calculables, y aunque el comportamiento real de ciclos de carga es más complejo, para el modelamiento y diseño el enfoque bilineal cumple con los propósitos (ver capítulo 3 de (Cano, 2020)).

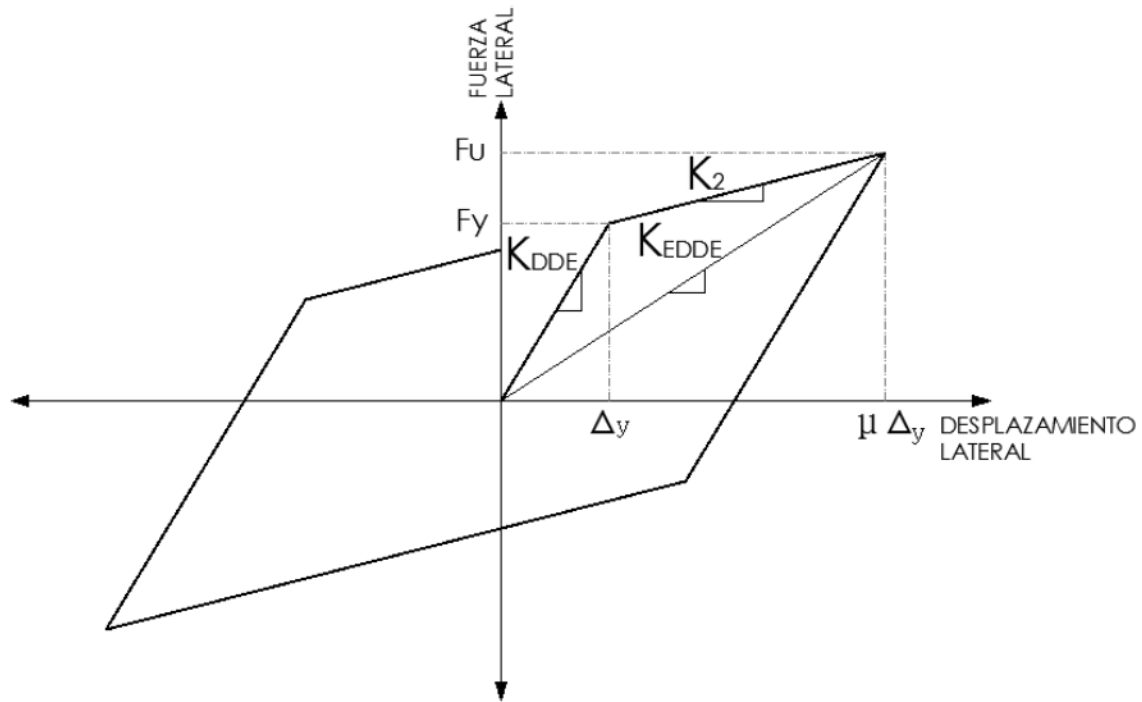


Figura 2-7 Modelo bilineal para el comportamiento histerético (Aguilar et al., 2016)

2.2.2 Comportamiento teórico del dispositivo TADAS

Según la sección precedente para definir el modelo bilineal de los dispositivos TADAS es necesario determinar el punto de fluencia y el punto último. La ecuación básica de la mecánica de materiales que relaciona el momento M con la curvatura ϕ en un comportamiento a flexión es la siguiente:

$$\phi = \frac{M}{EI} \quad (2.4)$$

Donde

E : Modulo De elasticidad

I : Momento de inercia

La sección solicitada a flexión de las platinas corresponde a un rectángulo de lados equivalentes al ancho b y espesor de las platinas t :

$$\phi = \frac{12M}{Ebt^3} \quad (2.5)$$

El momento actuante y el ancho es variable en la altura de la platina, pero como se mencionó en el apartado anterior la variación es proporcional, y se obtiene una curvatura constante. En la figura 2-8 se observa el comportamiento de deformación en las secciones de las platinas TADAS. La flexión en secciones de acero genera una deformación máxima en la fibra más alejada del eje neutro, y un esfuerzo y deformación nula para este eje, esto en el rango elástico. Al plastificar la sección, las demás fibras comienzan a llegar a la deformación máxima paulatinamente hasta que todas consiguen llegar a este límite en el punto último de la sección.

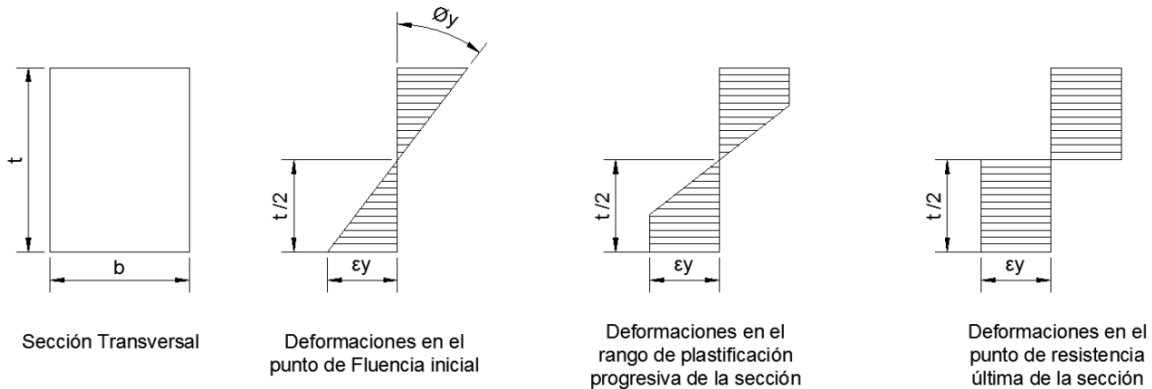


Figura 2-8 Diagrama de deformación en una sección transversal del TADAS (Cano, 2020)

De la figura se observa, bajo el principio de pequeñas deformaciones, que la expresión para la curvatura en el instante de fluencia es la siguiente:

$$\phi_y = \frac{\epsilon_y}{t/2} \quad (2.6)$$

Donde

ϕ_y : Curvatura en el punto de fluencia

ε_y : Deformación en el punto de fluencia

De la misma forma, el momento de fluencia se obtiene con el producto del esfuerzo de fluencia con el módulo de sección elástico:

$$\begin{aligned} M_y &= f_y S_x \\ M_y &= f_y \left(\frac{bt^2}{6} \right) \end{aligned} \quad (2.7)$$

Donde

M_y : Momento en el punto de fluencia

f_y : Esfuerzo de fluencia

S_x : Modulo de sección elástico

Del diagrama de momentos de la figura 2.6 se ve que el brazo del momento máximo es equivalente a la altura de las platinas TADAS, con lo que la fuerza de fluencia es:

$$\begin{aligned} Fy &= \frac{M_y}{h} \\ Fy &= \frac{f_y bt^2}{6h} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Y a partir del valor de curvatura de fluencia se obtienen los valores de rotación y desplazamiento como las primera y segunda integral de dicha expresión respecto a la altura:

$$\begin{aligned} \theta_y &= \frac{\varepsilon_y}{t/2} * h \\ \theta_y &= \frac{2f_y}{Et} * h \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\Delta_y = \frac{\varepsilon_y}{t/2} * \frac{h^2}{2} \quad (2.10)$$

$$\Delta_y = \frac{f_y}{Et} * h^2$$

Considerando que las placas son iguales y trabajan en un sistema en paralelo, las expresiones siguientes representan el punto de fluencia para el TADAS considerando que n es el número de placas:

Momento de fluencia (M_y)	Fuerzas de fluencia (F_y)	Rotación de fluencia (θ_y)	Desplazamiento de fluencia (Δ_y)
$M_y = n f_y \left(\frac{b t^2}{6} \right)$	$F_y = \frac{n f_y b t^2}{6 h}$	$\theta_y = \frac{2 f_y h}{E t}$	$\Delta_y = \frac{f_y h^2}{E t}$

Tabla 2-3 Parámetros para el punto de fluencia en las platinas del TADAS (Cano, 2020)

El fenómeno de plastificación de las fibras descrito en la imagen 2-8 se representa mediante el parámetro de módulo de sección plástico:

$$M_p = f_y Z_x \quad (2.11)$$

$$M_p = f_y \left(\frac{b t^2}{4} \right)$$

$$F_p = \frac{f_y b t^2}{4 h} \quad (2.12)$$

Donde

M_p : Momento en el punto de plastificación

F_p : Fuerza en el punto de plastificación

Z_x : Modulo de sección plástico

Por otra parte, el punto último de resistencia, cuando todas las fibras alcanzan el estado de plastificación depende exclusivamente del tipo de material. Este se logra representar con un factor R_t que depende del material, y relaciona la resistencia última esperada y la

resistencia mínima. Con este factor se definen los siguientes valores para los puntos de resistencia última de momento y fuerza cortante:

$$M_u = R_y f_y \left(\frac{bt^2}{4} \right) \quad (2.13)$$

$$F_u = R_t \frac{f_y bt^2}{4h} \quad (2.14)$$

Para representar el mismo fenómeno en el acero, pero en materia de las deformaciones asociadas al punto último, el valor de ductilidad μ del material que indica el factor de aumento de las rotaciones y desplazamientos desde el punto de fluencia hasta el punto de resistencia última:

$$\theta_u = \mu \frac{2 f_y h}{Et} \quad (2.15)$$

$$\Delta_u = \mu \frac{f_y h^2}{Et} \quad (2.16)$$

Para el conjunto de todas las platinas del dispositivo trabajando en paralelo se tienen entonces las siguientes expresiones que definen el punto último:

Momento último (M_u)	Momento último (F_u)	Rotación última (θ_u)	Desplazamiento Último (Δ_u)
$M_u = n R_t f_y \left(\frac{bt^2}{4} \right)$	$F_u = R_t \left(\frac{n f_y bt^2}{4h} \right)$	$\theta_u = \mu \left(\frac{2 f_y h}{Et} \right)$	$\Delta_u = \mu \left(\frac{f_y h^2}{Et} \right)$

Tabla 2-4 Parámetros para el punto de fluencia en las platinas del TADAS (Cano, 2020)

2.3 Disipadores de arriostramiento restringido de pandeo (BRB)

2.3.1 Funcionamiento de los disipadores BRB

Las riostras de pandeo restringido BRB tienen un comportamiento similar a otros dispositivos de arriostramiento utilizados principalmente en estructuras de acero. Al estar conectados a los nodos de los pórticos de la estructura principal ante cargas laterales, como las provenientes por los sismos, las riostras estarán sometidas a carga axial. Las riostras BRB están conformadas por un núcleo de acero de sección rectangular, en T o en cruz, al cual se le restringe el pandeo por medio de un tubo de acero que se rellena con mortero.

La principal diferencia con otros sistemas de arriostramiento es que al restringir el pandeo lateral pueden ser sometidos a ciclos histeréticos de tensión y compresión generando un beneficio adicional de disipación de energía, lo cual no hacen los arriostramientos normales ya que presentan un comportamiento inestable a cargas de compresión (Velásquez, 2020).

Para permitir los ciclos de carga y descarga en la riostra el núcleo se debe revestir con un material que permita el deslizamiento, y no transfiera carga excesiva al núcleo de acero. Bajo este principio el núcleo de acero puede estar sometido a ciclos grandes de histéresis para que disipe la energía del sismo y concentre los daños del evento, siendo al igual que los TADAS reemplazables posteriormente.

En la siguiente imagen se muestran los elementos de las riostras de pandeo restringido:

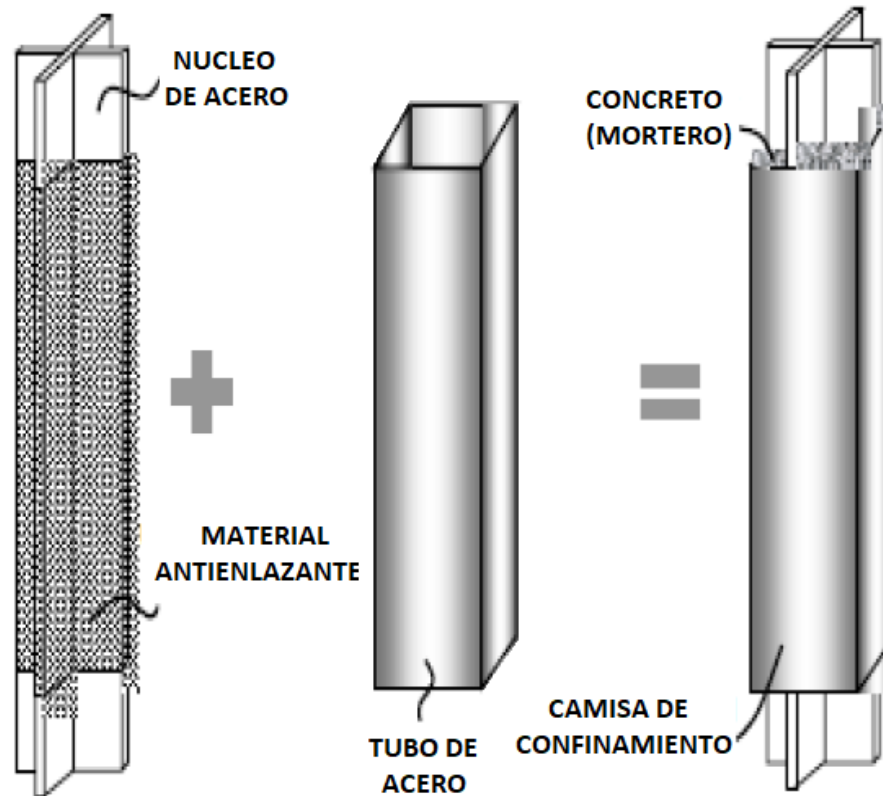


Figura 2-9 Elementos de las riostras de pandeo restringido BRB (Velásquez, 2020)

Las BRB pueden diseñarse para que trabajen como riostras convencionales que le aporten rigidez a la estructura, o como sistemas de disipación que ayuden a controlar las cargas sísmicas concentrando el daño en sí mismas. En la primera metodología de diseño el núcleo de acero debe diseñarse rígido mientras que para el diseño como disipador el núcleo de acero debe entrar en fluencia para que puedan darse los ciclos de histéresis que disipen la energía del sismo. Ambos enfoques en principio son incompatibles y por tanto siempre debe especificarse si el diseño de estos elementos se realizó como riostras o como un sistema de disipación.

2.3.2 Comportamiento teórico de los dispositivos BRB

Aunque las fuerzas internas desarrolladas en los dispositivos TADAS para la disipación es de flexión mientras que en los BRB los ciclos de carga generan disipación por carga axial, el comportamiento es similar y se puede representar de nuevo mediante un modelo bilineal. En la figura 2-10 se puede observar el modelo plástico de Wen, el cual

se ha demostrado en varias investigaciones (Palazzo, Gustavo, 2009) representa adecuadamente a las riostras BRB:

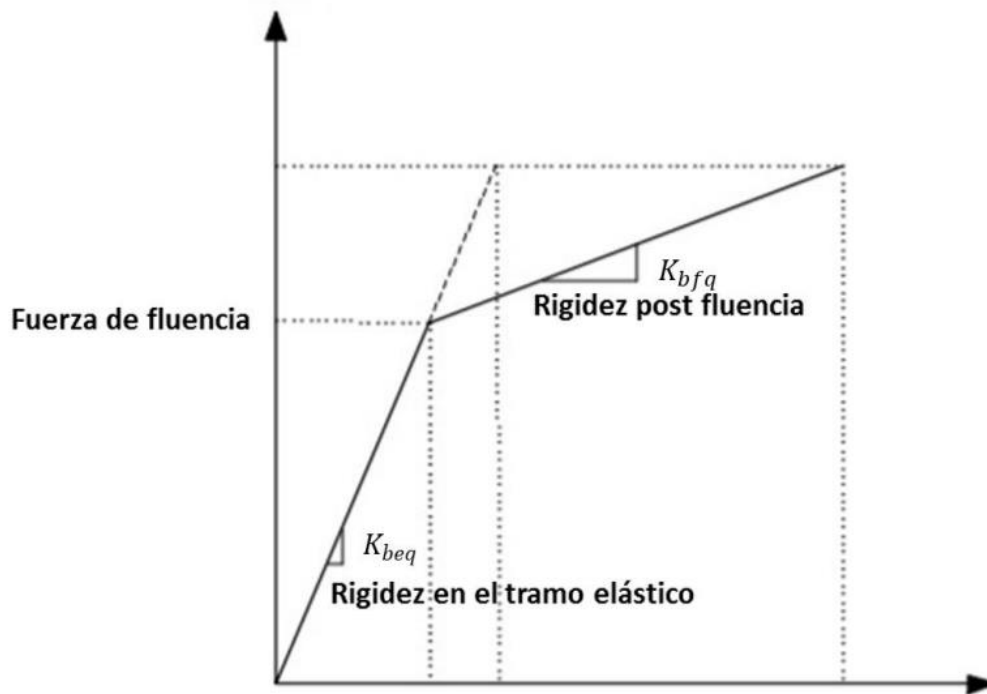


Figura 2-10 Modelo de Wen para el comportamiento de las riostras BRB (Velásquez, 2020)

El modelo de Wen asociado a una riostra BRB se define principalmente con los siguientes parámetros:

- La rigidez equivalente del disipador en el rango elástico (K_{beq})
- La fuerza de fluencia (T_y)
- La relación entre la rigidez en la zona elástica y la rigidez post fluencia (α)

Para obtener la rigidez del disipador en la zona elástica se considera el disipador BRB como un sistema que trabaja en serie conformado por tres elementos, el núcleo plástico y dos zonas elásticas que son las partes del BRB fuera de la restricción al pandeo y donde se localizan las conexiones al pórtico. Estas últimas zonas se diseñan para permanecer en el rango elástico precisamente para que el BRB no falle en esta zona de conexión. En la siguiente figura se apreciar con más detalle las zonas que conforman el sistema en serie:

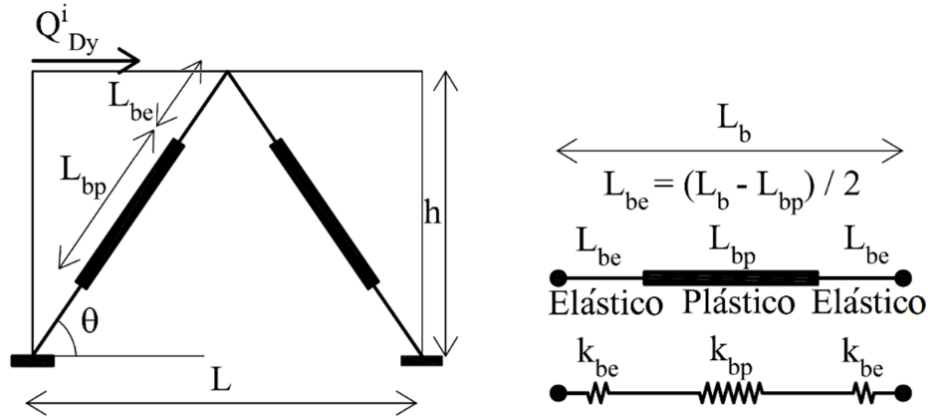


Figura 2-11 Comportamiento del disipador como sistema en serie (Velásquez, 2020)

De la figura se observa entonces que la expresión para la rigidez equivalente del disipador BRB en la zona elástica es:

$$k_{beq} = \frac{k_{be} k_{bp}}{2k_{bp} + k_{be}} \quad (2.17)$$

La definición de la rigidez en la zona plástica está en función de las propiedades del núcleo de acero, mientras que en la zona elástica es más difícil de definir, pero como se verá en la siguiente sección, en un principio se puede asumir más rígida que la zona plástica, y posteriormente verificar esta suposición.

El siguiente parámetro corresponde a la relación entre las rigideces del disipador:

$$\alpha = \frac{K_{beq}}{K_{bfq}} \quad (2.18)$$

Este valor es constante y según la bibliografía consultada sobre este tema varía entre 0.020 y 0.025 (Velásquez, 2020). Por otra parte, la fuerza de fluencia se define a partir de la zona del disipador más susceptible a fluir, es decir el núcleo de acero:

$$T_y = A_{bp} f_{ysc} \quad (2.19)$$

En donde

A_{bp} : Área del núcleo de acero

f_{ys} : Esfuerzo de fluencia del acero

T_y : Fuerza de fluencia del BRB

2.4 Requerimientos y normativa para el diseño de estructuras con disipadores

Como se mencionó anteriormente el código de construcción sismorresistente de Colombia, NSR-10 (A.3.9), no establece criterios normativos para edificaciones con sistemas de disipación. Solamente se deja la posibilidad de utilizarlos mediante la aplicación de dos normativas:

- *"NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings- Provisions and Commentary"*- FEMA 450
- *"Minimum Design Loads for Building and Other Structures"* ASCE 7-05.

La segunda normativa, la de la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles en su versión actualizada ASCE-7-16, es la utilizada como guía principal en los trabajos de (Cano, 2020) y (Velásquez, 2020) para el diseño de disipadores TADAS y BRB respectivamente, los cuales son a su vez son la guía principal utilizada en la presente investigación para la etapa de diseño. Por tal motivo como referencia inicial se describirán los lineamientos generales de este documento.

2.4.1 Parámetros para estructuras con disipadores según ASCE-7-16

Los requerimientos para edificaciones con sistemas de disipación del ASCE-7-16 se encuentran en el capítulo 18 y son aplicables para dispositivos de disipación controlados por velocidad y por deformación. Los requerimientos abarcan aspectos adicionales a la etapa de diseño como la obligación de la revisión del diseño por un experto calificado independiente, los ensayos de laboratorio aplicables a los dispositivos de disipación, los requerimientos para las conexiones de los disipadores a la estructura principal, etc. Sin embargo, aquí se considerarán solamente los aspectos relevantes de la etapa de diseño.

La consideración básica de diseño parte de dividir a la edificación en dos sistemas, el sistema de resistencia principal conformado por la estructura convencional de vigas, columnas, muros, etc. y el sistema adicional para disipación de energía, conformado por los sistemas de control sísmico y todos los elementos de conexión de estos a la estructura principal. En adelante en este documento al sistema de resistencia principal se le llamará siempre estructura principal.

El apartado 18.2 del ASCE 7-16 indica que la estructura principal debe diseñarse para resistir un cortante en la base mínimo, inferior al cortante en la base dado por el sismo de diseño, mientras que la edificación completa considerando el sistema de disipación, es la que debe resistir el total del cortante del sismo de diseño, además de cumplir con los requisitos de deriva. Dicho parámetro de cortante en la base mínimo permite reducir a un 75% las fuerzas sísmicas de diseño para la estructura principal, a menos que no se disponga un mínimo de dos disipadores por nivel (Cano, 2020).

Para las estructuras con disipadores el análisis estructural se debe realizar para dos espectros de diseño cada uno con requisitos diferentes. El primero es el sismo de diseño convencional (MCD) para el espectro de aceleraciones con un periodo de retorno de 475 años, y con su límite usual del 1% de la altura de piso para las derivas. El segundo corresponde al sismo máximo esperado (MCE), el cual a falta de análisis más completos se estima como 1.5 veces el sismo de diseño convencional, y su límite de deriva aumenta al 3% de la altura de piso.

En cuanto al método de análisis el ASCE-7-16 establece como primera opción el análisis dinámico no lineal, pero se permite utilizar métodos simplificados como la fuerza horizontal equivalente o el análisis modal espectral, siempre y cuando se cumplan con algunas condiciones específicas (ver sección 4.1.1.3 del presente documento). Como se verá más adelante para las condiciones de diseño de la presente investigación se cumplen los requerimientos de utilización del análisis modal espectral.

El análisis modal espectral se siguen los lineamientos básicos de esta metodología con la salvedad que las respuestas estructurales, tanto para el sismo de diseño como para el máximo esperado, deben afectarse por un factor ***B***. El factor ***B*** está en función del amortiguamiento efectivo total, que a su vez está en función del amortiguamiento inherente, el amortiguamiento histerético y el amortiguamiento viscoso, que para los casos de TADAS y BRB corresponde al amortiguamiento añadido por los dispositivos de disipación.

El parámetro mencionado de amortiguamiento efectivo total también depende de un factor de ductilidad que en un principio no se conoce, con lo que es necesario plantear un proceso iterativo.

2.4.2 Enfoque de diseño de Oviedo para estructuras con disipadores

Para el diseño del sistema de disipación la normativa ASCE-7-16 no establece metodología específica porque esto depende de las propiedades de cada dispositivo, y existe una variedad considerable de sistemas de disipación. Por tal motivo en las investigaciones de (Cano, 2020) y (Velásquez, 2020) utilizan el enfoque de deriva de piso constante de (Oviedo A. et al., 2010) como base para el diseño de los disipadores. Como se señala en la figura 2-12 se considera que el sistema de disipación y la estructura principal de la edificación trabajan en paralelo para obtener el efecto total requerido en la combinación de ambos elementos.

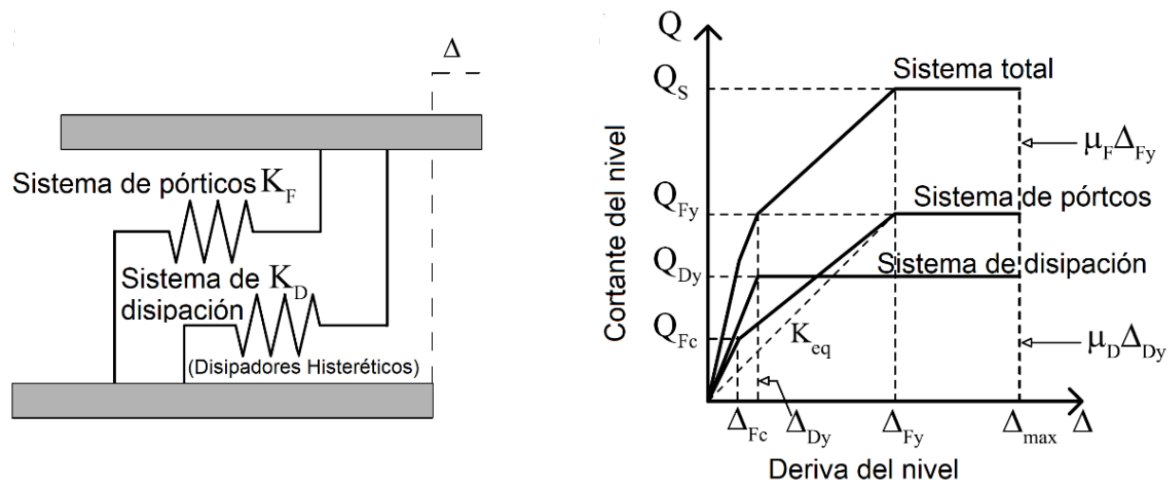


Figura 2-12 Enfoque en sistema en paralelo de Oviedo et al. (a la izquierda el esquema de combinación en paralelo a la derecha el comportamiento de una edificación con sistema de disipación (Velásquez, 2020)

Los términos de la figura se definen a continuación:

Q_s : Cortante de fluencia del sistema completo

Q_{Fy} : Cortante de fluencia del sistema de pórticos

Q_{Dy} : Cortante de fluencia del sistema de disipación

Δ_{Dy} : Deriva de piso de fluencia para el sistema de disipación

Δ_{Fy} : Deriva de piso de fluencia para el sistema de pórticos

Δ_{Fc} : Deriva de piso donde empieza la fisuración

Q_{Fc} : Cortante de piso donde empieza la fisuración

μ_F : Ductilidad del sistema principal

μ_D : Ductilidad del sistema de disipación

En la figura 2-12 se observa que el sistema de disipación entra en fluencia primero (esto para cumplir con las labores de disipación de energía), y posteriormente lo hace el sistema de pórticos. De la figura se plantean las siguientes relaciones entre las anteriores variables.

$$Q_s = Q_{Fy} + Q_{Dy} \quad (2.20)$$

$$K_D = \frac{Q_{Dy}}{\Delta_{Dy}} \quad (2.21)$$

$$K_F = \frac{Q_{Fy}}{\Delta_{Fy}} \quad (2.22)$$

Las anteriores ecuaciones plantean la resistencia total del sistema combinado de pórticos y disipadores, la rigidez del sistema de disipación y la rigidez del sistema de pórticos. Adicionalmente el enfoque de (Oviedo A. et al., 2010) se basa fundamentalmente en las siguientes relaciones:

$$\nu = \frac{\Delta_{Dy}}{\Delta_{Fy}} \quad (2.23)$$

$$\beta = \frac{Q_{Dy}}{Q_s} \quad (2.24)$$

En donde ν es la relación de deriva de fluencia de piso y β es la relación de resistencia del sistema de disipación frente a la estructura completa. Para obtener el efecto requerido la relación de deriva de fluencia debe ser menor que la unidad. En su trabajo

(Oviedo A. et al., 2010) estudio la influencia de estos parámetros en el comportamiento de estructuras con sistemas de disipación y llega a recomendaciones de valores para estas relaciones.

A partir de las ecuaciones anteriores se pueden definir las características necesarias para el sistema de disipación realizando el siguiente proceso. En primer lugar, se obtienen los valores de cortante y deriva de fluencia para la estructura principal de pórticos mediante un análisis *push over*. En segundo lugar, se fijan valores constantes para las relaciones de deriva de fluencia y de rigidez. Y en tercer lugar se despejan los valores requeridos de deriva de fluencia y cortante de fluencia para el sistema de disipación a partir de las ecuaciones 2.23 y 2.24.

De esta forma, tomando como constantes estas relaciones y obteniendo en primer lugar los valores de cortante y deriva de fluencia para la estructura principal de pórticos, posteriormente se determinan los valores necesarios para el sistema de disipación, y entonces se dimensionan los elementos del sistema de disipación con valores de deriva y cortante de fluencia cercanos a los necesarios por el enfoque de deriva de piso constante. El proceso se realiza por cada nivel de la edificación.

Los valores de cortante y deriva de fluencia para la estructura principal se determinan a partir de un análisis no lineal estático de plastificación progresiva *push over*.

2.4.3 Análisis no lineal estático de plastificación progresiva (*Push over*)

El análisis de *push over* se realiza a partir de la aplicación secuencial de cargas laterales que se van aumentando paulatinamente en cada paso del análisis. Por cada paso se determina el estado de plastificación de la estructura y la pérdida de capacidad consecuente en cada elemento para calcular nuevamente las propiedades de rigidez de la estructura y repetir el análisis en el siguiente paso partiendo del estado del paso anterior. En cada paso se registra la respuesta de la estructura en términos de cortante y desplazamiento para definir la curva de capacidad *push over*.

En el análisis A.3 de la NSR se realizan las recomendaciones generales para la realización de un análisis *push over*, entre las cuales se destacan las más importantes a continuación:

- El análisis debe realizarse para las cargas laterales actuando en conjunción con las cargas muertas y no menos del 25% de la carga viva. Para cumplir esto los análisis parten de un estado inicial causado precisamente por la carga muerta y el 25% de la carga viva.
- Las fuerzas laterales se aplican en cada centro de masa y son proporcionales a la distribución de las fuerzas laterales obtenidos por el método de fuerza horizontal equivalente para el modo fundamental.
- El análisis se continua hasta que el desplazamiento del punto de control alcance el 150% del desplazamiento objetivo definido en la ecuación A-3.2-2 de la NSR-10 o hasta que se llegue a un estado de colapso de la estructura.

Capítulo III

3 Modelación de los disipadores

En el presente capítulo se presentan las técnicas adoptadas para modelar el comportamiento de los disipadores TADAS y BRB dentro del modelos de las edificaciones para los análisis estructurales.

Cabe señalar que, los softwares comerciales de análisis estructural tienen entre sus opciones la inclusión de elementos particulares a los que se les puede asignar propiedades en el rango inelástico para los análisis no lineales. No obstante, al estar asociados a ciertas simplificaciones, no muestran el estado de plastificación de los elementos. Además, al ser elementos exclusivos de los softwares la trazabilidad de resultados se dificulta.

Por tales motivos en la presente investigación se optó por utilizar modelaciones más generales, pero que igualmente representan bien el comportamiento de los disipadores considerados. Inicialmente se muestra la técnica de modelación para los dispositivos TADAS de (Cano, 2020) . Luego se presenta la técnica de modelación de los dispositivos BRB utilizada por (Velásquez, 2020) y se propone una modelación nueva. Posteriormente se presenta un estudio sobre la influencia de la ubicación de los disipadores en los resultados de los análisis.

3.1 Modelación de los disipadores tipo TADAS

La modelación de los dispositivos TADAS se realiza utilizando la técnica presentada por (Cano, 2020) en donde las platinas que conforman la parte principal del disipador se modelan como un elemento *frame* dentro del ambiente de *SAP2000*, que son los elementos convencionales para modelar elementos estructurales como vigas y columnas. Pero cambiando algunas configuraciones en cuanto a la sección y las condiciones de apoyo de este elemento se logró que representará bien el comportamiento particular que causan los disipadores TADAS en su interacción con los pórticos de concreto.

3.1.1 Simulación numérica del comportamiento de los disipadores TADAS

SAP2000 posee una opción denominada “Sección no prismática” con la cual se puede considerar el ancho variable de las platinas y configurar la forma triangular de los TADAS (Ver Figura 3-1). Para esto se definen dos secciones para los extremos del Frame, una con el ancho mayor de las platinas y otra con un ancho menor (ver figura 3-

2), y en la opción de longitud para la sección no prismática se ingresa la altura de las platinas (ver Figura 3-3).

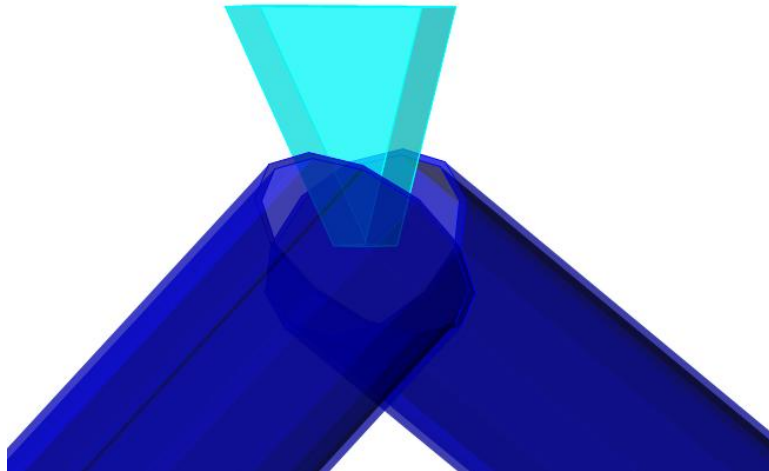


Figura 3-1 Modelación de la forma de los disipadores TADAS dentro de SAP2000

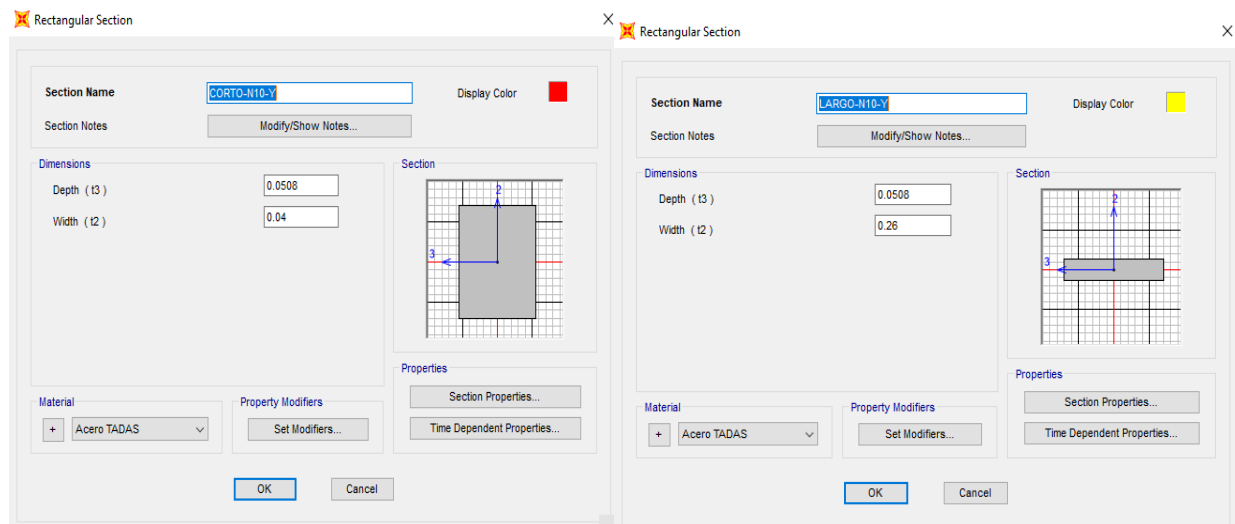


Figura 3-2 Secciones para los extremos de la sección no prismática (Ej base=0.26m)

Nonprismatic Section Definition ✕

Nonprismatic Section Name **Display Color** ■

Section Notes

Start Section	End Section	Length	Length Type	EI33 Variation	EI22 Variation
CORTO-N10-Y	LARGO-N10-Y	0.26	Variable	Cubic	Linear

Figura 3-3 Definición de sección no prismática para las platinas TADAS (Ej: Largo=0.26m)

La cantidad de platinas se considera en la modelación escalando las propiedades de momento, cortante, masa y peso de las secciones de los extremos por el número total de platinas del disipador:

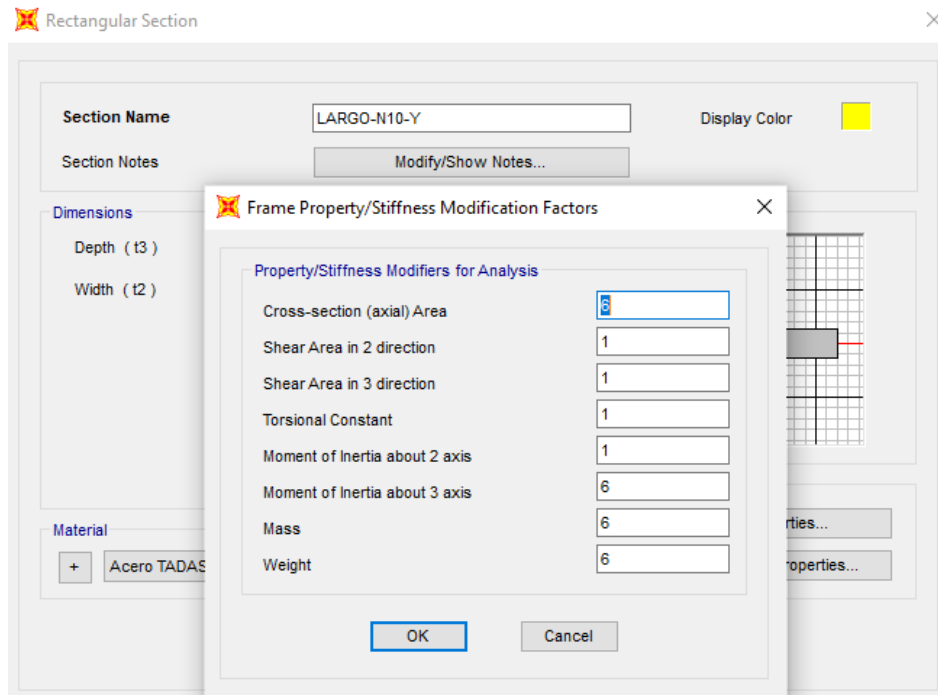


Figura 3-4 Escalamiento de las propiedades al número de platinas (Ej: 6 Platinas)

Las condiciones de borde señaladas por (Cano, 2020) son las siguientes:

- En el extremo superior en la conexión al pórtico se asumen completamente empotradas.
- En el extremo inferior en la conexión a los arriostramientos se libera la acción a momentos y carga axial.

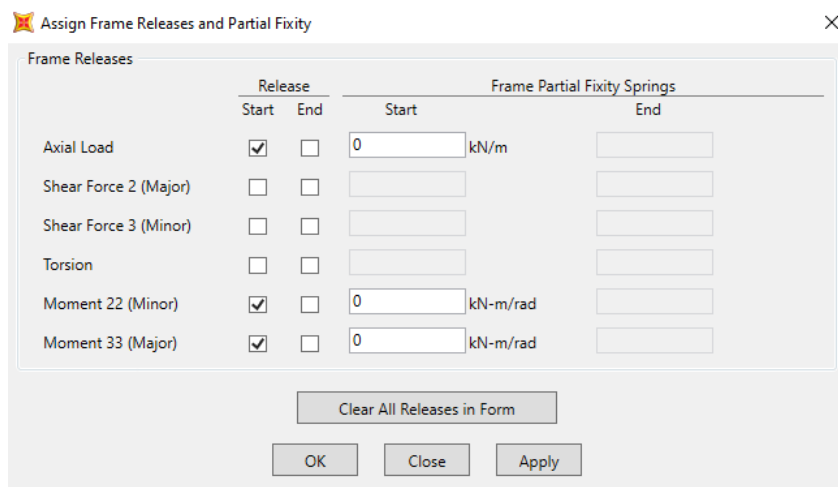


Figura 3-5 Liberación de las acciones a momento y cortante en el inicio del elemento que corresponde al extremo inferior de las platinas

Estas condiciones de borde simulan el mecanismo de las platinas TADAS presentado en la figura 2-6. Y como la curvatura en todo el largo del elemento es la misma, las propiedades en el rango no lineal se pueden representar por medio de una rotula plástica en la mitad de elemento. Las propiedades corresponden a las relaciones de momento y rotación de las platinas, las cuales se obtienen a partir de las ecuaciones de las tablas 2-3 y 2-4 y se ingresan en el formato del ASCE 41-13:

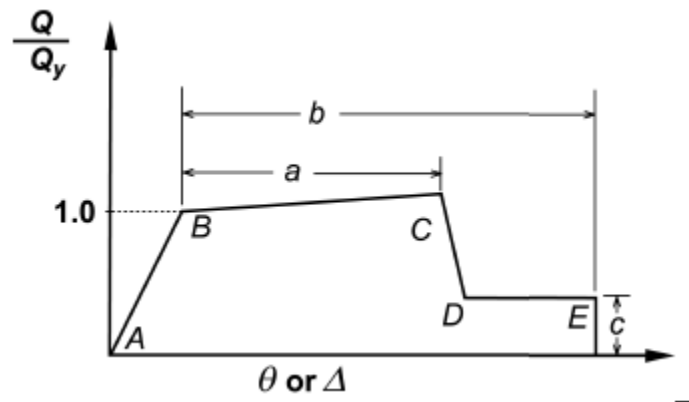


Figura 3-6 Representación del comportamiento de materiales en rango elástico e inelástico según el ASCE 41-13.

El formato del ASCE 41-13 escala las propiedades respecto al punto de Fluencia (B), y el punto último corresponde al punto C de la figura 3-6. Los demás puntos del formato se obtienen a partir de las constantes a , b y c , que dependen del material y el tipo del miembro estructural. Para el presente caso se extraen estos valores de las tablas para elementos de acero trabajando a flexión como vigas. Estas propiedades se ingresan dentro de la opción "Frame Hinges Properties" de SAP2000. Los valores de momento corresponden al total de platinas.

Frame Hinge Property Data for TADAS-N10-Y - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Rotation/SF
E	-0.2	-24
D	-0.2	-14.65
C	-1.8	-13
B	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.8	13
D	0.2	14.65
E	0.2	24

☒ Symmetric

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero
☐ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Rotation

	Positive	Negative
☐ Use Yield Moment Moment SF	234.838	
☐ Use Yield Rotation Rotation SF	0.0179	

(Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Rotation/SF)

	Positive	Negative
☒ Immediate Occupancy	2	
☐ Life Safety	4	
☐ Collapse Prevention	6	

☐ Show Acceptance Criteria on Plot

Type

☒ Moment - Rotation
☐ Moment - Curvature
Hinge Length
☐ Relative Length

Hysteresis Type And Parameters

Hysteresis Type: Isotropic

No Parameters Are Required For This Hysteresis Type

OK Cancel

Figura 3-7 Ingreso de propiedades para la rótula plástica en el rango no lineal

El disipador TADAS se completa con los arriostramientos de apoyo con su sección y material correspondiente. Como estos elementos van a permanecer en el rango lineal no es necesario ingresar rotulas plásticas en ellos. Esta suposición hay que verificarla en la etapa de diseño de las edificaciones, ya que los arriostramientos no deben plastificar o pandearse antes de la plastificación de los TADAS.

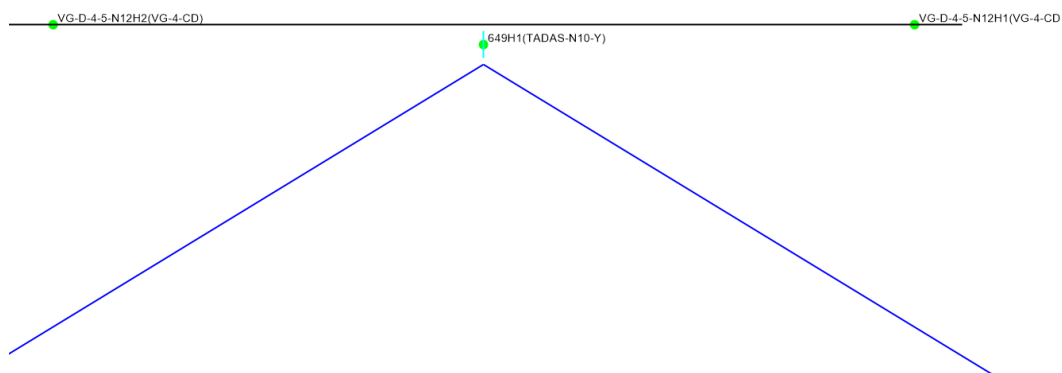


Figura 3-8 Modelamiento del disipador en SAP2000 (Notar que solo el elemento de viga y las platinas tienen rotula asignada no los arriostramientos)

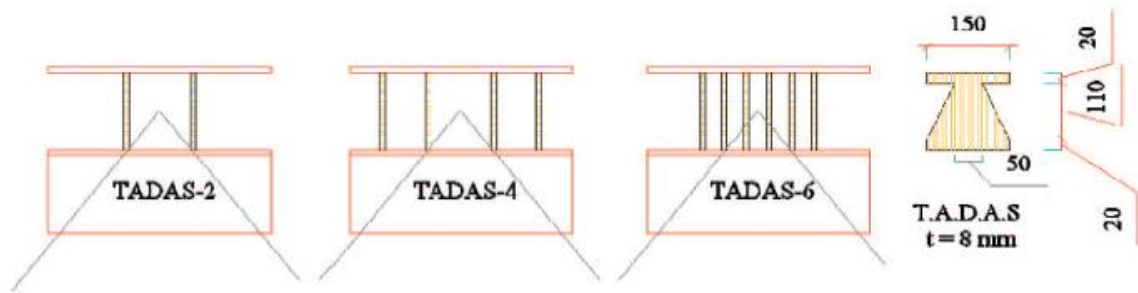


Figura 3-9 Detalle de la geometría de los pórticos del ensayo de laboratorio (TahamouliRoudsari et al., 2018)

El concreto tenía una resistencia a la compresión de 34.1 MPa mientras que las resistencias a fluencia de los aceros están en la tabla 3-1; son varios valores no solo para las platinas TADAS sino para los arriostramientos, elementos de conexión, etc. El ensayo realizado sobre los pórticos registró los valores de carga y descarga para conformar los ciclos de histéresis, sin embargo, para el ejercicio de calibración (Cano, 2020) solo obtuvo la curva de capacidad mediante un análisis *push over*, ya que era suficiente para verificar la adecuada representación en la simulación de los dispositivos de disipación.

Los análisis de *push over* se realizaron en SAP2000 configurando el desplazamiento objetivo un 8% encima del máximo alcanzado en los ensayos. Los resultados comparativos respecto a los ensayos de laboratorio, y frente a la calibración realizada por (Cano, 2020) se presentan a continuación.

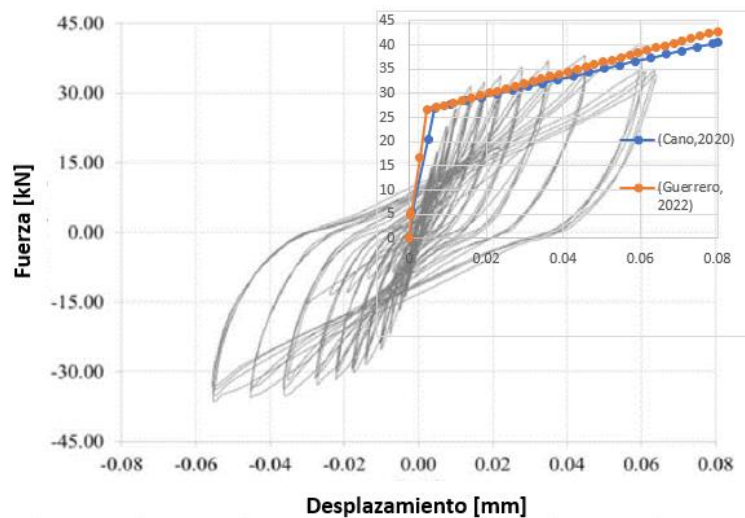


Figura 3-10 Resultados de calibración para el pórtico sin disipadores

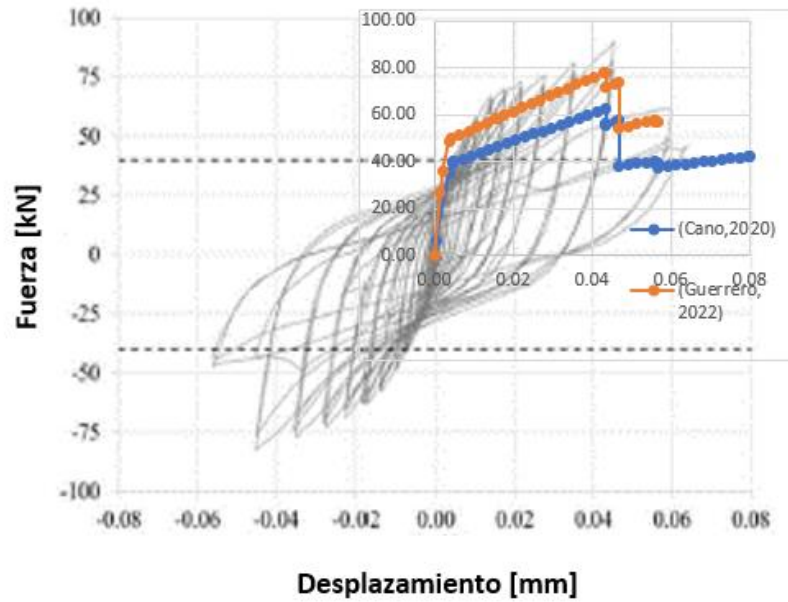


Figura 3-11 Resultados de calibración para el pórtico con TADAS (2 Platinas)

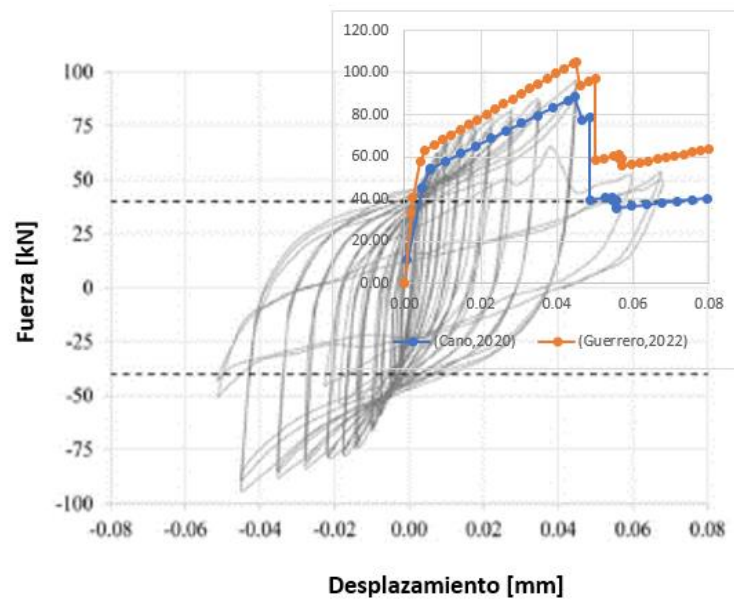


Figura 3-12 Resultados de calibración para el pórtico con TADAS (4 Platinas)

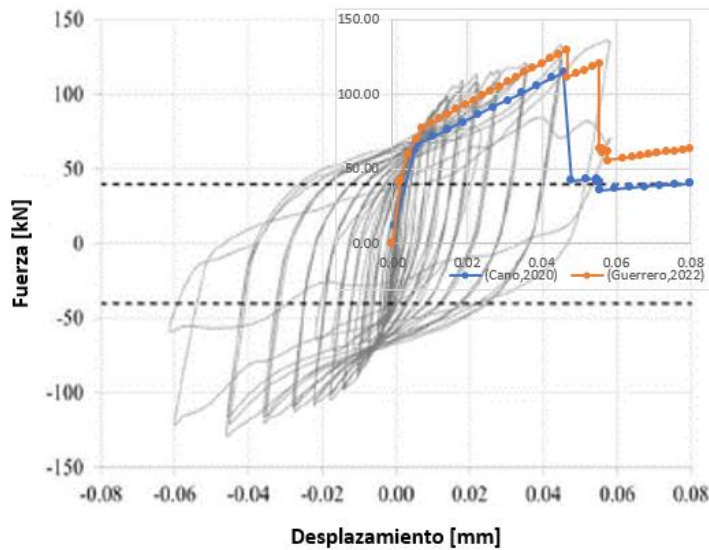


Figura 3-13 Resultados de calibración para el pórtico con TADAS (6 Platinas)

Como puede observarse las curvas de capacidad tienen diferencias entre la modelación realizada en esta investigación y la determinada por (Cano, 2020), pero se evidencia que estas curvas se aproximan a la envolvente de los ciclos de histéresis experimentales. Incluso la pérdida de capacidad obtenida para desplazamientos altos vista en los ensayos experimentales también se logra captar en las simulaciones realizadas. Por lo tanto, esta metodología de simulación es adecuada para efectos de diseño.

En cuanto a las diferencias respecto al modelamiento de (Cano, 2020) son aceptables considerando que el proceso también depende de la asignación de las características de las rótulas de los elementos que pueden variar y afectar los resultados. Es de notar por que para el pórtico con dos platinas TADAS la modelación realizada (ver figura 3-10) se aproximó más a los ciclos de histéresis del ensayo. De otra parte, puede observarse en la figura 3-14 el desarrollo de los estados de plastificación durante el análisis *push over*, que coinciden con lo reportado por (Cano, 2020) y la descripción de los ensayos de laboratorio, esto como complemento a la corroboración de la técnica de modelación propuesta.

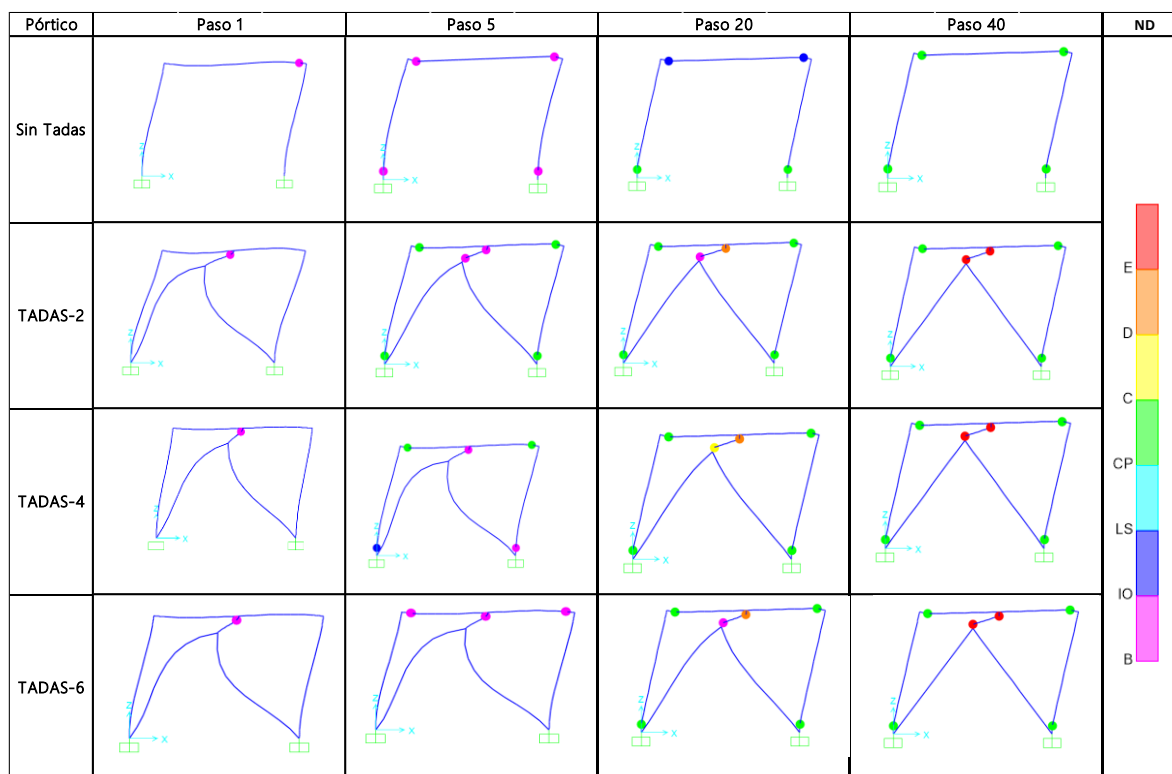


Figura 3-14 Estados de plastificación para los pórticos de la calibración de la modelación de disipadores TADAS

3.2 Modelación de los disipadores tipo BRB

En la presente sección se muestra la técnica de modelación utilizada por Velásquez (2020) para representar el comportamiento de los disipadores tipo BRB, y se presenta una modelación de los disipadores tipo BRB propuesta en esta investigación. Se comparan ambas técnicas respecto a un ensayo experimental.

3.2.1 Calibración de dispositivos BRB como elemento *link* (modelo Wen)

Los arriostramientos BRB han sido modelados en varias investigaciones mediante el modelo bilineal de Wen. Este modelo se encuentra dentro del software SAP2000 como una de las opciones disponibles para asignar a un elemento tipo *link*, el cual es simplemente un elemento de conexión entre dos nodos al que se le asigna un comportamiento en el rango no lineal.

La opción anterior fue la utilizada (Velásquez, 2020) donde los únicos parámetros necesarios para realizar la configuración del elemento *link* para simular el comportamiento de las riostras BRB son: la rigidez equivalente del disipador en la zona elástica K_{beq} la fuerza de fluencia en el disipador T_y , la relación de rigidez α y el exponente de fluencia n . El parámetro adicional n sirve para controlar la forma de la curva de capacidad obtenida en el elemento. Estas propiedades se ingresan en la siguiente ventana en *SAP2000*.

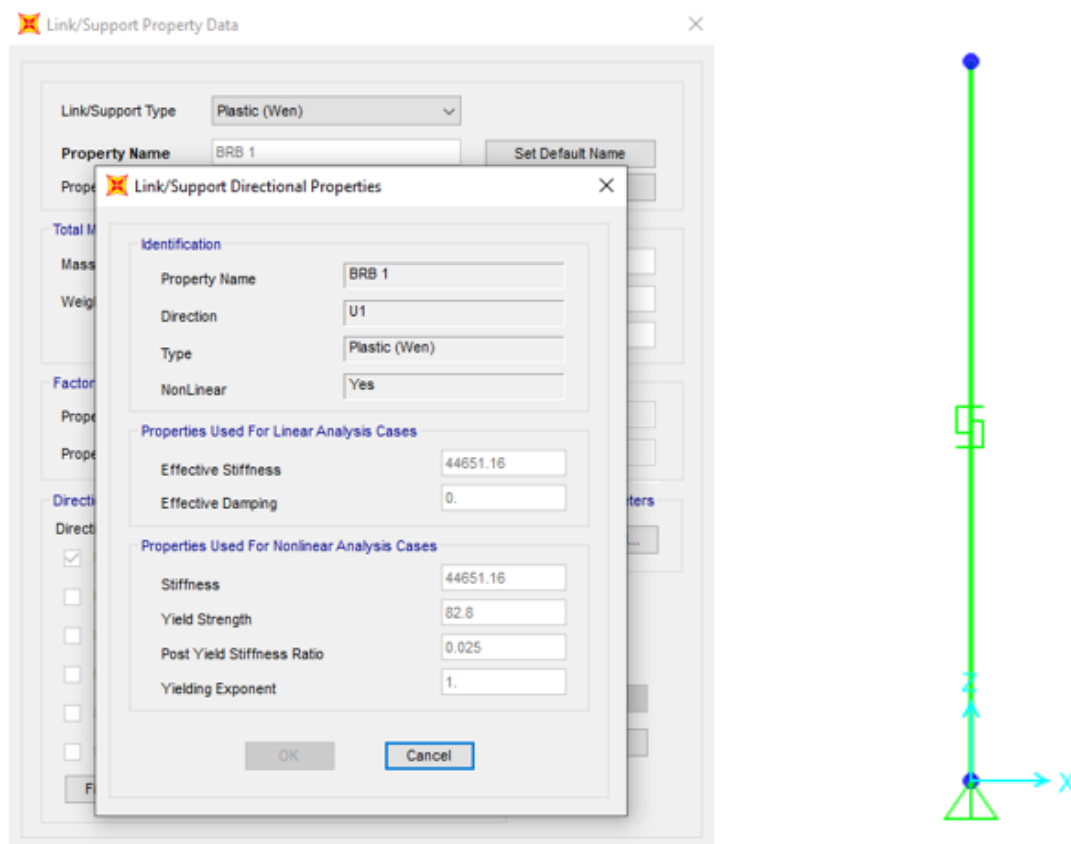


Figura 3-15 Configuración del elemento link a partir del modelo de Wen dentro de SAP2000

El modelamiento presentado para los BRB a partir del elemento *link* fue calibrado por (Velásquez, 2020) comparando los resultados obtenidos frente a un modelo a escala de un BRB ensayado en laboratorio (Cancelado, 2012). En la investigación de (Cancelado, 2012) se realizó el montaje y ensayo de una serie de riostras BRB obteniendo como resultado principal los ciclos de histéresis del elemento.

La calibración se realizó nuevamente mediante un análisis *push over* del elemento *link* con las características de las riostras ensayadas, esperando que la curva de capacidad obtenida se corresponda con las envolventes de los ciclos de carga y descarga

obtenido de laboratorio. En la siguiente tabla e imagen se presentan las características de las riostras BRB analizadas.

	BRB1/2	BRB3/4	Unidades
L_{bp}	1.075	1.075	m
A_p	240	450	mm ²
K_{bp}	44651.16	83720.93	kN/m
T_y	82.8	155.25	kN
Ratio	0.025	0.025	adim.
L_{be}	0.313	0.313	m
A_{be}	2400	4500	mm ²
K_{be}	1536000	2880000	kN/m
K_{beq}	42197.80	79120.88	kN/m
Δ_{bp} [m]	0.001854	0.0019	m
T_{max}	109.30	204.93	kN
K_{bpf}	1116.28	2093.02	kN/m
K_{beqf}	1114.6589	2089.9855	kN/m
Δ_{bei}	0.0020	0.0020	m
Δ_{bp}	0.0257	0.0257	m

Tabla 3-1 Propiedades de las riostras BRB de la investigación de (Cancelado, 2013) utilizadas para la calibración del elemento Link

Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 4
BRB 1	BRB 2	BRB 3	BRB 4
Área 1  2.4 cm ²	Área 1  2.4 cm ²	Área 2  4.5 cm ²	Área 2  4.5 cm ²
Cuadrada  100x100x3	Circular  114,3x2(4.5"x2mm)	Cuadrada  100x100x4.5	Circular  113,5x4(4"x4mm)

Figura 3-16 Secciones de las riostras BRB utilizadas en la calibración. Tomado de (Cancelado, 2012)

El análisis *push over* se configuró para obtener el mismo desplazamiento máximo obtenido en los ensayos de laboratorio. Los ensayos de (Cancelado, 2012) correspondían a las riostras BRB aisladas, es decir no consideraban su interacción con un pórtico, por tal motivo para esta ocasión el elemento *link* se colocó de la misma forma.

Como la configuración del elemento *link* en SAP2000 es relativamente sencilla y no depende de análisis adicionales sobre la sección o partes del BRB, los resultados obtenidos al repetir esta modelación coinciden con los presentados por Velásquez (2020), y se presentan a continuación para el BRB 1.

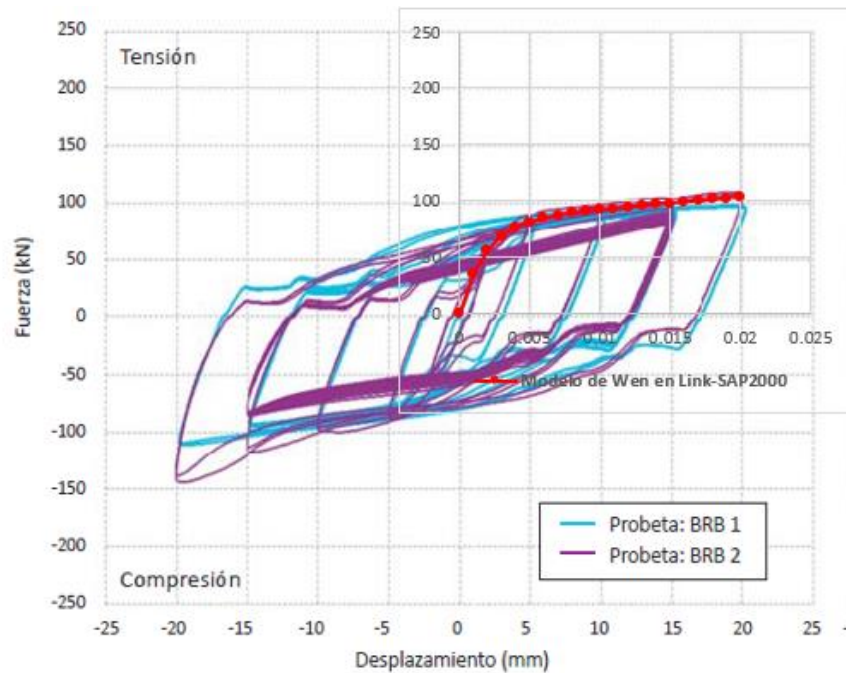


Figura 3-17 Comparación de los resultados experimentales frente al modelamiento con el elemento Link (modelo de Wen) en SAP2000.

Como puede observarse los resultados son muy precisos, la curva de capacidad del elemento *link* se sobrepone como envolvente de los resultados experimentales. Sin embargo, esta modelación tiene dos limitaciones importantes

- A pesar de que al elemento *link* se le puede asignar una masa para representar el efecto del peso de este elemento a la hora de su interacción dentro de una estructura de pórticos, la distribución de dicha masa no sería equivalente a la real de la riostra BRB, y por tal motivo los efectos inerciales y de rigidez dados por los sistemas BRB instalados son un poco subestimados dentro del análisis, a pesar de que el comportamiento en el rango no lineal si estuviera bien representando con el elemento *link*.
- Como las propiedades del elemento *link* en el rango no lineal se ingresan como propiedades del modelo *Wen*, no se consideran de la forma usual mediante las rotulas plásticas que se forman al aumentar la carga en el elemento, impidiendo

con esto que el nivel de plastificación en los elementos se pueda observar gráficamente.

Las anteriores limitaciones, aunque no invalidan la modelación de los disipadores BRB mediante el elemento *link*, sí indican que para análisis en donde se requiera verificar rápidamente el nivel de plastificación y el daño dentro de los sistemas de disipación, como los que se requieren en la presente investigación, la modelación con los elementos *Link* no muestra la información suficiente. Por tal motivo se buscó otra forma de modelación para las riostras de pandeo restringido.

3.2.2 Propuesta de modelación de dispositivos BRB como elemento *frame* con propiedades inelásticas controladas por fuerza.

Aunque no estaba previsto, considerando las limitaciones para el elemento *Link*, en la presente investigación se requirió plantear una técnica de modelación para las riostras BRB. Se decidió utilizar un elemento tipo *Frame* con propiedades en el rango plástico para trabajo en fuerza axial, ya que esta opción está presente en los softwares comerciales. En especial para *SAP2000* se cuenta con esta opción en la opción destacada en la figura 3-16.

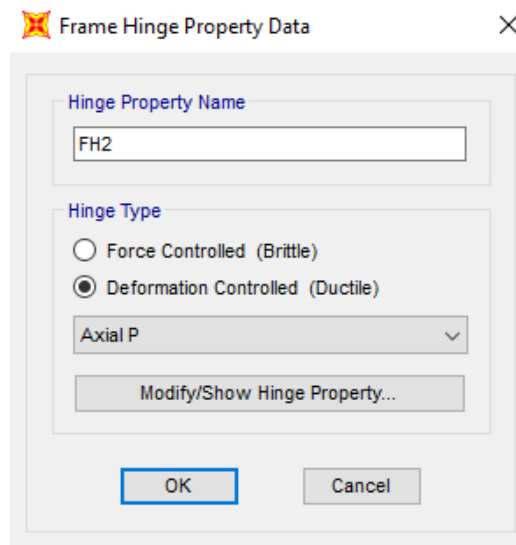


Figura 3-18 Opción para definición de rotulas plásticas trabajando a fuerza axial

Para plantear la simulación de esta forma se tenían dos dificultades:

- Definir la sección para el *Frame* en vista de que el BRB está conformado de varios elementos (núcleo de acero, camisa de confinamiento, relleno de mortero, etc).
- Definir las propiedades para las rotulas plásticas que modelen el comportamiento del BRB en el rango no lineal.

Para solventar la primera dificultad se consideraron varias opciones, siendo que la opción más acertada para lo requerido fue tomar solamente la sección del núcleo de acero. Mientras que para la definición de las propiedades de las rotulas plásticas en el rango inelástico, haciendo la analogía con las rotulas que trabajan a momento se necesita definir el punto de fluencia y el punto último del BRB.

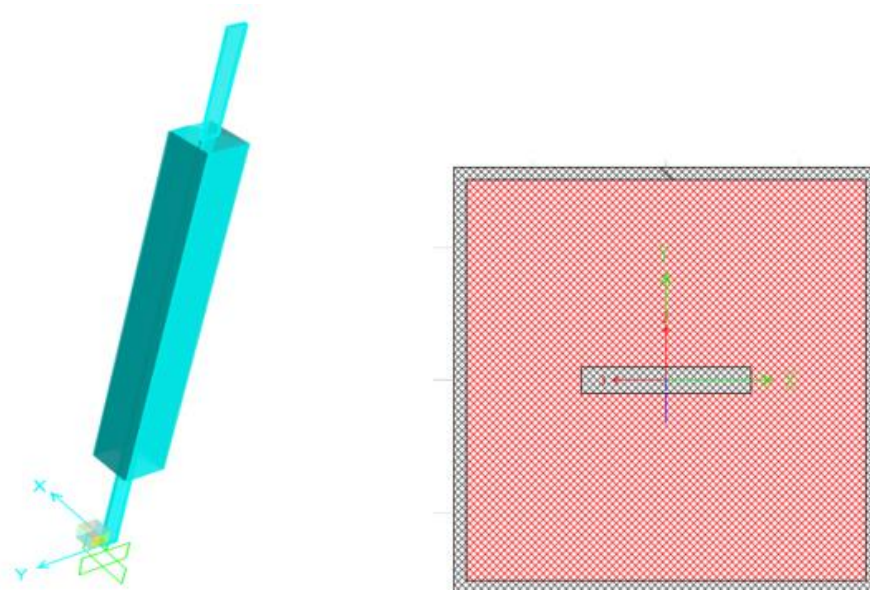


Figura 3-19 Opciones descartadas para modelación como elemento frame del BRB (Izquierda opción con sección no prismática y derecha opción con el sección designer)

El punto de fluencia corresponde al elemento más susceptible a entrar en este rango, es decir el núcleo de acero, y la fuerza corresponde al valor de la ecuación 2-19. Además, con las propiedades de longitud y área de este núcleo se determina la rigidez de la zona del núcleo, que en conjunción con el valor de fuerza de fluencia sirve para determinar el desplazamiento de fluencia. Estas propiedades se presentan en la tabla 3-1.

El punto último presentó más dificultades para definirse, ya que en las investigaciones de (Cancelado, 2012) los BRB a escala no se llevaron a estado de falla, y utilizando los valores asociados al valor de fuerza máxima presentados por (Velásquez, 2020) no se obtuvieron resultados satisfactorios. En consecuencia, se decidió simular la sección del BRB en el software *Xtract* trabajando a fuerza axial para determinar el punto último de falla del disipador.

No obstante, la riostra BRB tiene dos tipos de secciones según las zonas indicadas en la figura 2-10, la sección en las zonas elásticas que equivaldría solamente al área transversal del núcleo de acero, y la sección en la zona que plastifica, que corresponde al área del núcleo de acero, pero dentro de la camisa de confinamiento y el relleno de mortero. En consecuencia, se modelaron los dos tipos de secciones.

El punto último de fuerza para ambas secciones, la de la zona elástica y la de la zona que plastifica, es diferente. Entonces para determinar la fuerza última del sistema BRB se hizo una proporción referida a la longitud de cada una de las zonas, es decir que por ejemplo la zona elástica proporcionaba una parte de la fuerza de fluencia última proporcional a su longitud. En la siguiente ecuación se observa la distribución realizada para fuerza última.

$$F_u = \frac{F_{be-u}L_{be} + F_{bp-u}L_{bp}}{L_b} \quad (3.1)$$

Y para ser consecuente también se hizo la proporción para el desplazamiento último:

$$\Delta_u = \frac{\Delta_{be-u}L_{be} + \Delta_{bp-u}L_{bp}}{L_b} \quad (3.2)$$

Como ilustración de este proceso se presentan los resultados para la probeta 1 de los ensayos de (Cancelado, 2012).

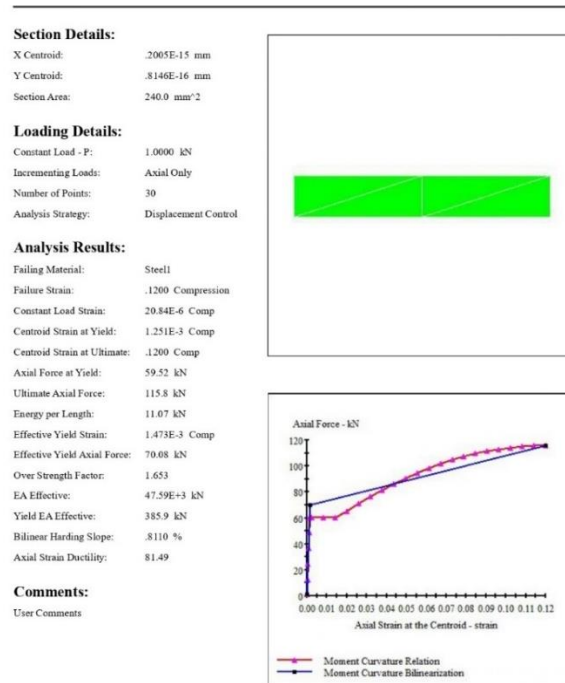


Figura 3-20 Modelamiento a fuerza axial de la sección para la zona elástica del BRB-1

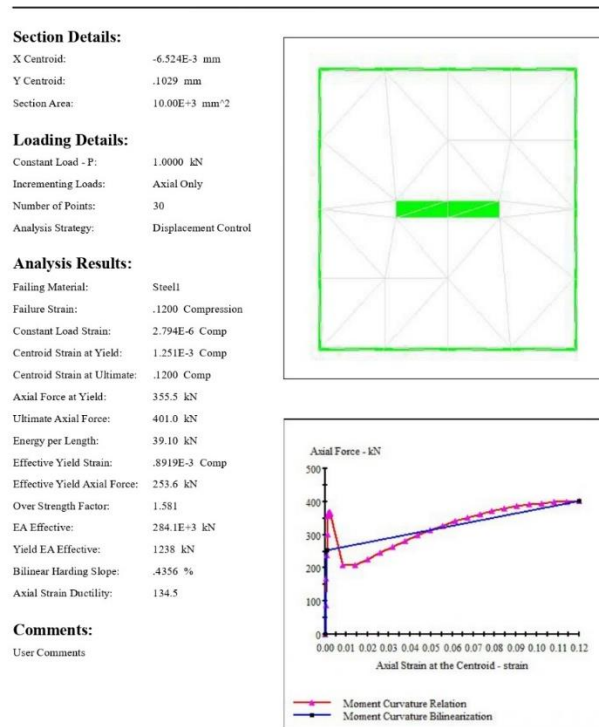


Figura 3-21 Modelamiento a fuerza axial de la sección para la zona plástica del BRB-1

Los resultados para la fuerza y desplazamiento último tanto de la zona elástica como la zona que plastifica se presentan en la tabla 3-2. Es necesario comentar que el valor de

desplazamiento último sí es el mismo para ambas zonas, esto porque en caso de fallar la zona elástica la zona central no podría continuar recibiendo carga.

Zona elástica	F_{be}	115.8	kN
	Δ_{be}	0.0257	m
Zona que plastifica	F_{bp}	401.0	kN
	Δ_{bp}	0.0257	m

Tabla 3-2 Valor del último para las zonas elástica y plástica del BRB-1

A partir de estos valores y tomando las longitudes para las zonas de la tabla 3-14 se aplican las ecuaciones 3.1 y 3.2 de la siguiente forma:

$$F_u = \frac{(115.8kN)0.313m + (401.0kN)1.075m}{0.313m + 1.075m} = 146.94kN$$

$$\Delta_u = \frac{(0.0257m)0.313m + (0.0257m)1.075m}{0.313m + 1.075m} = 0.0210m$$

Entonces para la definición de las rotulas plásticas a fuerza axial en el BRB-1 se tendrían los siguientes datos:

F_y	82.80	kN
Δ_y	0.0019	m
F_u	146.94	kN
Δ_u	0.0210	m

Tabla 3-3 Valor del punto de fluencia y punto último para el BRB-1

Para aplicar la formulación de la figura 3-6 en la definición de las rotulas plásticas además de los puntos anteriores se necesitan los parámetros fijos a , b y c . Estos parámetros están recomendados en las normativas (FEMA 356 y ASCE 41-13) según el tipo de material y el tipo de miembro estructural. Para el presente caso se tomaron los valores para riostras de acero trabajando a tensión de la tabla 5-7 del FEMA-356:

$$a = 11\Delta_T \quad (3.3)$$

$$b = 14\Delta_T \quad (3.4)$$

$$c = 0.8 \quad (3.5)$$

Estos valores son aproximados puesto que no hay parámetros específicos para riostras BRB. El parámetro Δ_T corresponde al desplazamiento de fluencia, con lo que para el modelo BRB-1 se tendría:

$$a = 11\Delta_T = 11 * 0.0019 = 0.020$$

$$b = 14\Delta_T = 14 * 0.0019 = 0.026$$

$$c = 0.8$$

De esta forma los valores que definen la rótula trabajando a fuerza axial para el BRB-1 serían los siguientes:

ND	F/Fy	Δ
E	0.2	-0.0470
D	0.2	-0.0310
C	-1.775	-0.0210
B	-1	0
A	0	0
B	1	0
C	1.775	0.0210
D	0.2	0.0310
E	0.2	0.0470

Tabla 3-4 Definición de rótula plástica para el modelo BRB-1

Los anteriores valores acotados al valor de desplazamiento de fluencia se ingresan en SAP2000 en la ventana de configuración de propiedades de rotulas:

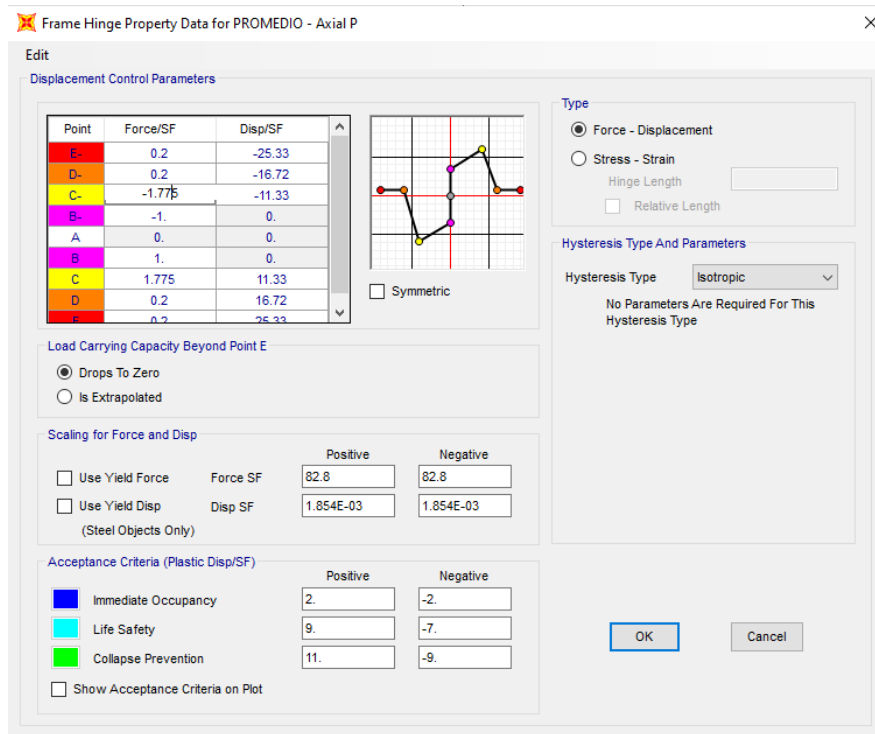


Figura 3-22 Propiedades para la rótula plástica del BRB-1 en SAP2000

Los criterios de aceptación también se extraen de la tabla 5-7 del FEMA-356. Al elemento con la sección del núcleo de acero en *SAP2000* se le asignaron dos rotulas a una distancia de $d/2$ de los extremos siendo d el lado o diámetro de la camisa de confinamiento, y a este elemento se le realizó el análisis *push over* de la misma forma definida anteriormente para el elemento *link*.

3.2.3 Comparación de funcionamiento de los modelos de dispositivos BRB

En las siguientes figuras se observan los resultados de aplicar la anterior técnica de modelación comparados frente a los resultados experimentales obtenidos por (Cancelado, 2012).

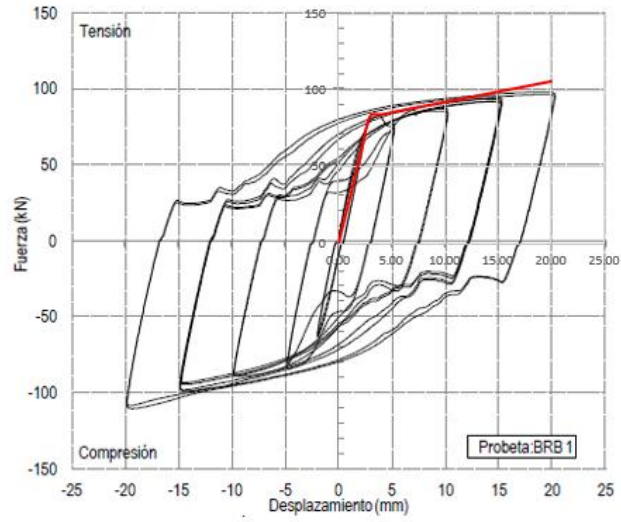


Figura 3-23 Calibración del modelamiento del disipador BRB-1

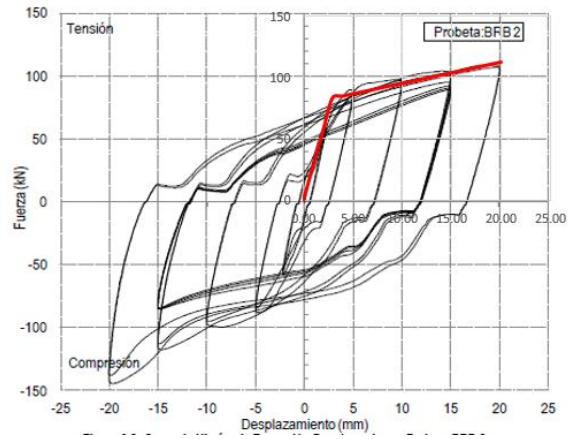


Figura 3-24 Calibración del modelamiento del disipador BRB-2

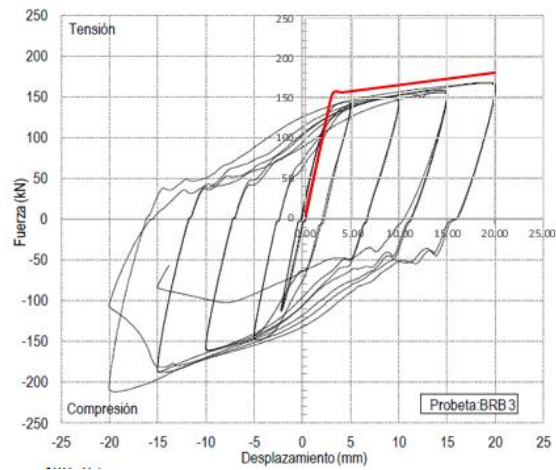


Figura 3-25 Calibración del modelamiento del disipador BRB-3

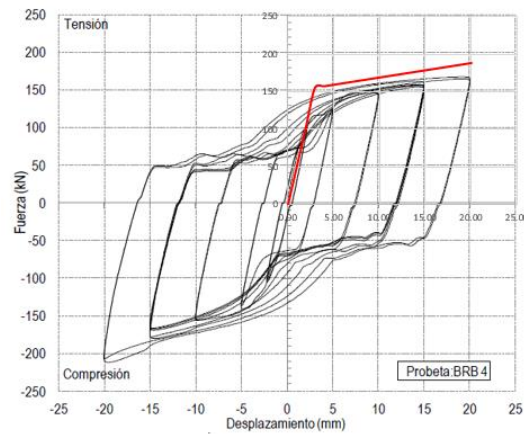


Figura 3-26 Calibración del modelamiento del dissipador BRB-4

Se observa que las curvas, salvo una pequeña diferencia en los modelos 3 y 4, se corresponden bien como envolvente de los resultados experimentales, y la modelación propuesta queda validada para su utilización en los análisis con dissipadores BRB. Como comparación adicional se presentan la curva obtenida por (Velásquez, 2020) usando el elemento tipo *link*, frente a la curva obtenida por la técnica propuesta para la probeta BRB-1.

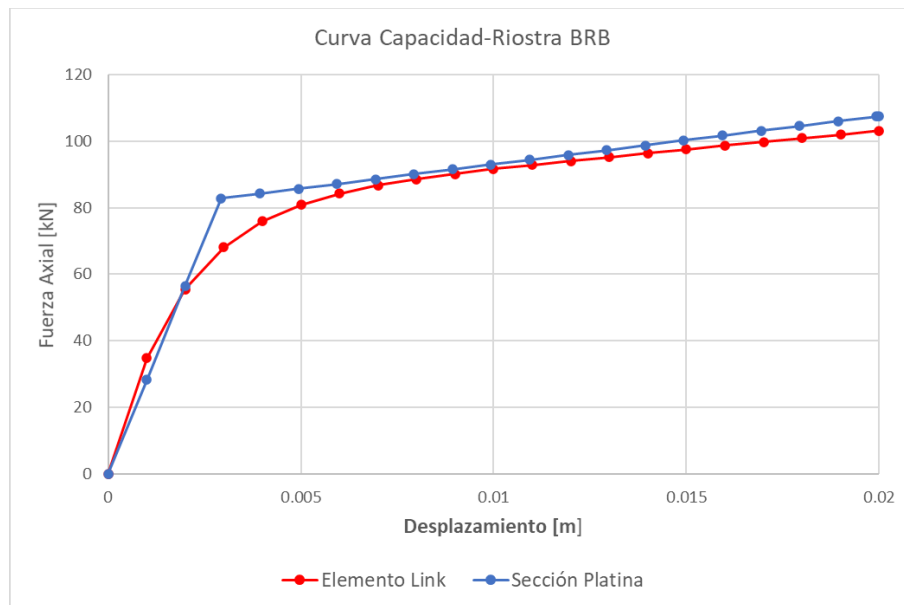


Figura 3-27 Comparación de modelaciones aplicadas para los dissipadores BRB en el modelo a escala 1

Se observa una diferencia en valores puntuales, así como en la forma curva de la transición entre el rango lineal y la entrada en fluencia del BRB, pero en términos generales la rigidez inicial en el rango lineal y la rigidez post fluencia están en un orden

de magnitud igual. No obstante, con la técnica propuesta se tiene la ventaja de obtener los estados de plastificación como los presentados a continuación para el BRB-1.

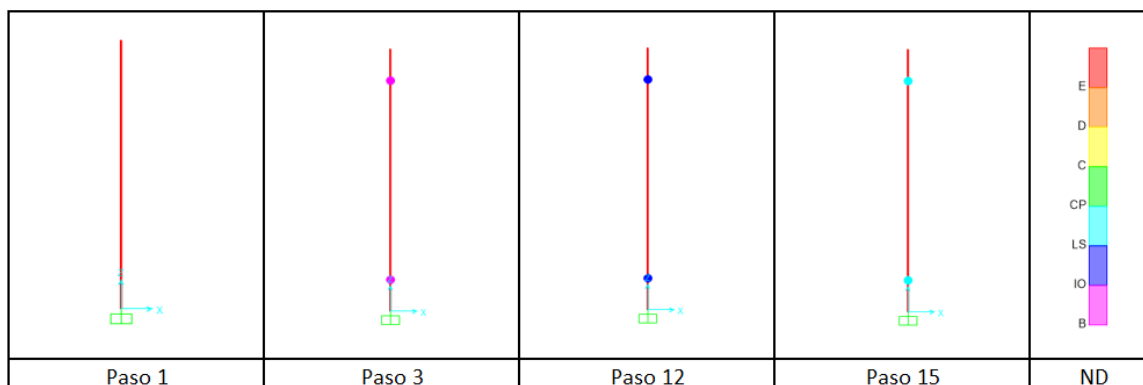


Figura 3-28 Estados de plastificación para el BRB-1

3.3 Estudio de localización de los Disipadores en estructuras tipo pórtico

En los trabajos de (Cano, 2020) y (Velásquez, 2020) usados como referencia para el diseño de las edificaciones con disipadores TADAS y BRB se realizaron estudios preliminares para evaluar la mejor ubicación de los dispositivos dentro de los pórticos de concreto en la geometría particular de la edificación que diseñaron. En estos estudios se analizó solamente un pórtico plano de 4 vanos considerando la implementación de uno o dos disipadores en distintas posiciones.

La conclusión a la que se llegó en ambos estudios es que, en cuanto a rigidez, periodo fundamental obtenido y capacidad, la posición de los disipadores no era influyente en los resultados obtenidos. Por tal motivo, la única recomendación que se señalaba es que los disipadores, en la medida de lo posible, no deberían colocarse en vanos seguidos por que eso aumenta la carga adicional que reciben las columnas que tengan dos disipadores en cada uno de sus lados.

Adicionalmente el estudio de los BRB también analizó la influencia de la disposición de los BRB dentro de un solo vano, siendo la disposición en forma de "V" invertida con dos BRB o un solo BRB instalado diagonalmente en el pórtico las dos opciones consideradas. En este aspecto (Velásquez, 2020) encontró un aumento de capacidad en los pórticos con la opción de "V" invertida, por lo tanto, esta configuración fue la utilizada en la presente investigación.

Considerando los resultados comentados para el presente caso solamente se analiza la influencia de la ubicación de los disipadores en el comportamiento de una edificación con planta irregular en forma de "L".

3.3.1 Localización de disipadores tipo TADAS

Para el estudio de influencia de la localización se utilizó una edificación de 4 niveles con la geometría irregular en planta propuesta para la presente investigación. El detalle de las secciones y refuerzo de los pórticos de concreto, y la geometría de los disipadores se presenta en el anexo 1. Se resalta aquí que la estructura principal de concreto es la misma para las tres opciones consideradas, al igual que la cantidad de disipadores (21 en dirección X y 21 en dirección Y). La diferencia es la disposición de los disipadores entre las siguientes opciones:

- Opción 1: Distribución uniforme y espaciada entre todos los vanos con acumulación en zonas esquineras por efectos de control de torsión, la cual se muestra en la figura 3-28.
- Opción 2: Distribución acumulada y sin espacios en los vanos centrales, la cual se muestra en la figura 3-29
- Opción 3: Distribución acumulada y sin espacios en los vanos extremos, la cual se muestra en la figura 3-30.

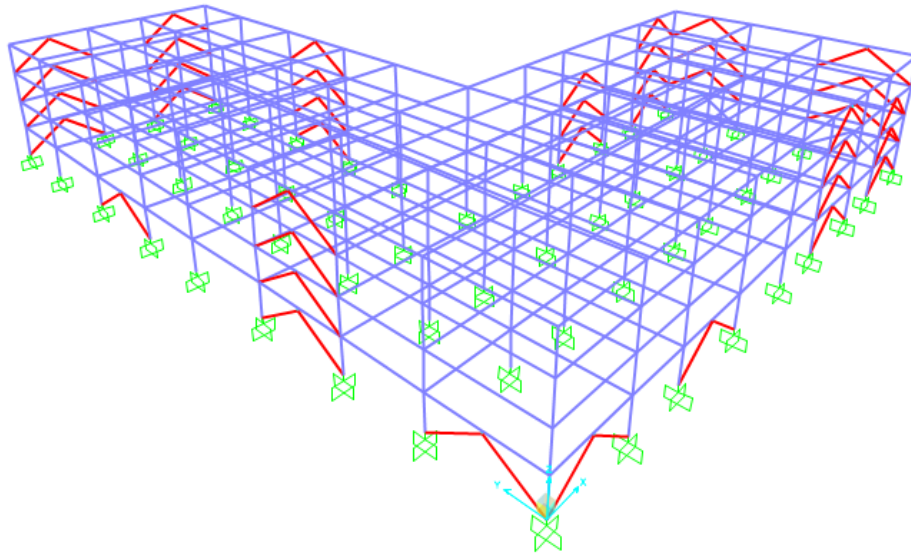


Figura 3-29 Ubicación de disipadores para la opción 1

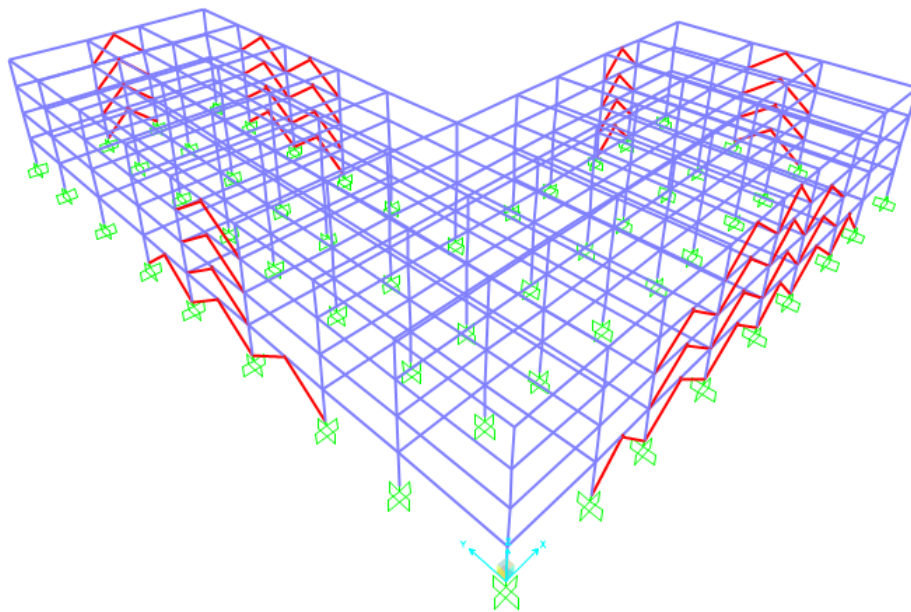


Figura 3-30 Ubicación de disipadores para la opción 2

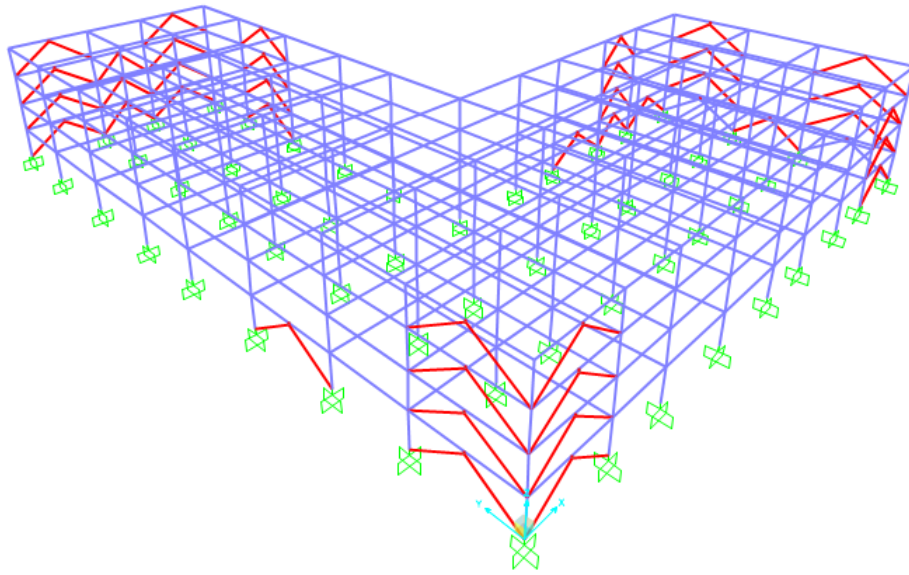


Figura 3-31 Ubicación de disipadores para la opción 3

Las tres opciones se analizaron para las dos direcciones principales. A continuación, se presentan los resultados de la curva de capacidad en dirección X para las tres opciones:

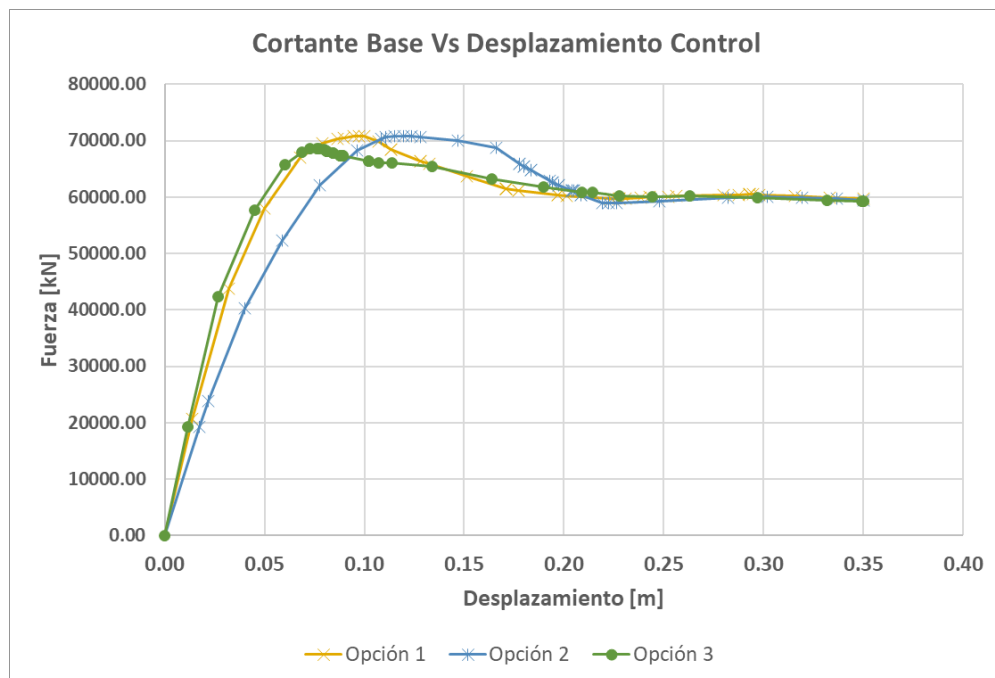


Figura 3-32 Comparación para la capacidad en dirección X de las tres opciones de ubicación consideradas para los disipadores TADAS

Se observa que en términos de capacidad última ninguna de las tres opciones presenta una ventaja sobre las otras. Se observa una pérdida de rigidez en el tramo lineal antes de la fluencia para la opción dos, pero entre las otras dos opciones no se observa una diferencia destacable.

Por tal motivo, se concluye que la ubicación de los disipadores no influye en la capacidad, y la opción de distribución elegida para los diseños definitivos es la opción 1, porque en esta es donde más se cumple el principio de no cargar con dos disipadores a las columnas de los pórticos.

3.3.2 Localización de disipadores tipo BRB

El estudio de localización con dispositivos BRB "V" invertida se hizo para la edificación con la misma configuración de la estructura de 4 niveles con disipadores TADAS, pero en este caso se distribuyeron los arriostramientos de pandeo restringido en forma de v invertida, siguiendo la misma tendencia de ubicación destacadas en las figuras 3-29 a 3-31. Los detalles de la geometría y características de los BRB utilizados para la edificación de 4 niveles se presentan en el anexo 1. Mientras que aquí se consideran directamente los resultados para la capacidad de las tres opciones.

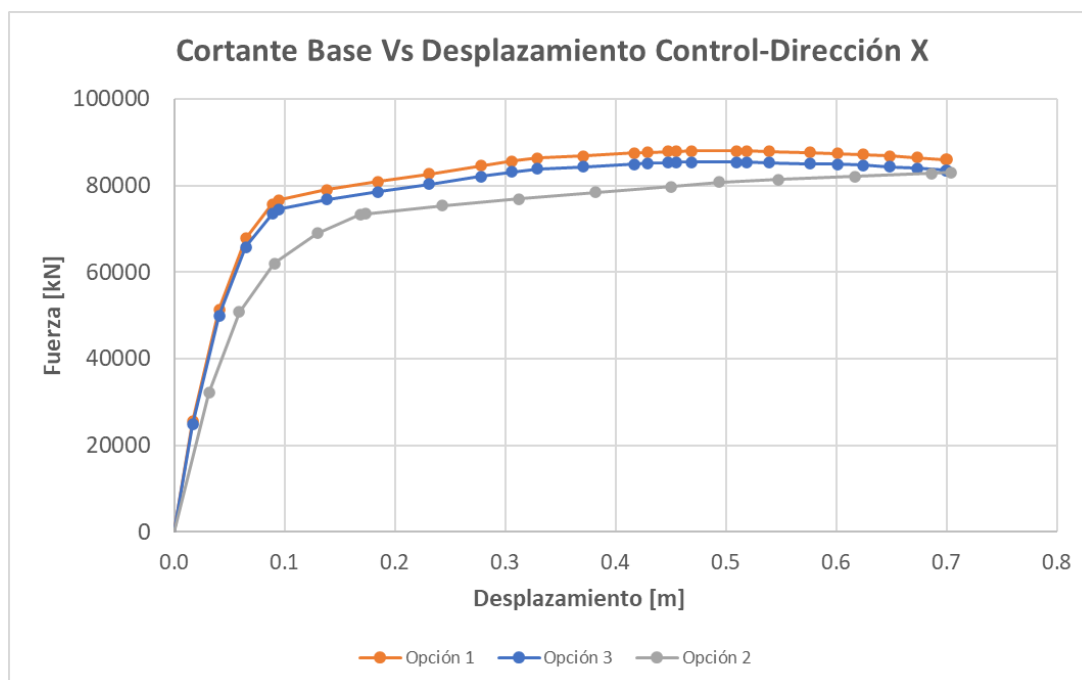


Figura 3-33 Comparación para la capacidad en dirección X de las tres opciones de ubicación consideradas para los disipadores BRB

En la figura 3-32 se muestra que la opción dos presenta una menor capacidad, pero el orden de magnitud de la diferencia no es tan grande, con lo que se llega a la misma conclusión de que la localización de los disipadores no influye en la capacidad de la edificación, y se escoge de nuevos para los diseños definitivos la configuración número 1.

Capítulo IV

4 Metodología para el diseño de edificaciones con disipadores tipo TADAS, con disipadores tipo BRB y con sistema de pórticos, y para la evaluación del desempeño ante eventos sísmicos extremos

En el siguiente capítulo se presenta la metodología desarrollada para realizar la evaluación del desempeño de las edificaciones irregulares en planta objeto de estudio ante los escenarios sísmicos, y para el diseño de las tres edificaciones:

- Diseño de edificación en concreto reforzado con disipadores histeréticos tipo TADAS.
- Diseño de edificación en concreto reforzado con disipadores de arriostamiento restringido al pandeo (BRB).
- Diseño de edificación en concreto reforzado (Sistema de resistencia sísmica solamente con pórticos)

No debe confundirse la tercera edificación diseñada con sistema de resistencia sísmica solamente basado en pórticos, con la estructura principal de las edificaciones con disipadores. La primera es una edificación convencional diseñada para el 100% de las fuerzas sísmicas, mientras que la segunda corresponde al uno de los dos sistemas que conforman una edificación con disipadores, y se diseña para el 75% de las fuerzas sísmicas. En este documento siempre se realiza referencia a la primera como la edificación con sistema de pórtico en concreto reforzado y la segunda como estructura principal o prediseño de las edificaciones con disipadores.

La metodología propuesta puede dividirse entonces en dos grandes etapas: Análisis y diseño de las edificaciones y evaluación del desempeño de estas ante los eventos sísmicos extremos.

Para la primera etapa, en el diseño de la edificación en concreto reforzado se siguió la metodología dispuesta en la NSR- 10, mientras que para el diseño de la edificación con disipadores TADAS se siguió la metodología propuesta por (Cano, 2020), y para la edificación con disipadores BRB se siguió la metodología propuesta por (Velázquez, 2020). Ambas investigaciones se basan en el enfoque de deriva constante desarrollado por (Oviedo et al, 2010) para el diseño de edificaciones con disipadores.

En la segunda etapa se realizaron una serie de simulaciones de movimiento fuerte bajo las condiciones de sitio particulares para cinco eventos sísmicos asociados a las fuentes generadoras más cercanas a la ciudad escogida para el diseño. Con estas simulaciones se realiza un proceso para determinar una señal sísmica característica para cada evento-fuente, y con las señales se procede a realizar por cada diseño una serie de análisis no lineales dinámicos cronológicos, los cuales son el insumo principal para la evaluación del desempeño de las estructuras ante los eventos sísmicos. En la evaluación de desempeño se realiza la comparación de los análisis cronológicos frente a los resultados de capacidad de diseño dados por los análisis *push over*.

En la siguiente figura se observa un diagrama de flujo que describe la metodología general para la presente investigación, luego se describirán con mayor detalle las etapas que conforman dicha metodología.

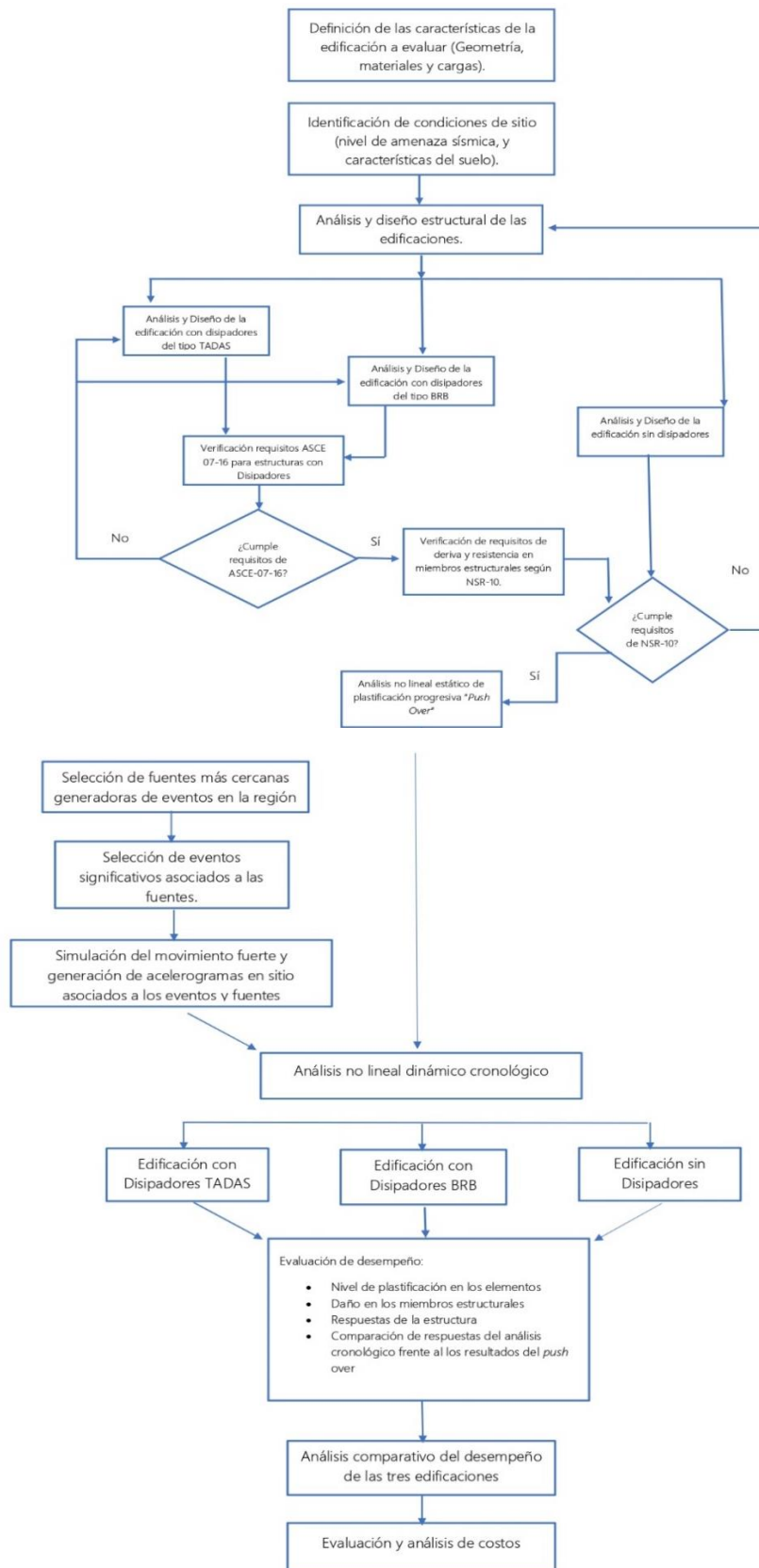


Figura 4-1 Diagrama de flujo metodología general propuesta

4.1 Análisis y diseño estructural de las edificaciones

El análisis y diseño estructuras de las edificaciones con disipadores del tipo TADAS y equipadas con arrostramientos BRB es similar, ya que se basan en las disposiciones generales del ASCE 7-16 (capítulo 18) para este tipo de estructuras, y se diferencian solamente en la forma de definir el sistema de disipación particular. Por tal motivo en primer lugar se describen los pasos y aspectos fundamentales generales para el diseño de estructuras con disipadores, y asimismo se presentan los pasos a seguir para definir el sistema de disipación tanto para los arriostramientos BRB como para los dispositivos TADAS. Por último, como ya se mencionó, el diseño de la edificación en concreto con sistema de pórticos se realiza siguiendo la NSR-10 (título A y título C).

4.1.1 Metodología de diseño para edificaciones con disipadores (ASCE-7-16)

El ASCE 7-16 *Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures* en el capítulo 18 establece los criterios de diseño mencionados para las estructuras con disipadores. Básicamente el análisis de este tipo de estructuras parte de un prediseño de la estructura principal, del cual a través de un análisis no lineal estático (*push over*) se determinan los parámetros necesarios para definir las características del sistema de disipación. Una vez hecho el diseño del sistema de disipación, a la estructura con disipadores se le realiza igualmente un análisis *push over* para verificar los requerimientos exigidos en materia de ductilidad, derivas y cortantes, e igualmente comprobar los requisitos particulares para el sistema de disipación. Los pasos que siguen este proceso se presentan en el siguiente diagrama de flujo.

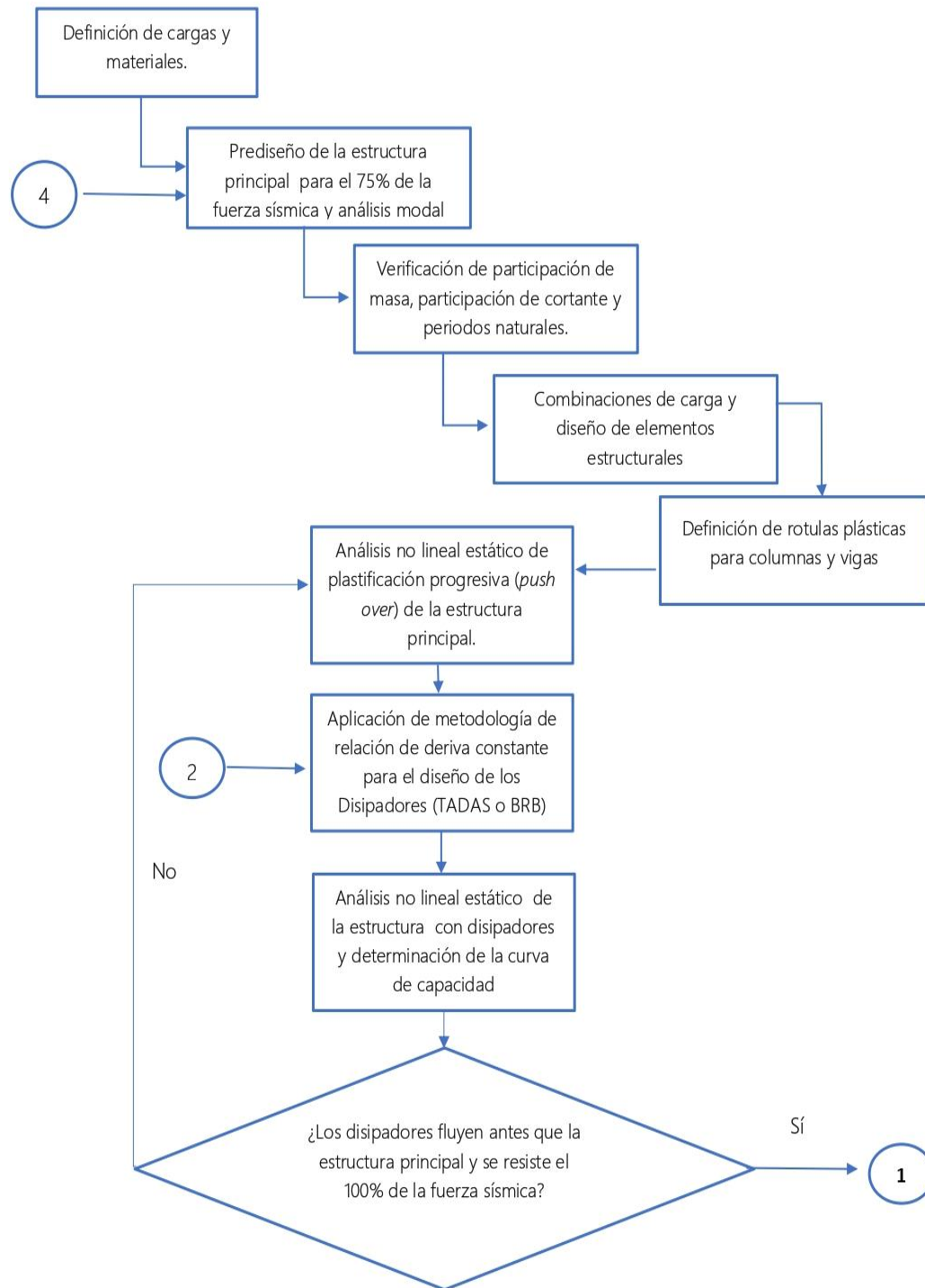


Figura 4-2 Diagrama de flujo metodología de diseño para edificaciones con disipadores

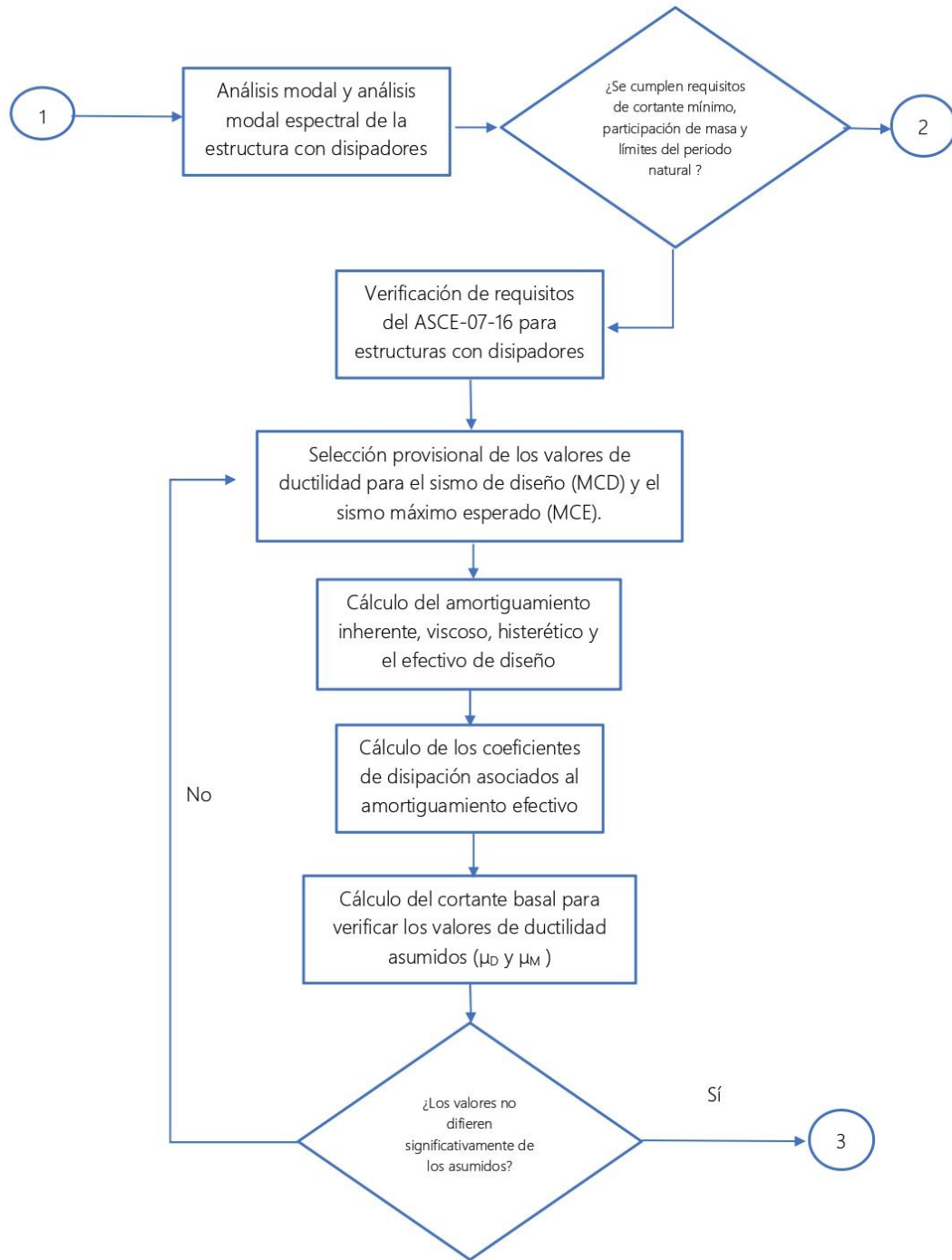


Figura 4.2 Diagrama de flujo metodología de diseño para edificaciones con disipadores (Continuación)

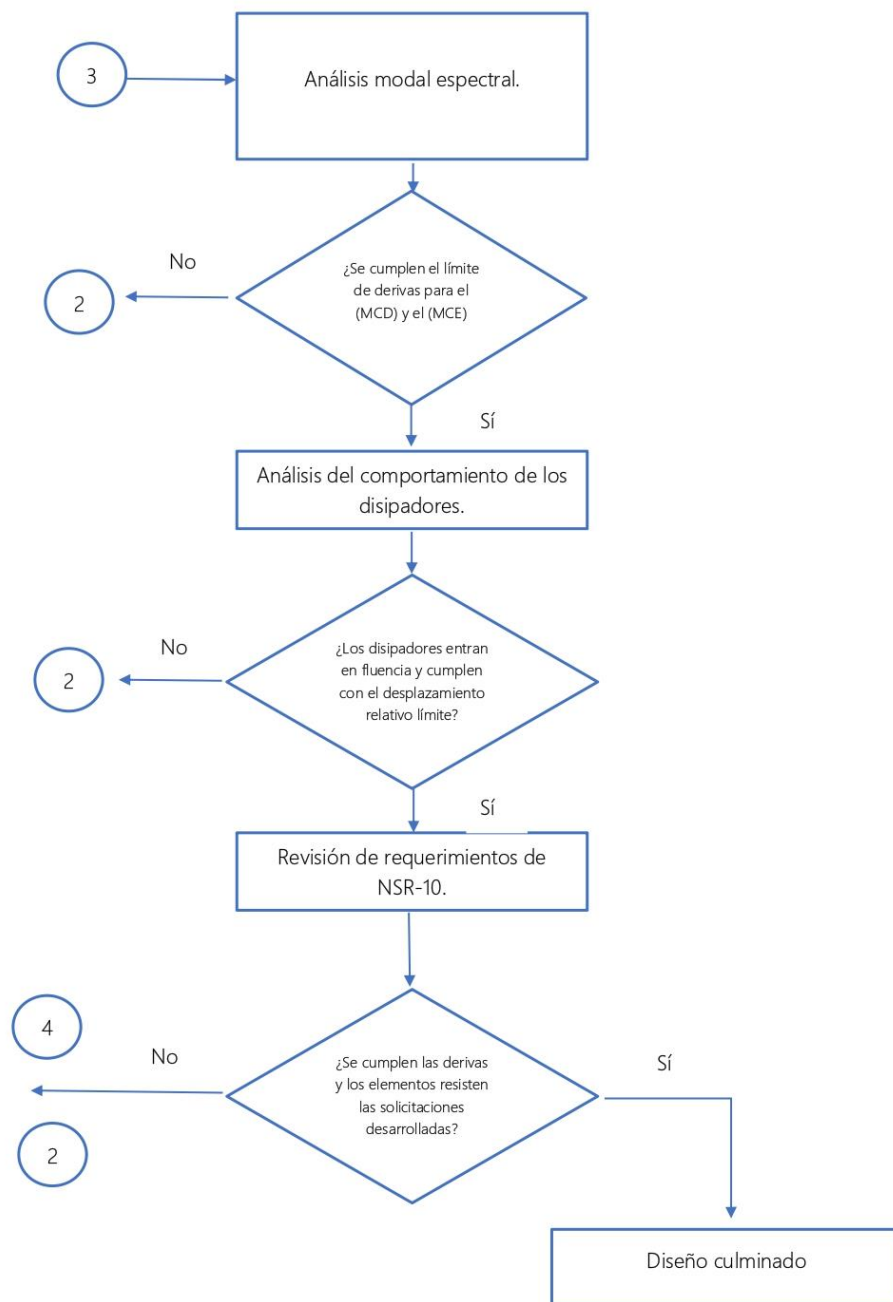


Figura 4.2 Diagrama de flujo metodología de diseño para edificaciones con disipadores (Continuación)

4.1.1.1 Definición de cargas y materiales (Características de diseño)

La selección de materiales se realiza de acuerdo con las características de la estructura por diseñar. Esta investigación se enfoca en edificaciones de concreto reforzado y en los sistemas de disipación de acero estructural, con lo que los valores por seleccionar corresponden a las resistencias de estos materiales.

En cuanto a la carga viva y muerta se estiman de acuerdo con el reglamento NSR-10 en su título B, en donde se sugieren valores en relación con el uso de la estructura y los acabados. La definición de la carga sísmica se realiza a partir del título A de la NSR-10 (A-2), mediante un espectro de diseño (A.2.6) a partir de los siguientes parámetros:

- Parámetros de amenaza sísmica (A_v y A_a): Corresponden a la velocidad y aceleración pico efectiva del sismo de diseño en roca del lugar según el mapa de zonificación sísmica de la NSR-10.
- Parámetros de sitio (F_v y F_a): Corresponden a los factores de amplificación de respuesta a nivel de superficie por las características del suelo.
- Coeficiente de importancia (I): Se define a partir del grupo de uso de la edificación.

4.1.1.2 Prediseño de la estructura principal

El prediseño consiste en definir las características de la estructura principal sin incluir el sistema de disipación considerando las cargas verticales y teniendo en cuenta que la carga sísmica se puede reducir al 75%, siempre y cuando se cumplan las condiciones del ASCE 7-16 (18.2.1.1):

- En cada dirección de análisis tiene al menos dos disipadores por cada piso.
- La estructura no presenta irregularidad torsional extrema 1-b en dirección horizontal (tabla 12.3-1 del ASCE 7-16), o un piso flexible por irregularidad extrema de rigidez 1-b en vertical (tabla 12.3-2 del ASCE 7-16).

Las irregularidades mencionadas corresponden las descritas en la NSR-10 como 1bP (irregularidad torsional extrema en planta), y 1bA (irregularidad extrema de rigidez en altura), que se definen en las tablas A.3-6 y A.3-7 respectivamente. La irregularidad

torsional depende de las derivas que en un inicio se desconocen, con lo que para el prediseño se asume que la estructura no presenta este tipo de irregularidad, y posteriormente se verifica esta condición.

Para definir las secciones de los elementos estructurales del prediseño se parte de los valores mínimos exigidos para las secciones de concreto en vigas de acuerdo con el título C de la NSR-10 (C.9.5(a) o CR.9.5), o para columnas según la capacidad de disipación de energía. En esta etapa del prediseño el ASCE 7-16 no establece un requerimiento de valores máximos para derivas, pero para no generar una estructura principal inestable se consideró el limitante en el valor del periodo natural T establecido en la NSR-10:

$$T \leq C_u T_a \quad (4.1)$$

En donde C_u es un coeficiente desarrollado para determinar al máximo periodo admisible (ecuación A.4.2-2 NSR-10) y T_a es el periodo aproximado (ecuación A.4.2-3 NRS-10). Como el periodo natural de la estructura se reducirá con la implementación del sistema de disipación, esta verificación se realiza posteriormente, pero en la etapa de prediseño no se debe estar muy alejado de cumplir esta condición.

4.1.1.3 Análisis estructural y verificaciones del prediseño

En el ASCE 7-16 (sección 18.2.3.) se establecen tres métodos de análisis del sistema de resistencia sísmica a utilizar en el caso de estructuras con disipadores, siendo el análisis dinámico no lineal cronológico la opción recomendada. Sin embargo, siempre y cuando se cumplan determinadas condiciones, se permite el uso del análisis modal espectral o del análisis de fuerza horizontal equivalente, como se indica a continuación.

- Análisis de fuerza horizontal equivalente (ASCE -7-16 sección 18.2.3.2):
 1. Contar con un mínimo de dos disipadores por dirección y en piso para efectos de control de torsión.
 2. El amortiguamiento efectivo total para el modo fundamental de la estructura (β_{HM1}) en cada dirección de análisis no debe ser mayor al 35% del crítico.
 3. La estructura principal no debe presentar irregularidades torsionales o de rigidez, normal o extrema, en cualquier dirección (equivalentes a 1aP, 1bP, 1aA y 1bA de la NSR-10).

4. Los sistemas de entrepisos se consideran como diafragmas rígidos.
5. La altura de la edificación no debe exceder los 30 m.
6. El valor S_{D1} correspondiente a la aceleración espectral del sismo de diseño para un periodo natural de $T=1$ s debe ser menor a 0.6.

○ **Análisis modal espectral (ASCE -7-16 sección 18.2.3.1):**

1. Contar con un mínimo de dos disipadores por dirección y en cada piso para efectos de control de torsión.
2. El amortiguamiento efectivo total para el modo fundamental de la estructura (β_{HM1}) en cada dirección de análisis no debe ser mayor al 35% del crítico.
3. El valor $SD1$ correspondiente a la aceleración espectral del sismo de diseño para un periodo natural de $T=1$ s debe ser menor a 0.6.

Para el presente caso, como se observa más adelante, la estructura cumple con los requisitos para la aplicación del análisis modal espectral, con lo cual el prediseño debe satisfacer las condiciones de este tipo análisis en cuanto a participación de masa y los requisitos para el cortante dinámico. En cuanto a la participación de masa en el apartado A.5.4.2 de la NSR-10 se indica que se deben utilizar en la determinación de las respuestas de la estructura los modos necesarios para alcanzar al menos un 90% de la participación de masa.

Mientras que para el cortante dinámico en la base se establece en A.5.4.5 que para estructuras regulares que el valor obtenido no debe ser menor al 80% del cortante en el base del método de la fuerza horizontal equivalente, mientras que para estructuras irregulares no debe ser menor al 90%, esto para ambas direcciones principales. En caso de no cumplir este requisito del cortante las respuestas dinámicas obtenidas por el análisis modal espectral se deberán multiplicar por un factor de corrección:

$$F_c = 0.8 \frac{V_{s(FHE)}}{V_s} \text{ (Estructuras regulares)}$$

$$F_c = 0.9 \frac{V_{s(FHE)}}{V_s} \text{ (Estructuras irregulares)}$$
(4.2)

También se debe verificar en la etapa de prediseño la necesidad de considerar efectos de segundo orden *p-delta* mediante el índice de estabilidad. El índice de estabilidad se define en la sección A.6.2.3 de la NSR-10 de la siguiente forma:

$$Q_i = \frac{P_i * \Delta cm_i}{V_i * hp_i} \quad (4.3)$$

En donde para un piso *i* :

P_i : Sumatoria de la carga vertical total del piso *i* y los pisos localizados por encima.

Δcm_i : Deriva del piso *i* en el centro de masa.

V_i : Fuerza cortante del piso *i*, corresponde a la suma de las fuerzas horizontales sísmicas que se aplican en el nivel *i* y los niveles localizados encima del piso *i*.

hp_i : Altura de piso *i*.

El análisis de efectos *p-delta* debe realizarse si el índice de estabilidad es mayor a 0.1, y la estructura debe rigidizarse en caso de que este índice sea mayor a 0.3.

4.1.1.4 Combinaciones de carga y diseño estructural de los elementos

Las fuerzas sísmicas reducidas de diseño (*E*), considerando solamente el 75% del cortante basal para la presente etapa, se determinan como se indica en la NSR-10 con ayuda de la siguiente expresión:

$$E = \frac{Fs}{R} \quad (4.4)$$

En donde el coeficiente de capacidad de disipación de energía se determina con:

$$R = \phi_a \phi_p \phi_r R_o \quad (4.5)$$

R_o : Coeficiente de capacidad de disipación de energía básico determinado con las tablas de la sección A-3 (NSR-10) según el sistema y grado de disipación de energía del material estructural.

ϕ_a : Coeficiente de reducción por irregularidad en altura determinado en la tabla A.3-7 (NSR-10)

ϕ_p : Coeficiente de reducción por irregularidad en planta determinado en la tabla A.3-6 (NSR-10)

ϕ_r : Coeficiente de reducción por ausencia de redundancia determinando según A.3.3.8

Con las fuerzas sísmicas y utilizando las combinaciones de carga definidas en el título B de la NSR-10 (B.2.4.2) para el método de la resistencia se determinan las solicitaciones de diseño para los elementos estructurales. El diseño estructural de los elementos se realiza de acuerdo con el título C de la NSR-10 dedicado al concreto reforzado.

de las vigas para momento y cortante se realiza considerando las ecuaciones del método de la resistencia, además de los requerimientos sísmicos estipulados en el título C de la NSR-10 para estos elementos de concreto reforzado:

Adicional a las consideraciones anteriores para los elementos de los pórticos donde se colocará el sistema de disipación se espera un incremento en las solicitudes por la presencia de dichos elementos. Con lo cual para las vigas y columnas de estos pórticos se debe disponer una cuantía de refuerzo mayor. Para el presente caso, se dispuso que las vigas de los pórticos donde se ubicarán los dispositivos TADAS o BRB se diseñen para el 100% de las fuerzas sísmicas, y en las columnas se aumenta la cuantía también proporcionalmente.

4.1.1.5 Definición de rotulas plásticas para columnas y vigas

Para cada sección tipo de vigas y columnas se establece su comportamiento mediante la definición de su respectiva rotula plástica. De acuerdo con las propiedades geométricas, materiales y configuración del refuerzo de cada sección se hace una simulación numérica en el rango no lineal para determinar el diagrama momento curvatura. Para el presente caso, realizada con el software *Xtract*, ingresando las propiedades geométricas, materiales y configuración de refuerzo de la sección, y obteniendo como resultado el diagrama momento curvatura. Con el diagrama se obtiene una representación normalizada siguiendo los lineamientos del ASCE 41-13 (capítulo 10 para elementos de concreto reforzado):

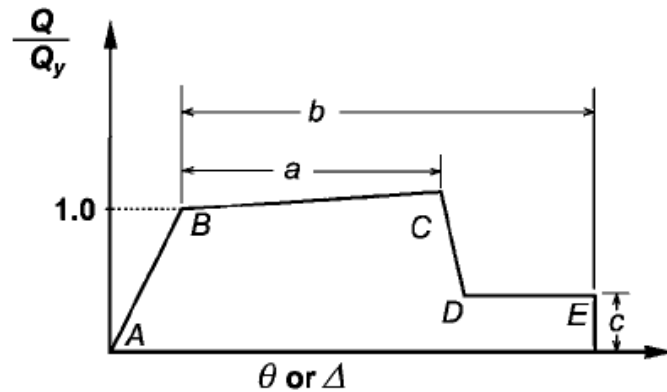


Figura 4-3 Modelo bilineal normalizada para el diagrama momento curvatura (tomado del ASCE-41-13)

Los parámetros del anterior modelo se obtienen de las tablas del ASCE-41-13 (10-7 para vigas, y 10-8 para columnas), en función de la cuantía de refuerzo longitudinal y transversal. El comportamiento de una sección de viga queda representado con los diagramas a momento positivo y negativo, mientras que en columnas para considerar el trabajo de la sección a flexo-compresión, es necesario desarrollar al menos cuatro diagramas (0°, 45°, 90° y 270°) para dos casos de carga axial (máxima y mínima).

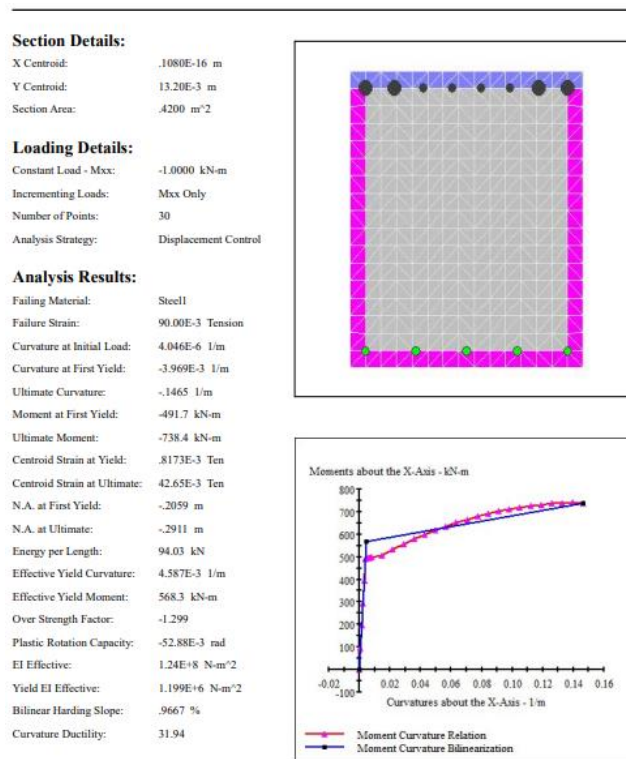


Figura 4-4 Ejemplo de reporte de software Xtract. Se observa el diagrama momento curvatura de la sección

Los diagramas representados en un modelo normalizado se ingresan en el software de análisis estructural por cada tipo de rotula para considerar el comportamiento no lineal de la estructura. Para el presente caso se utiliza el software *SAP2000*, del cual a continuación se muestran las ventanas donde se ingresan los datos de rotulas plásticas para vigas y columnas:

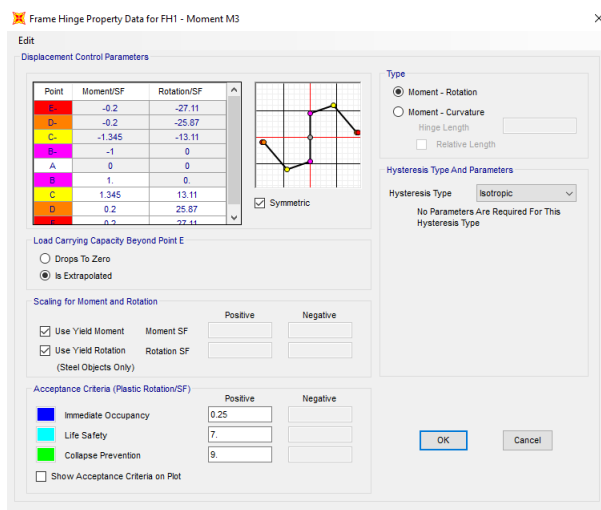


Figura 4-5 Ventana de ingreso de propiedades de rotula plástica para vigas en SAP2000

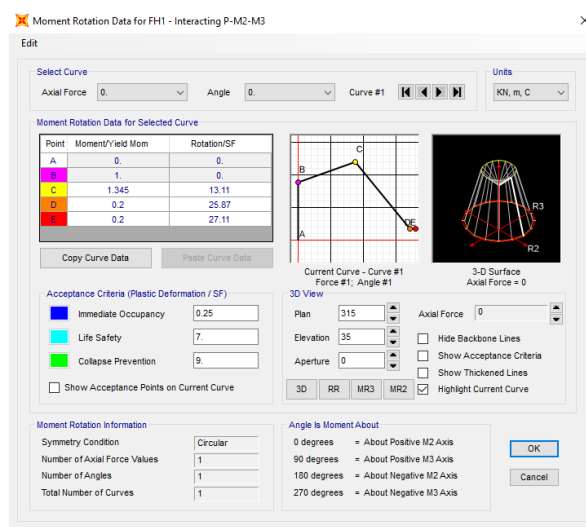


Figura 4-6 Ventana de ingreso de propiedades de rotula plástica para columnas en SAP2000

Como puede apreciarse en el ambiente de *SAP2000* para la definición de las características de las rotulas plásticas de las secciones, también deben ingresarse los valores para los criterios en los tres niveles de desempeño (Ocupación inmediata, seguridad de vida y prevención de colapso). Estos valores se encuentran en las tablas 10-7 y 10-8 del ASCE-41-13 para elementos de concreto reforzado.

4.1.1.6 Análisis no lineal estático de plastificación progresiva (*push over*)

El análisis no lineal estático de plastificación progresiva *push over* se realiza con un patrón de carga horizontal definido a partir del modo fundamental de la estructura en cada una de las dos direcciones principales, utilizando la formulación del método de la fuerza horizontal equivalente (NSR-10-A.4). Este patrón de carga se aplica incrementalmente a la estructura en sus centros de masa, hasta alcanzar el desplazamiento de control en un nodo del piso superior, o hasta que la estructura falle.

Las rotulas se asignan en cada uno de los extremos de vigas y columnas, a una distancia igual a $h/2$ donde h es la altura de la sección del elemento. Luego se define un caso de carga del tipo estático no lineal con el patrón de carga horizontal, el cual debe partir de una condición inicial, el cual consiste en un 100% de la carga muerta y un 25% de la carga viva. Después se selecciona el nudo de techo al que se le asigna el desplazamiento de control, asimismo si el edificio es de mediana o gran altura es recomendable incluir en el análisis efectos *p-delta*.

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Set Def Name Modify/Show...

Initial Conditions:
☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☒ Continue from State at End of Nonlinear Case ESTADO INICIAL

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:
All Modal Loads Applied Use Modes from Case MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	FX	1.
Load Pattern	FX	1.

Add Modify Delete

Other Parameters:
Load Application: Displ Control Modify/Show...
Results Saved: Multiple States Modify/Show...
Nonlinear Parameters: User Defined Modify/Show...

Load Case Type: Static Design...
Analysis Type: ☐ Linear ☒ Nonlinear ☐ Nonlinear Staged Construction
Geometric Nonlinearity Parameters: ☐ None ☒ P-Delta ☐ P-Delta plus Large Displacements
Mass Source: Previous

OK Cancel

Load Case Name: Set Def Name Modify/Show...

Initial Conditions:
☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☐ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:
All Modal Loads Applied Use Modes from Case MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	D(SI2)	1.
Load Pattern	D(SI2)	1.
Load Pattern	DEAD	1.
Load Pattern	Live	0.25

Add Modify Delete

Figura 4-7 Ventana de configuración de análisis no lineal estático en SAP2000

El resultado de este análisis brinda la respuesta de la edificación en cada paso o incremento de carga, así como el correspondiente estado de plastificación de los elementos estructurales, de acuerdo con la convención para los diferentes niveles de desempeño. También se obtiene la curva de capacidad de la estructura, la cual relaciona el cortante en la base de cada paso con el desplazamiento en el nudo de control.

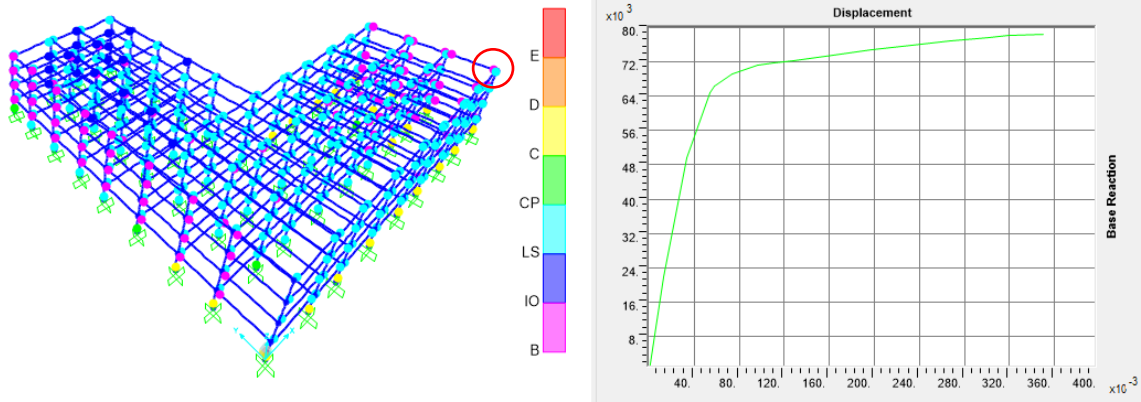


Figura 4-8 Ejemplo de resultados de análisis no lineal estático (push over). A la izquierda estado de plastificación y la derecha curva de capacidad. Resaltado en rojo nudo de control

4.1.1.7 Definición de relaciones de cortante y derivas de piso

El enfoque de deriva de piso constante utilizado por (Oviedo A. et al., 2010) parte de encontrar los cortantes y derivas de piso en cada uno de los niveles de la edificación. El cortante de piso en cada nivel se obtiene al sumar el cortante en cada una de las columnas de la estructura, mientras que las derivas son los desplazamiento relativos entre los pisos. Los desplazamientos se miden en los nudos de la esquinas donde se ubicó en nudo de control del último nivel. De este análisis se obtiene una curva de capacidad por cada nivel de la edificación.

Las curvas de cortante versus deriva de piso se representan mediante un modelo bilineal, en donde la primera recta representa el comportamiento elástico antes de la plastificación, y la segunda línea, con una pendiente inferior, representa el comportamiento inelástico tras la fluencia de los elementos de la estructura. Para encontrar los parámetros del modelo bilineal se iguala el área de la curva original con el área de los dos triángulos y el rectángulo que conforman el modelo en función del cortante o deriva de fluencia, y se varían estos parámetros hasta que coincida con el área de la curva original.

Teniendo el modelo bilineal se determinan los siguientes parámetros necesarios para el enfoque de (Oviedo A. et al., 2010) en la definición del sistema de disipación de la estructura:

- V_u y Δ_u : Corresponden al cortante y deriva de piso del último paso del análisis *push over*.

- V_f y Δ_f : Corresponden al cortante y deriva de piso de fluencia. También es el punto de cambio de pendiente del modelo bilineal.

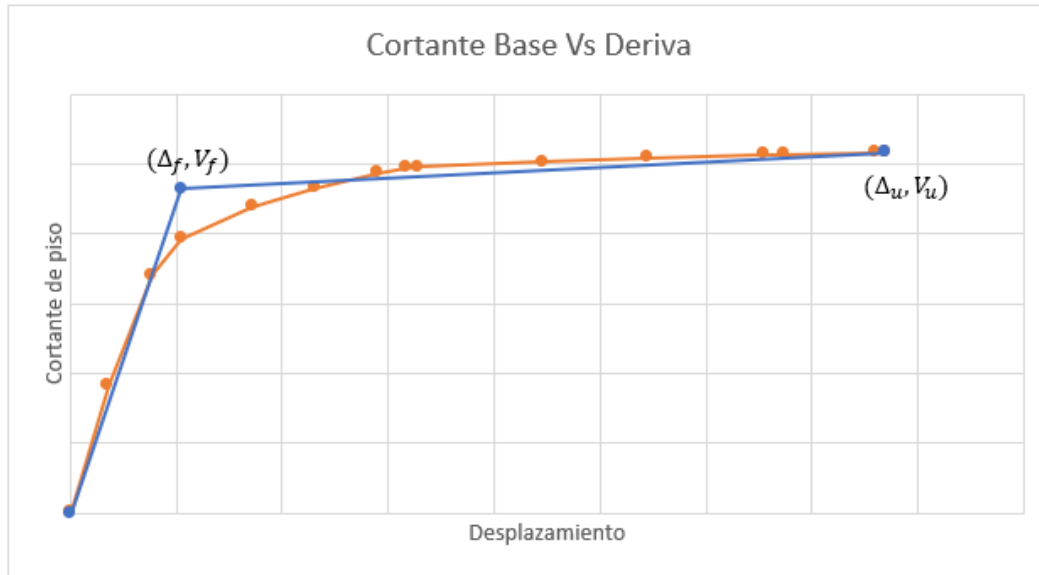


Figura 4-9 Relación entre cortante y deriva de piso, y aproximación bilineal.

4.1.1.8 Definición del sistema de disipación

Con los parámetros de la sección anterior, y siguiendo la metodología de los capítulos 4.1.2 y 4.1.3, se definen la cantidad y propiedades necesarias de los disipadores TADAS y BRB respectivamente.

4.1.1.9 Análisis estructural de la edificación con disipadores

Teniendo la estructura con los disipadores es necesario realizar varios tipos de análisis estructural para verificar que el diseño realizado cumpla con todos los requisitos normativos. A continuación, se enlistan, en su respectivo orden, los análisis por realizar.

- Análisis modal
- Análisis no lineal estático *push over*.
- Análisis modal espectral.

Con el análisis modal se verifica que el periodo natural cumpla el límite de la normativa indicado en la ecuación 4.1. Si se encuentra que el periodo natural no cumple con

el límite de $C_u T_a$ se debe rigidizar la estructura, ya sea aumentando el número o las características de rigidez de los disipadores, o aumentando las secciones de la de la estructura principal. En esta etapa se verifica de nuevo la participación de masa (A.5.4.2 de la NSR-10).

El análisis no lineal estático *push over* a la estructura con disipadores se realiza para verificar el estado de plastificación y la capacidad de la estructura. Si con la colocación de los disipadores no se aumenta la capacidad de la estructura es necesario verificar las características y número de estos elementos. Igualmente es importante verificar el estado de plastificación durante los pasos de análisis *push over*.

Como se ha mencionado, los sistemas de disipación tienen la función de concentrar los daños, y proteger a la estructura principal, por lo que por ejemplo, un estado de plastificación que indique presencia rápida de rotulas en las columnas antes de que aparezcan en los dispositivos TADAS o BRB, indica una deficiencia en el diseño. Si se presenta la anterior situación hay que verificar si el refuerzo de las columnas no es el adecuado, o por si el contrario los disipadores están sobredimensionados generando que no entren en fluencia primero que la estructura principal.

Del análisis modal espectral a la estructura con disipadores se deben verificar las mismas condiciones anteriormente mencionadas en el prediseño, es decir el cortante dinámico mínimo, irregularidades en planta y alzado e índice de estabilidad.

4.1.1.10 Verificaciones del diseño par estructuras con disipadores según el ASCE-7-16

La verificación del diseño siguiendo los requisitos del ASCE-7-16 no varía significativamente en cuando al análisis modal espectral convencional. La principal diferencia se encuentra en que la verificación se realiza no solo para el sismo de diseño⁴ convencional (MCD), sino también para el sismo máximo esperado (MCE), el cual se define como el sismo de diseño aumentando en un 50%. Los requisitos de deriva son del 1% de la altura de piso para el MCD y del 3% para el MCE.

No obstante las respuestas estructurales (cortantes y derivas) se determinan a partir de un coeficiente⁵ B_D o B_M asociado al amortiguamiento efectivo y a partir de un periodo natural efectivo (T_D o T_M), y estos dos parámetros dependen de un factor de ductilidad efectivo (μ_D o μ_M) que se desconoce en un principio. Por tal motivo se debe utilizar un

⁴ Espectro de aceleraciones para un periodo de retorno de 475 años

⁵ Los subíndices D o M indican si el coeficiente se usa para el análisis del sismo de diseño (MDC) o para el análisis del sismo máximo esperado (MDE).

proceso iterativo en donde el factor de ductilidad efectivo se supone, y posteriormente se recalcula a partir de las respuestas encontradas y no debe diferir significativamente del valor supuesto.

El proceso iterativo fue planteado por (Velásquez, 2020) y (Cano, 2020) organizando los requisitos propuestos en el capítulo 18 del ASCE-7-16 como se observa en la figura 4-2. Los términos y ecuaciones utilizadas en este proceso se presentan a continuación.

- Definición de los parámetros sísmicos

Adicional a los valores de aceleración espectral para los distintos periodos de los modos involucrados en el análisis, se deben determinar los siguientes parámetros:

- S_{DS} : Coordenada máxima del espectro de aceleraciones para el sismo (MCD).
- S_{D1} : Coordenada del espectro de aceleraciones para un periodo de un segundo ($T=1s$) para el sismo (MCD).
- S_{MS} : Coordenada máxima del espectro de aceleraciones para el sismo (MCE).
- S_{M1} : Coordenada del espectro de aceleraciones para un periodo de un segundo ($T=1s$) para el sismo (MCE).

La relación entre las coordenadas anteriores para el sismo de diseño se utiliza también en los análisis:

$$T_s = \frac{S_{D1}}{S_{DS}} \quad (4.6)$$

- Análisis modal

Partiendo de la matriz de modos de vibración de la estructura, acotada en torno a los desplazamientos máximos del último nivel para practicidad, se determinan los parámetros del análisis modal:

$$\bar{W}_m = \frac{\left(\sum_{i=1}^n w_i \phi_{im} \right)^2}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{im}^2} \quad (4.7)$$

$$\Gamma_m = \frac{\overline{W}_m}{\sum_{i=1}^n w_i \phi_{im}} \quad (4.8)$$

En donde:

$\overline{W}_m$: Masa sísmica efectiva para el modo m

Γ_m : Factor de participación modal para el modo m

w_i : Peso del nivel i

ϕ_{im} : Coeficiente de la matriz de modos de vibración para el nivel i del modo m

- Ductilidad y periodos efectivos

Los valores de ductilidad efectiva (μ_D o μ_M) que en principio se desconocen se utilizan para calcular el periodo efectivo del modo fundamental para los sismos MCD y MCE:

$$\begin{aligned} T_{1D} &= T_1 \sqrt{\mu_D} \\ T_{1M} &= T_1 \sqrt{\mu_M} \end{aligned} \quad (4.9)$$

En donde:

T_{1D} y T_{1M} : Son los periodos efectivos para el modo fundamental y los sismos MCD y MCE respectivamente

T_1 : Periodo del modo fundamental

Los valores de ductilidad no pueden superar el siguiente valor máximo:

$$\begin{aligned} \text{Para } T_{1D} \leq T_s \rightarrow \mu_{max} &= 0.5 \left(\left(\frac{R}{\Omega_0 * I} \right)^2 + 1 \right) \\ \text{Para } T_1 \geq T_s \rightarrow \mu_{max} &= \frac{R}{\Omega_0 * I} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Donde R , Ω_0 , y I son los coeficientes de disipación de energía, de sobre resistencia y de importancia definidos para la estructura.

Cabe aclarar que para modos distintos al fundamental el ASCE-7-16 (18.7.3.2) recomienda tomar los valores de ductilidad efectiva como iguales a uno, y el proceso iterativo se centra en converger en los valores supuestos para el modo fundamental.

- Amortiguamiento efectivo total

El amortiguamiento efectivo total se calcula a partir de tres tipos de amortiguamiento, inherente, viscoso e histerético, a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}\beta_{mD} &= \beta_I + \beta_{Vm} \sqrt{\mu_D} + \beta_{HD} \\ \beta_{mM} &= \beta_I + \beta_{Vm} \sqrt{\mu_M} + \beta_{HM}\end{aligned}\tag{4.11}$$

En donde:

β_{mD} y β_{mM} : Son los amortiguamientos efectivos totales para el modo m y el sismo MCD y MCE respectivamente.

β_I : Amortiguamiento Inherente

β_V : Amortiguamiento viscoso

β_H : Amortiguamiento histerético.

El amortiguamiento inherente depende del tipo de material y la configuración estructural. Cuando no se realicen ensayos para determinarlos el ASCE-7-16 exige tomar un valor máximo del 3% del amortiguamiento crítico para todos los modos de vibración.

Por otra parte, el amortiguamiento viscoso depende entre la relación del trabajo realizado por el sistema de disipación respecto al trabajo realizado por la estructura principal:

$$\beta_{Vm} = \frac{\sum_j W_{mj}}{4\pi W_m}\tag{4.12}$$

En donde los términos W_{mj} corresponde al trabajo realizado por el sistema de disipación en un nivel j para el modo m , y W_m corresponde al trabajo realizado por la estructura principal, el cual se define de la siguiente forma:

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_j F_{im} \delta_{im} \quad (4.13)$$

Las fuerzas y desplazamientos en la estructura principal se determinan a partir de las aceleraciones y desplazamientos espectrales correspondientes de cada modo, y la matriz de modos de vibración:

$$\delta_{im} = S_{dm} \phi_{im} \quad (4.14)$$

$$F_{im} = w_i S_{am} \phi_{im} \quad (4.15)$$

En donde S_{dm} es el desplazamiento espectral para el modo m y S_{am} es la aceleración espectral para el modo m .

El trabajo realizado por el sistema de disipación se calcula a partir de los desplazamientos relativos de los elementos que lo conforman, y la fuerza asociada según la rigidez de cada elemento. Para esto se debe tener presente si el desplazamiento causa que se supere el rango lineal, porque el área bajo la curva de fuerza-desplazamiento correspondiente al trabajo cambia si el elemento entra en fluencia.

Finalmente el amortiguamiento histerético se encuentra con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \beta_{HD} &= q_H (0.64 - \beta_I) \left(1 - \frac{1}{\mu_D} \right) \\ \beta_{HM} &= q_H (0.64 - \beta_I) \left(1 - \frac{1}{\mu_M} \right) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Donde q_H es un factor de ajuste por la histéresis definido como:

$$q_H = \text{Max} \left(0.5 ; 0.67 \frac{T_s}{T_1} \right) \leq 1.0 \quad (4.17)$$

- Coeficientes de amortiguamiento

A partir de los valores de amortiguamiento inherente, histerético y viscoso se determina el amortiguamiento efectivo total por modo para los sismos MCD y MCE, y se calculan los coeficientes de amortiguamiento asociados, con la interpolación lineal de los valores de la siguiente table del ASCE-7-16:

β (%) Amortiguamiento efectivo	B Coeficiente de amortiguamiento
<2	0.80
5	1.00
10	1.20
20	1.50
30	1.80
40	2.10
50	2.40
60	2.70
70	3.00
80	3.30
90	3.60
>100	4.00

Tabla 4-1 Coeficientes de amortiguamiento (Tomado del ASCE-7-16-C.18)

- Cortante en la base y fuerzas laterales por nivel

El cortante en la base por el método del análisis modal espectral debe ser mayor a un cortante mínimo dado por la menor de las siguientes expresiones:

$$V_{\min} = \frac{V}{B_{V+I}} \quad (4.18)$$

$$V_{\min} = 0.75 * V$$

En donde B_{V+I} corresponde al coeficiente de amortiguamiento que solo considera el amortiguamiento viscoso e inherente y V es al cortante por el método de la fuerza horizontal equivalente definido así:

$$V = C_s * W \quad (4.19)$$

En donde W es el peso de la edificación, y C_s es un coeficiente de respuesta sísmica espectral definido de la siguiente forma:

$$C_s = \frac{S_{DS}}{R/I} \quad (4.20)$$

Este valor debe cumplir las siguientes restricciones:

$$C_s \leq \frac{S_{D1}}{T * (R/I)} \quad \text{para } T \leq T_L$$

$$C_s \leq \frac{S_{D1} * T_L}{T^2 * (R/I)} \quad \text{para } T > T_L \quad (4.21)$$

$$C_s \geq 0.044 S_{DS} * I \geq 0.01 \quad (4.22)$$

$$C_s \geq 0.55 \frac{S_1}{R/I} \quad (4.23)$$

Donde T_L periodo de cambio a la zona de periodos largos del espectro y los demás términos ya se han definido anteriormente. Después de determinar el cortante basal mínimo se encuentra el cortante para cada uno de los modos implicados en el análisis:

$$V_m = C_{Sm} * \overline{W_m} \quad (4.24)$$

El coeficiente sísmico para el caso del análisis modal se define de la siguiente forma:

$$C_{Sm} = \left(\frac{R}{C_D} \right) \left(\frac{S_{DS}}{\Omega_0 B_{mD}} \right) \quad \text{para } T_m < T_s$$

$$C_{Sm} = \left(\frac{R}{C_D} \right) \left(\frac{S_{DS}}{T_m \Omega_0 B_{mD}} \right) \quad \text{para } T_m \geq T_s \quad (4.25)$$

En donde el término que falta por definir corresponde al coeficiente de amortiguamiento B_{mD} para el modo m del sismo MCD. Los cortantes determinados con la ecuación 4.24 se combinan con algún método, por ejemplo SRSS, y el resultado debe ser mayor al cortante basal mínimo definido en la ecuación 4.18 o sino las respuestas estructurales deben escalarse. Posteriormente se pueden determinar las fuerzas de piso con la expresión siguiente:

$$F_{im} = w_i \phi_{im} \frac{\Gamma_m}{W_m} V_m \quad (4.26)$$

Con la matriz de fuerzas que surgen de la anterior ecuación se determinan los cortantes de piso e igualmente se combinan modalmente para encontrar las fuerzas laterales de diseño, las cuales los elementos deben resistir.

- Verificación de derivas según ASCE-7-16

Los desplazamientos de piso, tanto para el sismo de diseño MCD como para el sismo máximo esperado MCE respectivamente, se determinan fácilmente a partir de la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \delta_{imD} &= D_{mD} \phi_{im} \\ \delta_{imM} &= D_{mM} \phi_{im} \end{aligned} \quad (4.27)$$

En donde el termino D_{mD} indica el desplazamiento de techo para el modo m en el sismo MCD por ejemplo. Estos desplazamientos se determinan de la siguiente forma:

Para el modo fundamental:

$$\begin{aligned} \text{Para } T_{1D} \leq T_s \quad D_{1D} &= \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \left(\frac{S_{DS} T_{1D}^2}{B_{1D}} \right) \geq \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \left(\frac{S_{DS} T_1^2}{B_{1E}} \right) \\ \text{Para } T_{1D} > T_s \quad D_{1D} &= \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \left(\frac{S_{D1} T_{1D}}{B_{1D}} \right) \geq \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \left(\frac{S_{DS} T_1}{B_{1E}} \right) \end{aligned} \quad (4.28)$$

Para los demás modos ($m > 1$):

$$D_{mD} = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_m \left(\frac{S_{D1} T_m}{B_{mD}} \right) \geq \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_m \left(\frac{S_{DS} T_m^2}{B_{mD}} \right) \quad (4.29)$$

Mientras que para el sismo MCE son:

Para el modo fundamental:

$$\begin{aligned}
\text{Para } T_{1M} \leq T_s \quad D_{1D} &= \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \left(\frac{S_{MS} T_{1M}^2}{B_{1M}} \right) \geq \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \left(\frac{S_{MS} T_1^2}{B_{1E}} \right) \\
\text{Para } T_{1M} > T_s \quad D_{1D} &= \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \left(\frac{S_{M1} T_{1M}}{B_{1M}} \right) \geq \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_1 \left(\frac{S_{MS} T_1}{B_{1E}} \right)
\end{aligned} \tag{4.30}$$

Para los demás modos ($m > 1$):

$$D_{mM} = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_m \left(\frac{S_{M1} T_m}{B_{mM}} \right) \geq \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \Gamma_m \left(\frac{S_{MS} T_m^2}{B_{mM}} \right) \tag{4.31}$$

Aplicando entonces la ecuación 4.27 se determina la matriz de desplazamientos para los dos sismos considerados, y con esta se encuentran las derivas por modo. Haciendo la combinación modal con SRSS se encuentran las derivas de piso, las cuales deben ser menores al 1% de la altura de piso para el MCD y del 3% para el sismo MCE.

- Verificación de los valores de ductilidad

Se verifica por último que los valores de ductilidad asumidos no difieran significativamente del calculado con las siguientes expresiones, para ambos sismos considerados:

$$\mu_D = \frac{D_{1D}}{D_Y} \geq 1.0 \tag{4.32}$$

$$\mu_M = \frac{D_{1M}}{D_Y} \geq 1.0 \tag{4.33}$$

El término no definido D_Y corresponde al desplazamiento de techo del último nivel para el punto de fluencia efectiva del sistema de disipación, el cual se define de la siguiente manera:

$$D_Y = \left(\frac{g}{4\pi^2} \right) \left(\frac{\Omega_0 C_d}{R} \right) \Gamma_1 C_{s1} T_1^2 \tag{4.34}$$

4.1.1.11 Verificación del sistema de disipación

A partir de los desplazamientos y derivas del análisis modal anterior se determinan los desplazamientos relativos de los componentes del sistema de disipación de acuerdo con su rigidez. Con estos valores se verifica que el comportamiento del disipador sea el deseado.

En los disipadores TADAS el diseño exige que el daño se concentre en las platinas TADAS, mientras que las riostras deben permanecer en el rango lineal, porque en caso contrario las platinas TADAS no podrían disipar energía. Por tal motivo, el desplazamiento relativo de las riostras en su eje no debe superar el desplazamiento de fluencia, mientras que en las platinas TADAS el desplazamiento relativo límite es el requisito por cumplir:

Riostras:

$$\begin{aligned}\Delta_{ri_D} &\leq \Delta_{ri_y} \\ \Delta_{ri_M} &\leq \Delta_{ri_y}\end{aligned}\tag{4.35}$$

Platinas TADAS:

$$\begin{aligned}\Delta_{TADASI_D} &\leq \Delta_{TADASI_u} \\ \Delta_{TADASI_M} &\leq \Delta_{TADASI_u}\end{aligned}\tag{4.36}$$

En los arriostramientos BRB el daño se concentra en estos elementos con lo cual sí se supera el desplazamiento de fluencia. No obstante, como estos elementos también proveen de rigidez a la estructura no deben fallar para los sismos de diseño, y entonces se deben comparar los desplazamientos y fuerzas obtenidas en el sistema de disipación en cada nivel respecto a los valores de desplazamiento y fuerza límite de estos elementos:

$$\begin{aligned}\Delta_{ri_D} &\leq \Delta_{ri_u} \\ F_{ri_M} &\leq F_{ri_u}\end{aligned}\tag{4.37}$$

4.1.1.12 Verificaciones de diseño para estructuras de acuerdo con NSR-10

En la estructura con disipadores se verifican los requisitos de la NSR-10 para estructuras en general, pero esta vez considerando la acción del 100% de las fuerzas sísmicas de

diseño. Para esto el análisis modal espectral realizado con anterioridad sirve para determinar las derivas de piso según la formulación de la NSR-10:

$$\Delta_{i-Sx} = \sqrt{\Delta_{ix}^2 + \Delta_{iy}^2} \quad (4.38)$$

Se verifica posteriormente que el acero dispuesto en los elementos de la estructura principal resista las solicitaciones producidas por las combinaciones de carga del título B.

4.1.2 Definición de las características de disipadores TADAS

El objetivo principal del diseño de los disipadores TADAS consiste en seleccionar la cantidad de dispositivos que se necesitan por piso, así como las características y dimensiones necesarias para las platinas y los arriostramientos del contraviento Chevrón. Para esto se utiliza el enfoque de relación de deriva de piso ν constante de (Oviedo A. et al., 2010) explicado en la sección 2.4.2. Asumiendo un valor constante para esta relación (ν) se despeja la deriva de piso de fluencia para el sistema de disipación a partir de la deriva de fluencia de la estructura principal encontrada en el prediseño:

$$\begin{aligned} \nu &= \frac{\Delta_{Dy}}{\Delta_{Fy}} = Cte. \\ \Delta_{Dy} &= \nu * \Delta_{Fy} \end{aligned} \quad (4.39)$$

El valor de la relación de deriva de piso debe ser menor a la unidad para que el comportamiento ideal en el que los disipadores entran en fluencia antes que la estructura principal se presente.

La relación de resistencia (β) entre el sistema de disipación (Q_{Dy}) y la estructura completa (Q_s) también se mantiene constante, y de esta se despeja el valor de cortante de fluencia necesario para el sistema de disipación:

$$\begin{aligned}
\beta &= \frac{Q_{Dy}}{Q_S} = Cte. \\
Q_S &= Q_{Dy} + Q_{Fy} \\
\beta(Q_{Dy} + Q_{Fy}) &= Q_{Dy}
\end{aligned} \tag{4.40}$$

$$Q_{Dy} = \frac{\beta Q_{Fy}}{1 - \beta}$$

Para definir los valores de las constantes ν y β se pueden utilizar las recomendaciones de varios autores que han estudiado la influencia de estos parámetros en el diseño de edificaciones con disipadores controlados por el desplazamiento, tales como (Oviedo A. et al., 2010). Posteriormente se determina la rigidez necesaria para el sistema de disipación:

$$K_D = \frac{Q_{Dy}}{\Delta_{Dy}} \tag{4.41}$$

Como se indicó anteriormente los arriostramientos de apoyo y las platinas TADAS trabajan como un sistema en serie, en donde la rigidez de cada elemento se relaciona de la siguiente forma:

$$K_D = \frac{K_{ri} * K_{Tadas}}{K_{ri} + K_{Tadas}} \tag{4.42}$$

Así seleccionando provisionalmente un diámetro, espesor y altura para las riostras de apoyo, así como un número de disipadores por piso, se determina inicialmente la rigidez de las riostras total por nivel con las siguientes expresiones:

Rigidez de un sistema de riostras de apoyo:

$$K_{bi} = 2 \frac{A_{bi} E}{L_{bi} (\cos \theta)^2} \tag{4.43}$$

Rigidez total de riostras por nivel:

$$K_{ri} = n_i * K_{bi} \quad (4.44)$$

En donde:

K_{bi} : es la rigidez del sistema de apoyo de dos riostras para el nivel i .

A_{bi} : es la rigidez del sistema de apoyo de dos riostras para el nivel i .

E : módulo de elasticidad del acero de las riostras.

L_{bi} : longitud de las riostras del nivel i .

θ : Ángulo de inclinación de las riostras.

K_{ri} : rigidez total del sistema de riostras para el nivel i .

n_i : número de vanos con disipadores para el nivel i .

Despejando la ecuación 4.42 para la rigidez de las platinas TADAS se tiene un valor preliminar para esta variable:

$$K_{Tadas} = \frac{K_D * K_{ri}}{K_{ri} - K_D} \quad (4.45)$$

Teniendo como precedente el valor de la anterior ecuación se seleccionan las dimensiones, espesor y cantidad de platinas TADAS por nivel, tal que al calcular la fuerza y desplazamiento de fluencia con las ecuaciones de la sección 2.2, se tenga una rigidez cercana al valor de referencia de la ecuación 4.45. Con los valores de rigidez ya determinados para las platinas y las riostras de los dispositivos TADAS se recalcula el valor de rigidez del sistema de disipación con la ecuación 4.42, y el valor no debe diferir significativamente del valor inicial. Igualmente se deben verificar las relaciones entre la rigidez del sistema total y el sistema de disipación, y la relación entre la rigidez de los arriostramientos y las platinas TADAS.

En el siguiente diagrama de flujo describe el proceso anterior:

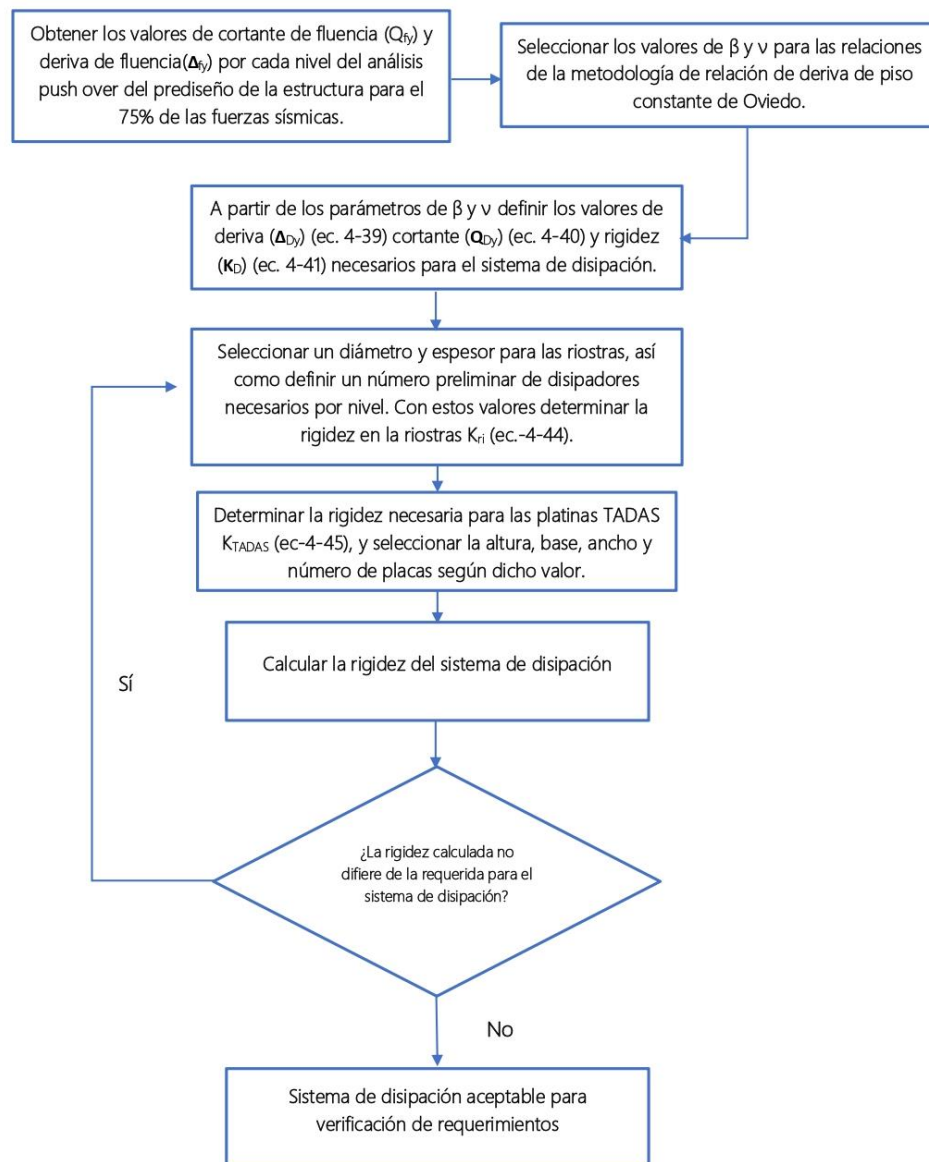


Figura 4-10 Diagrama de flujo para dimensionamiento de disipadores TADAS

Con las características de rotación y momento de las platinas en cada nivel se definen las rotulas plasticas asociadas a los dispositivos TADAS, siguiendo las indicaciones del capítulo 3.1 y se procede a continuar con los demás pasos de diseño especificados en la sección 4.1.2.

4.1.3 Definición de las características de disipadores BRB

El dimensionamiento de las riostras tipo BRB basados en el enfoque de relación de deriva constante parte de definir un valor de deriva, cortante y rigidez necesaria para el sistema de disipación por nivel, utilizando las constantes ν y β . De esta forma se aplican de nuevo las ecuaciones 4.39, 4.40 y 4.41. Se continúa seleccionando un área y una longitud para la zona plástica de los disipadores, que está conformada con la platina del núcleo de los sistemas BRB. Con estas propiedades se calculan la fuerza de fluencia y la rigidez de esta zona con las siguientes expresiones:

$$T_y = A_{bp} * f_y \quad (4.46)$$

$$K_{bp} = \frac{A_{bp} * E}{L_{bp}} \quad (4.47)$$

En donde:

A_{bp} : Área del núcleo en la zona plástica.

L_{bp} : Longitud del núcleo en la zona plástica.

E : Modulo de elasticidad del acero.

f_y : Esfuerzo de fluencia del acero.

T_y : Fuerza de fluencia del núcleo de acero.

K_{bp} : Rigidez en la zona del núcleo de acero.

Para determinar las propiedades de la zona elástica de la riostra BRB, como esta zona es varias veces más rígida que la del núcleo, se calcula provisionalmente una rigidez con un área mayor al área de la zona plástica:

$$K_{be} = \frac{A_{be} * E}{L_{be}} \quad (4.48)$$

Con las propiedades de la zona elástica y la plástica se encuentra la rigidez equivalente del arriostramiento tipo BRB, asumiendo la formulación de estos trabajando en paralelo según la formulación de la sección 2.3, con la siguiente expresión:

$$K_{beq} = \frac{K_{be} * K_{bp}}{2K_{bp} + K_{be}} \quad (4.49)$$

Con la expresión para la rigidez equivalente del BRB predimensionado y considerando que los disipadores en forma de "V" invertida tendrían dos arriostramientos, la rigidez total por nivel provista por el sistema de disipación sería entonces la siguiente:

$$K_{Di} = 2 * n_i * K_{beq_i} \quad (4.50)$$

El valor anterior debe estar en el orden de magnitud de la rigidez necesaria para el sistema de disipación encontrada con la ecuación 4.41. En caso contrario se deberán replantear las propiedades de las riostras BRB o aumentar el número de disipadores.

Como el dimensionamiento de las riostras BRB se basa en un área asumida para la sección en la zona elástica, es necesario verificar que el BRB bajo esa formulación sea realizable. Mediante el software *Riostra F'c-BRB* se puede realizar un análisis detallado del disipador, verificando las dimensiones mínimas y modelando el comportamiento del BRB, considerando entre otros parámetros las zonas de conexión y la interacción entre el mortero y la camisa de confinamiento. Del análisis del software se obtiene también una verificación del valor de la rigidez equivalente, que no debe diferir del valor teórico calculado, y con el cual se realiza la comparación respecto a la rigidez necesaria para el sistema de disipación.

En el siguiente esquema se presenta un resumen de los pasos anteriormente descritos:

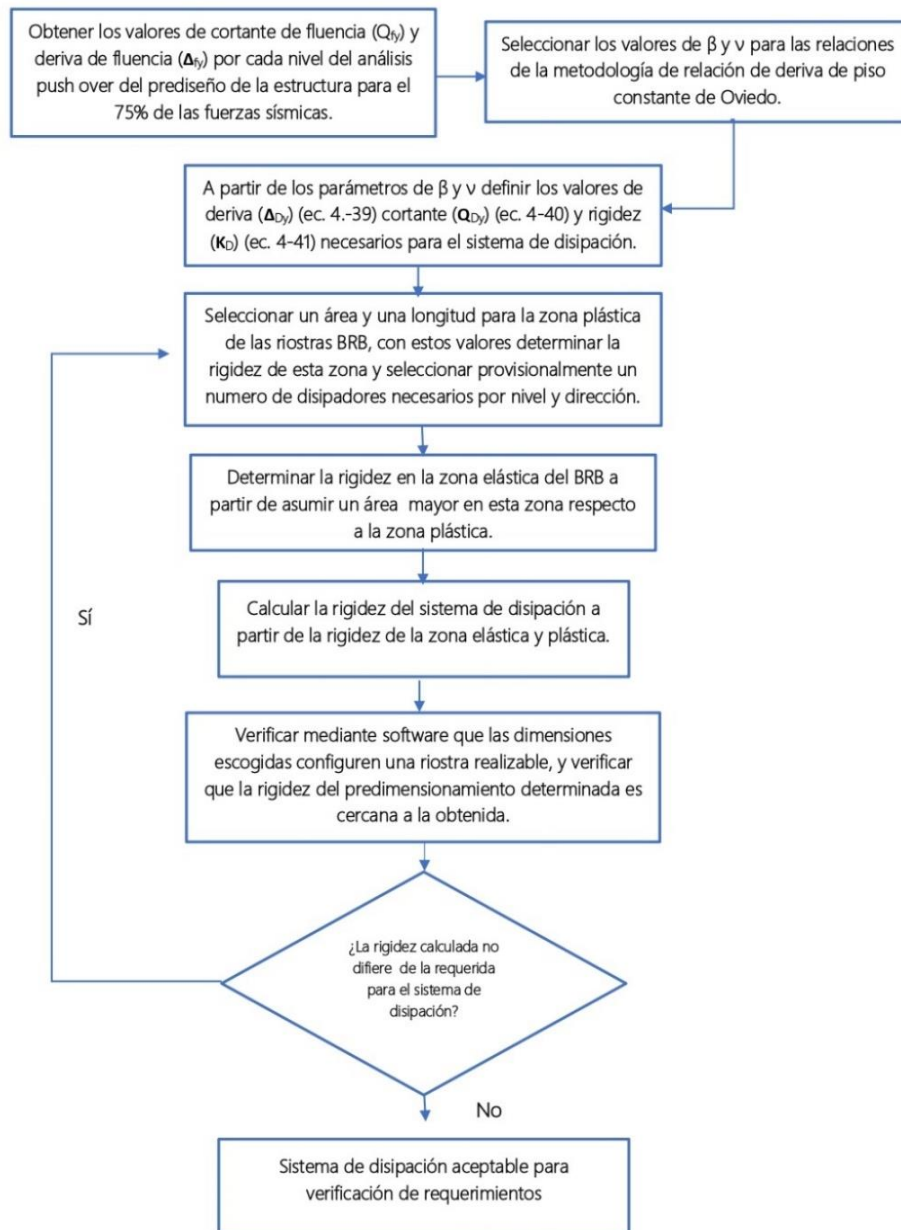


Figura 4-11 Diagrama de flujo para dimensionamiento de disipadores BRB

4.1.4 Análisis y diseño de la edificación en concreto reforzado con sistema de pórticos

Para el diseño de la edificación en concreto reforzado con sistema de pórticos se debe recordar que el prediseño de la estructura principal realizado para las edificaciones con los disipadores no es equiparable ya que se basa en un cortante en la base del 75%, con lo que las secciones de viga y columnas, además del refuerzo de acero, no serán

suficientes para el análisis considerando el 100% de las fuerzas sísmicas. Por tal motivo se sigue un diseño independiente a partir de los pasos definidos en el apartado A.1.3.4 de la NSR-10 y es una edificación completamente diferente al diseño de la estructura principal de las edificaciones con sistema de disipación.

En el siguiente diagrama de flujo se presentan los pasos a seguir para el diseño de la edificación sin la consideración de los disipadores:

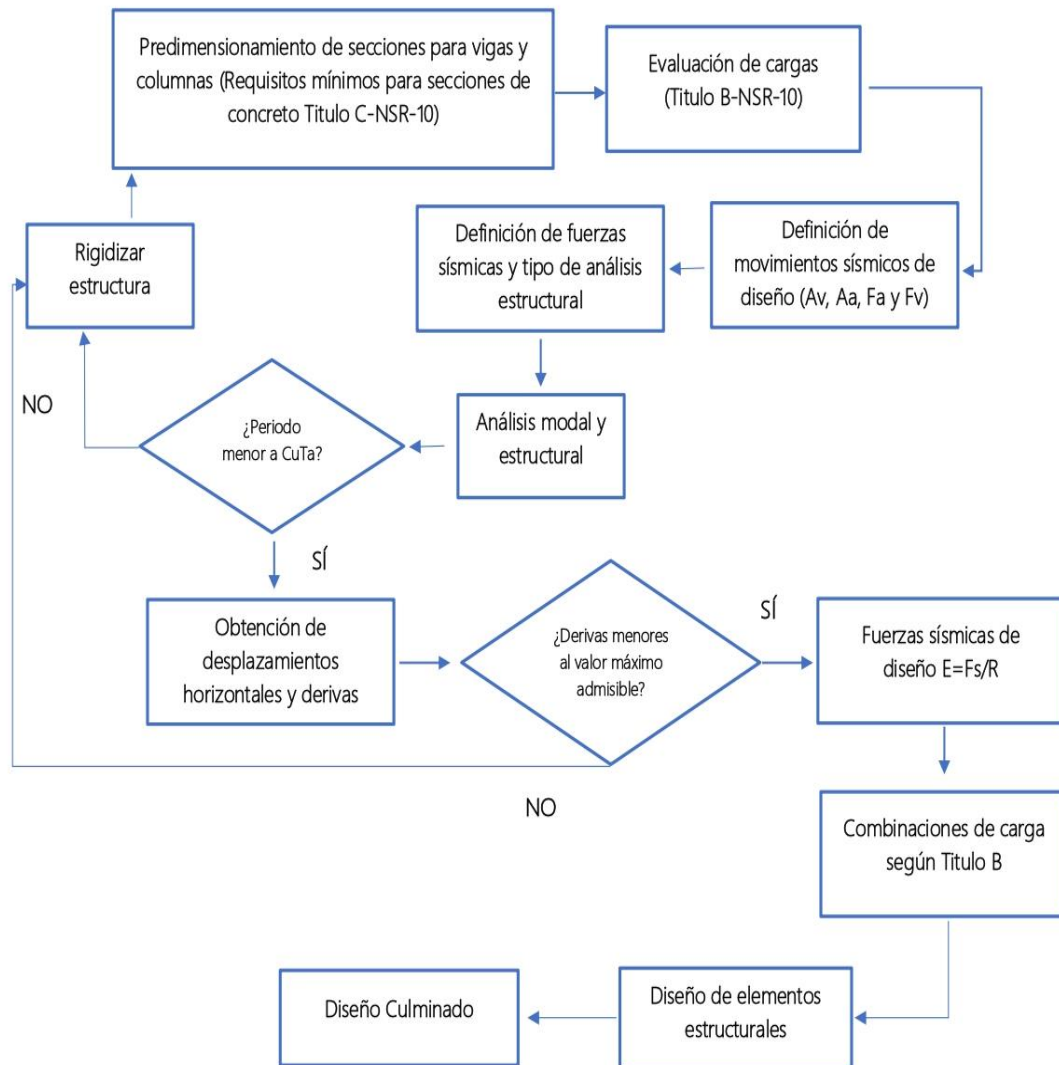


Figura 4-12 Diagrama de flujo para el diseño de la edificación solo con pórticos

La edificación cumple con las condiciones para realizar el diseño a partir de análisis modal espectral. El acero de refuerzo se determina igualmente a partir de las ecuaciones para concreto reforzado.

4.2 Definición de los escenarios sísmicos y evaluación del desempeño

De la segunda etapa de la metodología se generan los elementos necesarios para evaluar el comportamiento y el desempeño de las edificaciones ya diseñadas ante escenarios sísmicos posibles, que intenten llevar a las estructuras a acciones sísmicas y desplazamientos más altos a los considerados con los sismos de diseño, y con esto poder evaluar el estado de la estructura cuando se enfrente a eventos extremos reales durante su ciclo de vida.

4.2.1 Metodología para definición de escenarios sísmicos

En el presente trabajo un escenario sísmico se configura cuando se obtiene un acelerograma del evento sísmico, el cual puede ser usado como una función de aceleración externa en los análisis no lineales dinámicos cronológicos. Para la definición de los escenarios sísmicos en la presente investigación se decidió utilizar un proceso en el cual se generan acelerogramas sintéticos, pero que estuvieran atados a las condiciones de amenaza sísmica y tipo de suelo de la ubicación definida para la estructura.

Para esto, en primer lugar se seleccionan las fuentes generadoras de eventos sísmicos cercanas al lugar, escogiendo las fuentes significativas en términos de eventos recurrentes y de magnitud considerable. Igualmente de los eventos correspondientes a cada fuente se seleccionan los más significativos en términos de magnitud para ser considerados como candidatos a generar el escenario sísmico buscado. Toda la información anterior se consigue de los catálogos sísmicos de la región.

De los eventos seleccionados se deben conocer los siguientes parámetros necesarios para la generación de los acelerogramas sintéticos:

- Magnitud de momento
- Orientación de la ruptura (ángulos *dip*, *rake* y *strike*)
- Plano de ruptura (relación de aspecto)
- Distancia (entre la estación y la ubicación de la estructura)

Con los anteriores parámetros se configura la simulación del movimiento fuerte mediante el software *Strong motion analyst (SMA)*, en el cual a partir de una distribución probabilística de la dislocación del evento sísmicos en el área de ruptura, y utilizando el modelo de fuente puntual, genera una serie de simulaciones del evento sísmico en la ubicación especificada para la estructura a nivel de roca. Para lo anterior se selecciona un modelo para la solución del campo de desplazamiento adecuado para el tipo de fuente del evento a simular. En la siguiente imagen se puede apreciar la ventana de configuración para movimiento fuerte del SMA:

The screenshot shows the 'Strong motion simulation' window with the following sections and values:

- Signal name:** Fuente
- Number of simulations:** 10
- Intense phase only:** ☐
- Earthquake rupture:**
 - Strike: 30
 - Rupture plane:
 - Arup: 2511.8864315095821
 - AspectRatio: 2.5
 - Height: 79.244659623055711
 - Hypocenter position along: 0.5
 - Hypocenter position along: 0.25
 - N: 10
 - N2: 100
 - Slip distribution: Random
 - Width: 31.69786384922228
- Hypocenter:**
 - Location of the hypocenter
- Station:**
 - Varios:
 - Depth: 30
 - East: 3.6
 - North: 6.5
- Shaping function (Boore 1983):**
 - Epsilon: 0.2
 - Eta: 0.005
- Displacement field solution:**
 - Model: Bernal PGA Intraplate
 - High frequency decay:
 - Q1: -1
 - Qo: 723.1
 - Epsilon: 0.9
 - k1: 0.0333
 - k0: 0
 - Propagation medium properties:
 - Rho: 2.8
 - Beta: 3.5
 - Source spectrum:
 - Ds: 235.89
 - Ro: 0.642
 - Rx: 100
 - Varios:
 - SlipVelFunction: None
- Ds:**
 - Stress drop [Kg/cm2]
- Base gaussian noise:**
 - Mean: 0
 - Deviation: 1
 - Delta (sec): 0.01
 - N samples: 4096

Buttons at the bottom: Preview slip distribution, Sub sources Shape, Get ATN, Multiple maps, Create maps, Aceptar, Cancelar.

Figura 4-13 Ventana de configuración para simulación de movimiento fuerte en SMA.

Los valores que se ingresan en la anterior ventana corresponden a la magnitud del evento, los ángulos de orientación de la falla (*ruptura plane*) y la distancia al lugar determinado (*station*).

Las simulaciones generan acelerogramas a nivel de roca, y para determinar la influencia del perfil del suelo en materia de amortiguación o amplificación de la señal sísmica, es necesario realizar un análisis de respuesta de sitio, el cual también está disponible en el software SMA. Para ello se configura el perfil del sitio de ubicación a partir de las propiedades básicas de un estudio de suelos del lugar: límites de atterberng, peso específico, velocidad de onda, nivel freático, etc. También es necesario configurar para cada tipo de suelo un modelo dinámico. A partir de método de *Haskel* para traslación vertical de ondas, mediante el software se determina el cambio que sufren los acelerogramas al transitar por el perfil del suelo configurado.

A los acelerogramas se les puede extraer el espectro de Fourier, la función de transferencia o el espectro de respuesta en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración, esto con el fin de verificar que las señales sean consistentes con los parámetros considerados. Por ejemplo analizando las funciones de transferencia se puede observar el efecto del perfil de suelo en la señal original, o comparando el espectro de aceleraciones respecto al espectro de diseño de las normativas se puede ver el nivel de carga sísmica al que están los acelerogramas generados.

Después de verificar los acelerogramas generados se procede a seleccionar una de las simulaciones realizadas, y procesar la señal. El acelerograma generado, en términos de procesamiento de información, puede llegar a ser difícil de manejar si contiene muchos datos de aceleración. Por tal motivo, dentro del mismo SMA se pueden realizar el procesamiento de la señal, recortando por ejemplo los datos solamente a la fase intensa del movimiento, o también definiendo un intervalo de tiempo mayor para los datos de aceleración. Con lo anterior se logra reducir el número de datos del acelerograma final, pero sin afectar el efecto del evento sísmico.

En el siguiente diagrama se pueden observar los pasos descritos anteriormente:

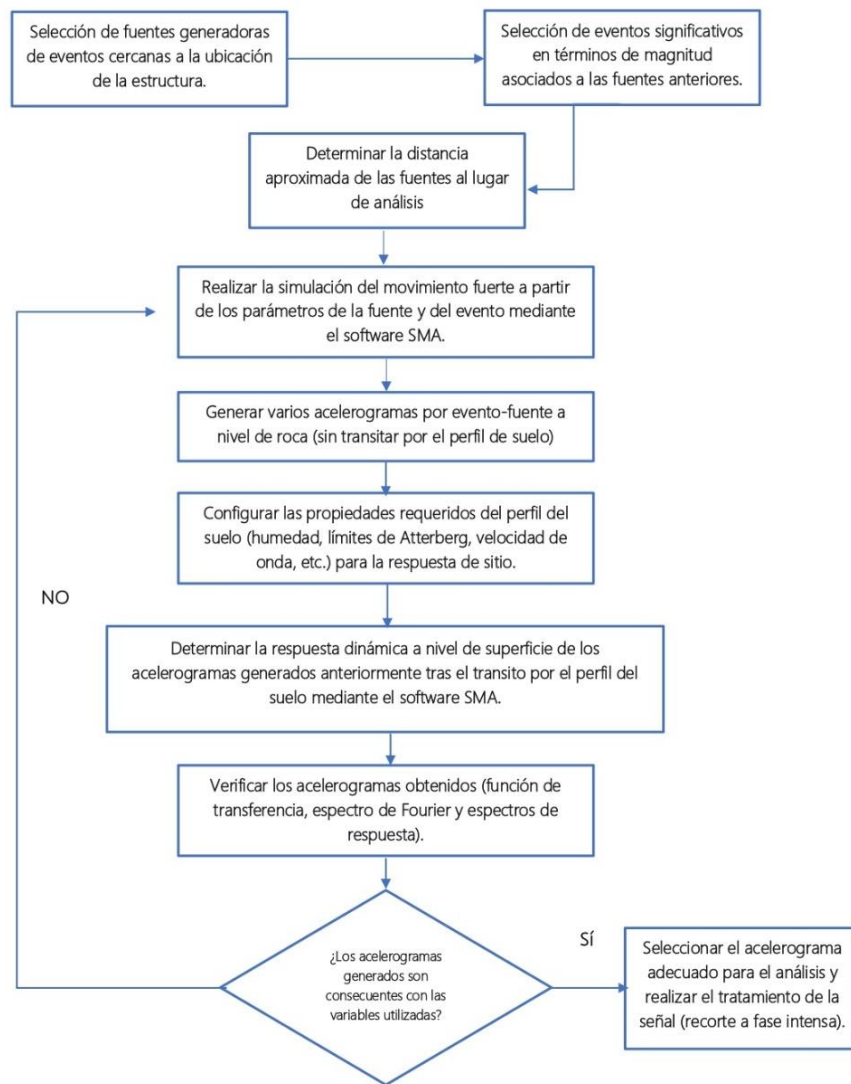


Figura 4-14 Diagrama de flujo para la generación de acelerogramas sintéticos

4.2.2 Análisis no lineal dinámico cronológico

Con cada uno de los escenarios sísmicos definidos se realiza un análisis no lineal dinámico cronológico en cada una de las dos direcciones principales, y para cada una de las tres edificaciones objeto de estudio. Para esto, como se mencionó en la sección 2.1.3, el análisis cronológico parte de la solución de la ecuación dinámica de

movimiento considerando la función de aceleración externa como variable en el tiempo, y para el presente caso una función difícil de representar, porque son los picos de aceleración alternando rápidamente en un intervalo de tiempo pequeño. Por tal motivo es necesario recurrir a los métodos de integración paso a paso para encontrar las respuestas de la estructura en cada punto de aceleración de la señal sísmica. Adicionalmente se deben considerar la degradación de las propiedades de rigidez por la plastificación y el daño de la estructura al entrar en el rango inelástico.

Para el presente caso el análisis no lineal dinámico cronológico se realiza con el software de análisis estructural *SAP2000*. Los modelos de las edificaciones utilizados para los análisis *push over*, sirven para realizar los análisis cronológicos, porque cuenta con las rotulas definidas anteriormente para los elementos de la estructura principal (vigas y columnas), así como para los elementos del sistema de disipación.

El análisis se configura como un nuevo caso de carga del tipo tiempo historia con una solución bajo integración directa, que al igual que en el análisis *push over* parte de un estado inicial de carga para la estructura, definido como la suma de la carga muerta más el 25% de la carga viva.

La carga aplicada para la estructura será del tipo aceleración y se aplica en la dirección principal deseada. También se deben definir el número de pasos que recorrerá el análisis y el intervalo de tiempo que separa estos pasos. Estos parámetros son equiparables a los datos totales de aceleración que posea el acelerograma y el espaciamiento constante de tiempo entre ellos. Los efectos *p-delta* también deben incluirse en el análisis, y posteriormente se escoge el método de integración elegido para el análisis junto a sus respectivos parámetros.

La configuración del análisis cronológico inelástico dentro del ambiente del software *SAP2000* puede apreciarse en la siguiente figura 4-15.

Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name
 FUENTE 8-X Set Def Name Modify/Show...

Initial Conditions
☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☒ Continue from State at End of Nonlinear Case ESTADO INICAL
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case
 Use Modes from Case MODAL

Loads Applied

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Accel	U1	Fuente 8	9.81
Accel	U1	Fuente 8	9.81

Add Modify Delete

☐ Show Advanced Load Parameters

Time Step Data
 Number of Output Time Steps: 1100
 Output Time Step Size: 0.01

Other Parameters
 Damping: Modal Modify/Show...
 Time Integration: Newmark Modify/Show...
 Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

Load Case Type
 Time History Design...

Analysis Type
☐ Linear ☒ Nonlinear

Solution Type
☐ Modal ☒ Direct Integration

Geometric Nonlinearity Parameters
☐ None ☒ P-Delta ☐ P-Delta plus Large Displacements

History Type
☒ Transient ☐ Consider Collapse
☐ Periodic

Mass Source
 Previous

OK Cancel

Figura 4-15 Ventana para configuración de análisis dinámico cronológico inelástico

Según la complejidad de la estructura, además del número de datos que conforman el acelerograma, los análisis pueden requerir un tiempo considerable de cómputo, dando como resultado finalmente los valores de cargas internas en los elementos, los desplazamientos en los nodos y el estado de plastificación durante cada uno de los pasos del análisis.

Las principales respuestas estructurales de los análisis de tiempo historia son la variación del cortante en la base y los desplazamientos, esto en función del tiempo que dura el evento sísmico. Si bien es cierto que se pueden determinar parámetros adicionales como velocidad, aceleración, momento u otras cargas, la naturaleza de la carga sísmica a la que se está sometiendo la estructura se aprecia de mejor en las variables señaladas. Mediante el software de análisis estructural utilizado se procesan los resultados encontrados para determinar las variaciones de las acciones destacadas en función del tiempo.

Al juntar los desplazamientos máximos y los cortantes de piso se obtienen los ciclos de carga a los cuales está sometida la edificación durante la ocurrencia del evento sísmico. Para apreciar de mejor forma este resultado se determinar la envolvente de los

anteriores ciclos de carga la cual configura la curva de capacidad de la edificación para cada evento analizado.

4.2.3 Evaluación del desempeño

En la etapa de evaluación de desempeño a partir de los resultados de los análisis anteriores se hace una estimación del comportamiento de las estructuras ante los escenarios sísmicos planteados, definiendo entre otros los siguientes parámetros:

- Comparación respecto al punto de desempeño.
- Estado de plastificación y niveles de desempeño.
- Energía disipada por amortiguación

4.2.3.1 Punto de desempeño

El punto de desempeño se define como el estado donde la capacidad de la estructura se cruza con la demanda que genera el sismo de diseño. No obstante, las curvas de capacidad de la estructura están en términos de cortante en la base y desplazamiento o deriva de piso, mientras que la curva de demanda se encuentra en términos de aceleración y desplazamiento espectral para un amortiguamiento del 5% del crítico. Para entrecruzar ambas curvas es necesario convertir la curva de capacidad a formato de aceleración y desplazamiento espectral, denominado sistema ADRS (*Acceleration-Displacement Response Spectrum*), además de adaptar la curva de demanda al amortiguamiento efectivo de cada estructura.

En la primera etapa se utilizan las siguientes expresiones:

$$S_a = \frac{V}{W_1} \quad (4.51)$$

$$S_d = \frac{D_{1D}}{\tau_1} \quad (4.52)$$

En donde las variables corresponden a:

- S_a : Aceleración espectral en la curva de capacidad

- S_d : Desplazamiento espectral en la curva de capacidad
- $\overline{W}_1$: Peso efectivo del modo fundamental definido en la ecuación 4.9
- τ_1 : Factor de participación del modo fundamental definido en la ecuación 4.10
- V : Cortante en la base
- D_{1D} : Desplazamiento de techo en el centro de masa

Por otra parte los valores de aceleración y desplazamiento espectral de la curva de demanda para el amortiguamiento efectivo es suficiente dividir la curva de demanda original entre el coeficiente de amortiguamiento determinado a partir de la tabla 4.1:

$$S_a = \frac{S_{a-5\%}}{B_D} \quad (4.53)$$

$$S_d = \frac{S_{d-5\%}}{B_D} \quad (4.54)$$

En donde:

- S_a : Aceleración espectral en la curva de demanda
- S_d : Desplazamiento espectral en la curva de demanda
- $S_{a-5\%}$: Aceleración espectral para un 5% del amortiguamiento crítico en la curva de demanda
- $S_{d-5\%}$: Desplazamiento espectral para un 5% del amortiguamiento crítico en la curva de demanda
- B_D : Coeficiente de amortiguamiento efectivo para el modo principal en la dirección de interés.

El anterior proceso hay que realizarlo para las tres edificaciones diseñadas, y en las dos direcciones de análisis principal, para posteriormente cruzar las curvas de demanda y capacidad en los mismos términos y con ello determinar el punto de desempeño en la intercepción de estas.

4.2.3.2 Estado de plastificación y niveles de desempeño

Análogamente a lo mencionado en la sección 4.1.1.6 para el análisis *push over*, de los análisis no lineales dinámicos cronológicos desarrollados para cada escenario sísmico se considera el estado de plastificación en los elementos. De particular interés son el estado en el pico máximo de aceleración de cada evento sísmico, así como el estado final de la estructura tras el último paso del acelerograma.

Nuevamente la escala de color asociadas a los niveles de desempeño estructural son un indicador del nivel de daño de la estructura cuando ocurra alguno de los eventos sísmicos seleccionados, los cuales como se mencionó anteriormente se puede representar mediante los ciclos de carga y descarga asociados a los desplazamientos. En la siguiente imagen se puede observar un ejemplo de lo descrito en la presente sección.

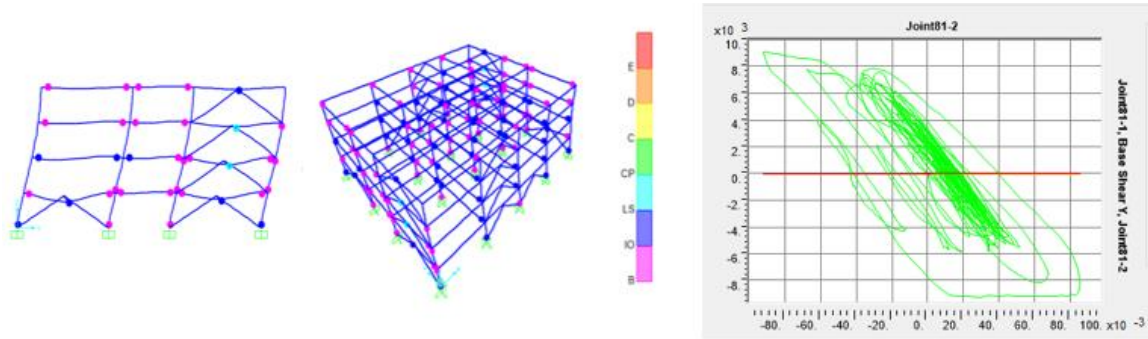


Figura 4-16 Estado de plastificación en un análisis cronológico inelástico (izquierda) y ciclos de carga y descarga (derecha)

4.2.3.3 Energía disipada por amortiguación

La ecuación dinámica para las respuestas estructurales 2-2 también se puede expresar en términos de energía haciendo la integración en el tiempo con los límites en los instantes iniciales y finales del evento sísmico. Al hacer este procedimiento la ecuación 2-2 se puede expresar de la siguiente forma:

$$W_C + W_D + W_P = E \quad (4.55)$$

Donde los términos corresponden en orden de izquierda a derecha a la energía cinética, a la energía disipada por amortiguación, a la energía potencial y la energía de entrada.

W_c : Energía cinética.

W_D : Energía disipada por amortiguación.

W_p : Energía potencial.

E : Energía de entrada.

Estos términos a su vez están asociados a las fuerzas inerciales, fuerzas de amortiguación, fuerzas de rigidez y la fuerza externa del sismo respectivamente. Todos estos términos se pueden extraer como resultado de los análisis cronológicos en SAP2000, en particular una gráfica conjunta entre los parámetros de energía tendría la siguiente proporción:

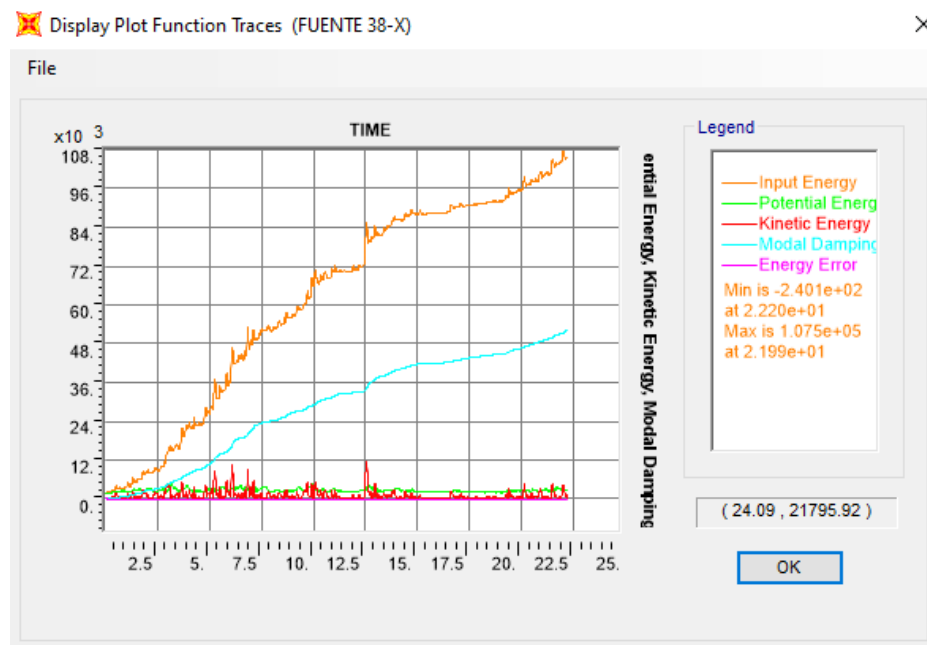


Figura 4-17 Parámetros de energía para un análisis cronológico en SAP2000

Cabe señalar que en los términos la energía potencial y cinética, además de la energía de entrada, en su justa proporción según los parámetros de masa y rigidez, no se esperan mayores diferencia en los resultados para las tres edificaciones diseñadas. En el parámetro que se esperaría una diferencia, considerando claramente que las edificaciones con TADAS y BRB tienen un sistema específico adicional para la disipación, es en la energía disipada por amortiguamiento. De esta forma, como parámetro adicional de evaluación de desempeño se utiliza la energía disipada por amortiguación,

porque un aumento considerable en este parámetro haría que el balance de energía sea más beneficioso para la estructura.

CAPÍTULO V

5 Configuración de las estructuras y su ubicación

En el presente capítulo se define la configuración de la edificaciones diseñadas y los materiales utilizados. Adicionalmente, de acuerdo con la ubicación definida para las edificaciones, se hará el proceso de seleccionar las fuentes sísmicas influyentes de la zona para la generación de los eventos sísmicos del análisis.

5.1 Definición de características geométricas (altura y planta)

Según lo mencionado en la introducción uno de los propósitos de esta investigación es analizar el efecto del diseño con disipadores en edificaciones irregulares, considerando que estas estructuras presentan normalmente un reto mayor a la hora de dimensionar sus elementos por la susceptibilidad a la torsión. Sin embargo, la metodología propuesta por el ASCE-7-16 para edificaciones con disipadores castiga fuertemente a las edificaciones que tengan una irregularidad extrema, ya sea en altura o planta, señalando que el prediseño de la estructura principal se debe realizar para un 100% de las fuerzas sísmicas.

Por lo anterior, para aplicar la metodología propuesta la geometría de la edificación se seleccionó teniendo presente que solo tuviera irregularidad normal en planta del tipo 1aP (NSR-10-título). La geometría propuesta para la edificación en planta se aprecia en la figura 5-1.

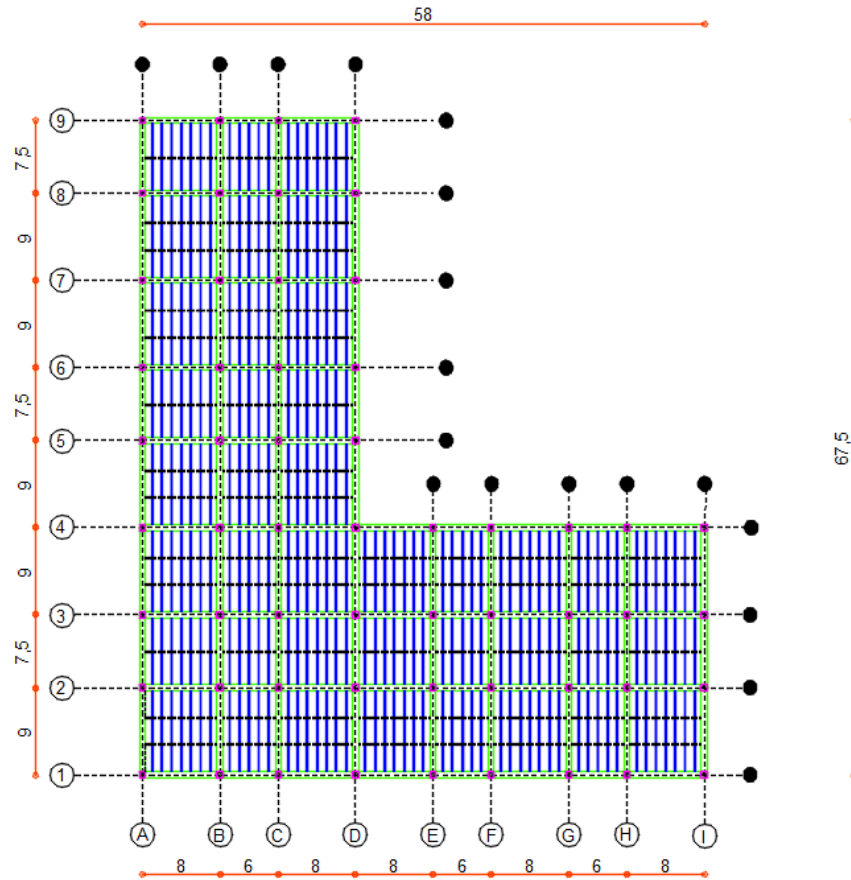


Figura 5-1 Geometría en planta propuesta para las edificaciones (Medidas en metros)

Para la configuración en altura se decidió una altura típica de tres metros en todos los niveles de las edificaciones diseñadas. Las secciones de los elementos de las columnas mantienen constantes en toda la altura, para no generar irregularidades del tipo 1bA o 1aA definidas en la NSR-10.

5.2 Selección de ubicación y características del suelo

Para la ubicación se requería un lugar con clasificación de amenaza sísmica alta según la tabla A.2.3-2 de la NSR-10. Se escogió un lugar intermedio respecto a los valores de los parámetros A_v y A_d , teniendo en cuenta que las ciudades con los valores más altos pueden causar que los requisitos descritos en 4.1.1.3 para realizar el análisis mediante el método de análisis modal espectral no se cumplan. Por tal motivo se seleccionó la ciudad de Popayán como lugar de ubicación para las edificaciones diseñadas.