



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL – ESTRUCTURAS

DISTORSIÓN LIMITE Y EVOLUCIÓN DE DAÑO PARA MARCOS CON
CONTRAVIENTOS CONCÉNTRICOS

T E S I S
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

P R E S E N T A
LUIS CAUDILLO MURILLO

TUTOR PRINCIPAL
DR. EDGAR TAPIA HERNÁNDEZ
UAM-AZCAPOTZALCO

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX, AGOSTO DE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

RESUMEN

En esta investigación se discute el estado del arte, el diseño y análisis de modelos de 6 niveles, con un sistema dual de marcos de acero con contravientos concéntricos, en dos configuraciones V invertida y X, utilizando perfiles I, OR y ángulo L como contravientos. Este estudio pretende evaluar el comportamiento del sistema utilizando los diferentes tipos de perfil.

Se diseñaron los marcos considerando una estructura en tres dimensiones, se realizó el análisis estructural y posterior diseño considerando la filosofía de diseño por capacidad. Para estructuras de 6 niveles con un sistema de contravientos en V invertida y en X, para cada uno de los perfiles estudiados.

Además, se realizaron análisis no lineales en el *software OpenSees*, se seleccionaron 40 de 130 registros que fueron obtenidos en distintos puntos de la Ciudad de México a causa del sismo del 19 de septiembre de 2017. Las señales seleccionadas fueron escaladas al periodo del modelo $T_1 = 0.85$ s.

Los resultados de los análisis no lineales se analizaron por medio un análisis estadístico, utilizando graficas con una distribución log normal y densidad de probabilidad.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la respuesta inelástica de marcos con contravientos concéntricos en configuración V invertida y X, en función de la sección transversal del contraviento (IR, OR y ángulo L) para evaluar la distorsión límite de Seguridad de Vida de las NTC-DS-2023 y analizar la evolución del daño.

OBJETIVOS PARTICULARES

- Analizar los resultados de estudios analíticos y experimentales, donde la sección transversal del contraviento sea un parámetro del estudio para evaluar la respuesta inelástica.
- Diseñar edificios de 6 pisos con contravientos con sección IR, OR y ángulo L, en dos configuraciones cada uno: V invertida y X.
- Analizar la respuesta inelástica de marcos con contravientos concéntricos en *OpenSees* ante análisis dinámicos y estáticos.
- Comparar mediante un estudio estadístico la respuesta en función de la sección transversal de los contravientos.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS	VI
--------------------------------	-----------

ÍNDICE DE TABLAS	X
-------------------------------	----------

CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE..... 1

1.1 Introducción.....	2
1.2 Antecedentes.....	2
1.3 Pruebas Experimentales.....	3
1.3.1 Lignos y Karamanci (2013).....	3
1.3.2. Tapia y López (2022).....	6
1.3.3. Tan <i>et al.</i> (2022).....	7
1.3.4 Yoo <i>et al.</i> (2008).....	9
1.3.5 Tapia y Martínez (2017).....	10
1.3.6 De la Macorra y Tapia (2018).....	10
1.3.7 Naderpour y Aghakouchak. (2018).....	11
1.3.8 Onur Seker (2021).....	12
1.3.9 Fell <i>et al.</i> (2006).....	13
1.4. Normativa.....	15
1.4.1 NTC-DCEA-2023 (2023).....	15
1.4.2 NTC-DS-2023 (2023).....	16
1.4.3 AISC 341-16 (2016).....	17

CAPÍTULO 2. ANÁLISIS Y DISEÑO DE LOS MARCOS 20

2.1 Descripción.....	21
2.2 Análisis estructural.....	23
2.2.1 Materiales.....	23
2.2.2 Análisis de cargas.....	23
2.2.3 Espectro de Diseño.....	24
2.2.4 Análisis Modal Espectral.....	25
2.3 Diseño de los elementos estructurales Modelo 6 niveles.....	25
2.3.1 Contraviento sección OR.....	26
2.3.2 Contraviento sección I.....	29
2.3.3 Contraviento sección ángulo.....	32

2.3.4 Trabe Principal.....	35
2.3.5 Trabe secundaria.....	41
2.3.6 Diseño de columna.....	44
2.3.7 Resultados del análisis.....	48
2.3.8 Resumen de resultados.....	49
2.4 Conclusiones.....	53

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS NO LINEAL..... 55

3.1 Descripción.....	56
3.2. Selección de las señales.....	56
3.2.1 Señales Modelo 6 Niveles.....	59
3.3 Modelo <i>OpenSees</i>	62
3.3.1 Introducción.....	62
3.3.2. Descripción.....	62
3.4 Validación del modelo.....	75
3.4.1 Perfil IR 203 mm x 71.5 kg/m.....	77
3.4.2 Perfil IR 203 mm x 59.6 kg/m.....	78
3.4.3 Perfil OR 178 mm x 15.9mm.....	79
3.4.4 Perfil OR 178 mm x 12.7mm.....	81
3.4.5 Perfil L 203 mm x 25.4mm.....	82
3.4.6 Perfil L 203 mm x 22mm.....	83
3.4.7 Carga post-pandeo.....	85
3.4.8 Pandeo prematuro.....	85
3.5 Conclusiones.....	86

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS 88

4.1 Introducción.....	89
4.2 Influencia del entrepiso con pandeo global prematuro con el error del 10%.....	91
4.2.1 Resultados de contravientos con sección I para cada piso (2, 4 y 6).....	91
4.2.2 Resultados de contravientos con sección OR para cada piso (2, 4 y 6).....	93
4.2.3 Resultados de contravientos con sección ángulo para cada piso (2, 4 y 6).....	95
4.3 Influencia de la configuración de los contravientos con el error del 10%.....	96
4.3.1 Sección I.....	98
4.3.2 Sección OR.....	99
4.3.3 Sección ángulo.....	100

4.4 Influencia del tipo de sección de los contravientos con el error del 10%	101
4.4.1 Pandeo prematuro en piso 2.....	101
4.4.2 Pandeo prematuro en piso 4.....	102
4.4.3 Pandeo prematuro en piso 6.....	103
4.5 Comparación entre secciones y configuración de contravientos con el error del 10%.104	
4.6 Comparación entre sección de contravientos con el error del 10%	105
4.7 Conclusiones.....	106

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES 109

5.1 Justificación de la investigación.....	110
5.2 Contenido de la tesis capitulo por capitulo.....	110
5.3 Principales contribuciones.....	112
5.4 Investigaciones futuras	112

CAPITULO 6.- REFERENCIAS 115

APÉNDICE A. ANÁLISIS DE RESULTADOS 120

A.1 Introducción.....	121
A.2 Influencia del entrepiso con pandeo global prematuro con el error del 0%	122
A.2.1 Resultados de contravientos con sección I para cada piso (2, 4 y 6).....	122
A.1.2 Resultados de contravientos con sección OR para cada piso (2, 4 y 6).....	124
A.2.3 Resultados de contravientos con sección ángulo para cada piso (2, 4 y 6).....	126
A.3 Influencia de la configuración de los contravientos con el error del 0%.....	127
A.3.1 Sección I.....	129
A.3.2 Sección OR	130
A.2.3 Sección ángulo	132
A.4 Influencia del tipo de sección de los contravientos con el error del 0%	133
A.4.1 Pandeo prematuro en piso 2.....	133
A.4.2 Pandeo prematuro en piso 4.....	134
A.4.3 Pandeo prematuro en piso 6.....	135
A.5 Comparación entre secciones y configuración de contravientos con el error del 10%.	135

A.6 Comparación entre sección de contravientos con el error del 10%	137
A.7 Conclusiones.....	138

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Definición del estado de daño de los contravientos (adaptada de Lignos y Karamanci 2013).....	4
Figura 1.2. Elevación lateral de los modelos de la investigación (Tapia y López 2022).	6
Figura 1.3. Resumen de resultados de los análisis realizados en la investigación (Tapia y López 2022).....	7
Figura 1.4. Geometría de los modelos con y sin contraventeo.....	8
Figura 1.5. Comparación de cargas-desplazamiento entre los modelos de elemento finito en línea roja y las pruebas experimentales en línea negra.....	8
Figura 1.6. Curva de carga desplazamiento para diferentes configuraciones de contravientos.	9
Figura 1.7. Distribución de demandas por carga axial del contraviento en la conexión.	10
Figura 1.8. Plano de construcción (Izquierda) y elevación representativa de los contravientos (Derecha). SCBF: Contraviento concéntrico especial. SMF: Marcos especiales resistentes a momento.	12
Figura 2.1. Geometría del proyecto.....	21
Figura 2.2. Perfil del modelo de contravientos concéntricos en configuración V invertido.....	22
Figura 2.3. Perfil del modelo de contravientos concéntricos en configuración X.....	22
Figura 2.4. Captura de pantalla del espectro de diseño obtenido de SASID.....	24
Figura 2.5. Captura de pantalla de los elementos mecánicos de la trabe principal.	36
Figura 2.6. Esquema para calcular momentos en sección compuesta (De Buen, 1980).	44
Figura 2.7. Elementos estructurales para el modelo de 6 niveles.....	52
Figura 3.1. Registro de la señal AE02NS, en orden superior a inferior, aceleración, velocidad y desplazamiento.	56
Figura 3.2. Espectros para la señal AE02NS, en orden superior a inferior, aceleración, velocidad y desplazamiento.....	56
Figura 3.3. En color rojo el espectro elástico sin reducir del lugar de estudio, en color azul con línea punteada $T_I=0.85s$ del modelo de 6 niveles.	57

Figura 3.4. Se complementa la gráfica con el espectro de aceleración de la señal AE02NS.	57
Figura 3.5. En color negro la señal AE02NS sin factor y en color azul la misma señal multiplicada por el factor de 2.08.	58
Figura 3.6. Espectro elástico sin reducir, $T_I = 0.85$ s y 40 señales sin factor para el modelo de 6 niveles.	59
Figura 3.7. Señales escaladas y ajustadas para $T_I = 0.85$ s	60
Figura 3.8. Numeración y ubicación de los nodos, para el modelo de 6 niveles y configuración en V invertida.	63
Figura 3.9. Numeración y ubicación de nodos de zonas rígidas en columnas.	65
Figura 3.10. Numeración y ubicación de nodos de zonas rígidas en columnas y nodos en los contravientos en configuración V invertida.	67
Figura 3.11. Numeración y ubicación de nodos de zonas rígidas en columnas y nodos en los contravientos en configuración X.	68
Figura 3.12. Grafica de histéresis para el perfil IR 203 mm x 71.5 kg/m.	77
Figura 3.13. Grafica de histéresis para el perfil IR 203 mm x 59.6 kg/m	78
Figura 3.14. Grafica de histéresis para el perfil OR 178 mm x 15.9mm.	80
Figura 3.15. Grafica de histéresis para el perfil OR 178 mm x 12.7mm.	81
Figura 3.16. Grafica de histéresis para el perfil L 203 mm x 25.4mm.	82
Figura 3.17. Grafica de histéresis para el perfil L 203 mm x 22mm.	84
Figura 3.18. Graficas de histéresis para el perfil IR 203 mm x 71.5 kg/m con y sin pandeo prematuro.	86
Figura 4.1. Comparación de resultados con una distribución log-normal.	90
Figura 4.2. Comparación de resultados en configuración V invertida sección IR.	91
Figura 4.3. Comparación de resultados en configuración X sección IR.	92
Figura 4.4. Comparación de resultados en configuración V invertida sección OR.	93
Figura 4.5. Comparación de resultados en configuración X sección OR.	94

Figura 4.6. Comparación de resultados en configuración V invertida sección L.....	95
Figura 4.7. Comparación de resultados en configuración X sección L.....	95
Figura 4.8. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección IR.	98
Figura 4.9. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección OR.	99
Figura 4.10. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección L.	100
Figura 4.11. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 2.	101
Figura 4.12. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 4.	102
Figura 4.13. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 6.	103
Figura 4.14. Comparación de resultados, para todos los perfiles en configuración X y V invertida.	104
Figura 4.15. Comparación de resultados, para todos los perfiles en configuración X y V invertida.	105
Figura A.1. Comparación de resultados en configuración V invertida sección IR.	123
Figura A.2. Comparación de resultados en configuración X sección IR.	123
Figura A.3. Comparación de resultados en configuración V invertida sección OR.....	125
Figura A.4. Comparación de resultados en configuración X sección OR.....	125
Figura A.5. Comparación de resultados en configuración V invertida sección L.....	126
Figura A.6. Comparación de resultados en configuración X sección L.....	127
Figura A.7. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección IR.	130
Figura A.8. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección OR.....	131
Figura A.9. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección L.....	132
Figura A.10. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 2.	133
Figura A.11. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 4.	134
Figura A.12. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 6.	135
Figura A.13. Comparación de resultados, para todos los perfiles en configuración X y V invertida.	136

Figura A.14. Comparación de resultados, para todos los perfiles en configuración X y V invertida..... 137

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Factores de comportamiento sísmico y distorsiones límite para estructuras de acero y compuestas (NTC-DS-2023).	2
Tabla 1.2. Parámetros estadísticos para curvas de fragilidad en función de la distorsión de piso Lignos y Karamanci (2013).	5
Tabla 1.3. Parámetros estadísticos para curvas de fragilidad en función del tipo de material. Lignos y Karamanci (2013).	5
Tabla 1.4. Secciones de contravientos y variables de carga (Fell <i>et al.</i> 2006).	14
Tabla 1.5. Resultados de pruebas experimentales Fell <i>et al.</i> (2006)	14
Tabla 1.6 Factores de comportamiento sísmico y distorsiones límite para estructuras de acero y compuestas (NTC-DS-2023).	16
Tabla 2.1. Esfuerzos F_y y F_u de aceros estructurales.	23
Tabla 2.2. Análisis de cargas	23
Tabla 2.3. Matriz de combinaciones para el análisis modal espectral.	25
Tabla 2.4. Análisis de distorsiones por nivel.	49
Tabla 2.5. Modelo 6 Niveles V invertida	50
Tabla 2.6. Modelo 6 Niveles en X.	50
Tabla 2.7. Comparación entre configuración V invertida y X, contraviento OR.	50
Tabla 2.8. Comparación entre configuración V invertida y X, contraviento perfil I	51
Tabla 2.9. Comparación entre configuración V invertida y X, contraviento perfil ángulo. ..	51
Tabla 3.1. Acelerogramas seleccionados para los modelos de 6 niveles.	60
Tabla 3.3. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento IR 203 mm x 71.5 kg/m. .	77
Tabla 3.4. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento IR 203 mm x 59.6 kg/m. .	78
Tabla 3.5. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento OR 178 mm x 15.9mm.	80
Tabla 3.6. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento OR 178 mm x 12.7 mm.	81
Tabla 3.7. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento L 203 mm x 25.4mm.	83

Tabla 3.8. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento L 203 mm x 22mm.....	84
Tabla 3.9. Resumen de resultados para los contravientos en función de la relación de esbeltez.	85
Tabla 4.1. Secciones de contravientos y variables de carga (Fell <i>et al.</i> 2006).....	96
Tabla 4.2. Resultados de pruebas experimentales Fell <i>et al.</i> (2006)	97
Tabla 4.3. Promedio de distorsiones de entrepiso (adaptada de Lignos y Karamanci 2013)	106
Tabla A.1. Secciones de contravientos y variables de carga (Fell <i>et al.</i> 2006).....	128
Tabla A.2. Resultados de pruebas experimentales Fell <i>et al.</i> (2006)	128
Tabla A.3. Promedio de distorsiones de entrepiso (adaptada de Lignos y Karamanci 2013)	138

Capítulo 1. Estado del Arte

RESUMEN

En el este capítulo se estudia el estado del arte de los edificios estructurados con marcos con contravientos concéntricos. En esta sección se incluyeron las pruebas experimentales y las normativas vigentes, ambas enfocadas en la información relacionada con los contravientos concéntricos. Una de las principales pruebas experimentales fue la realizada en Lignos y Karamanci (2013) donde se concluye que, el estado de falla de un contraviento concéntrico está en función del tipo de sección del perfil. Es necesario resaltar que en este estudio los perfiles utilizados en las pruebas no cumplían en su mayoría con los límites ancho/grueso para calificarlos como una sección dúctil.

En Fell *et al.* (2006) se realizan pruebas a perfiles IR y OR que cumplen con los límites de ancho/grueso para ser calificados como secciones dúctiles, en esta investigación se utilizaron perfiles IR y OR. La conclusión es similar a la encontrada en Lignos y Karamanci (2013); sin embargo, los límites en los estados de falla de los contravientos son distintos, ocasionado por las relaciones de ancho/grueso de los perfiles.

En la normativa vigente tenemos las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS-2023), donde se especifican los límites para el diseño de este sistema, pero sin especificar el tipo de sección. Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Acero (NTC-DCEA-2023) se menciona las especificaciones que debe de cumplir el sistema en función de la configuración y también en función del tipo de sección. Otros reglamentos especializados como el AISC 341-16 (2016) de Estados Unidos hace la distinción entre contravientos ordinarios y especiales, y se limita a prohibir el uso de contravientos con sección de ángulo para sistemas especiales.

Capítulo 1. Estado del Arte

1.1 Introducción

Las estructuras de acero se popularizaron en la segunda mitad del siglo XIX, en esta época se fueron mejorando sus propiedades mecánicas, una de las obras icónicas durante este siglo fue la *Torre Eiffel* Paris- Francia en 1889. En la primera mitad del siglo XX en Estados Unidos la construcción con acero estructural tuvo un gran auge, ejemplo de esto son los rascacielos *Chrysler* en 1930 y el *Empire State Building*-Nueva York, EE. UU en 1931 (Tauranac, 1995).

Los fenómenos naturales han obligado a estudiar e investigar el comportamiento de las estructuras de acero, en especial, el comportamiento de estas frente a los sismos. De tal manera que a través de los años se han ido actualizando los códigos de diseño, con el fin de garantizar un correcto comportamiento de las estructuras.

Las estructuras con contraviento concéntrico son consideraras como sistemas duales, marcos de concreto y contraviento. El objetivo de este sistema es aportar rigidez lateral a los marcos para controlar los desplazamientos (Tapia y Guerrero 2021).

A nivel mundial los sismos de Estados Unidos (Northridge) 1994 y Japón (Kobe) 1995, además de extensas investigaciones experimentales han demostrado que el comportamiento de los contravientos concéntricos, dependen de las dimensiones y sección de los perfiles (Lignos y Karamanci, 2013).

1.2 Antecedentes

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS-2023) puntualmente en la tabla 4.3.2. se hace una distinción entre contravientos concéntricos de ductilidad alta y baja, lo cual depende de las relaciones de esbeltez de las placas que conforman el perfil tal como se estipula en la tabla 16.1.2 de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero (NTC-DCEA-2023).

Tabla 1.1 Factores de comportamiento sísmico y distorsiones límite para estructuras de acero y compuestas (NTC-DS-2023).

Estructuración	Ductilidad	Condición	Q	γ_{sv}	γ_{OI}
ii) Sistema dual ^{[a], [b]} formado por marcos de acero y contravientos de acero ^{[2], [3], [4]}	Media	Contravientos concéntricos de ductilidad alta ^[6]	3.0	0.015	0.0050
	Baja	Contravientos concéntricos de ductilidad media ^[7]	2.0	0.010	0.0050

^[2] Los marcos en estos sistemas duales deberán ser capaces de resistir en cada entrepiso, sin contar con la contribución de los contravientos o muros, por lo menos 25 por ciento de la fuerza cortante actuante.

Los marcos deben ser detallados para obtener el mismo nivel de ductilidad que los muros o contraventeos.

- [3] Se debe garantizar en los sistemas duales con contraventeos que los contraventeos en tensión sean capaces de resistir en cada entrepiso entre 30 y 70 por ciento de la fuerza cortante actuante
- [4] En caso de que los sistemas estructurales utilicen muros, los valores de γ_{SV} y γ_{OI} podrán incrementarse en 0.005 cuando la relación de aspecto (cociente entre la altura y dimensión en planta) de todos los muros sea igual o mayor que 4. En caso de que se utilicen contraventeos metálicos, la relación de aspecto para considerar dicho incremento debe considerar la dimensión en planta de la crujía o crujías que hayan sido contraventeadas en forma consecutiva y de manera continua en altura. Este incremento es aplicable sólo cuando la rigidez lateral o la resistencia al corte de algún entrepiso no exceda en más del 20 por ciento la del entrepiso inmediatamente inferior, y que en el caso de muros se haga un diseño basado en capacidad que garantice un comportamiento plástico por flexión en su base.
- [7] Para edificaciones construidas antes de 2018, los valores de Q y γ_{SV} indicados en la tabla 4.3.2 para contraventeos concéntricos de ductilidad alta deben sustituirse por 2.0 y 0.008, respectivamente, y deberán seguirse los criterios establecidos en la NTC-Evaluación.
- [a] Se entiende por sistema dual aquel cuya resistencia a sismo queda aportada por el trabajo conjunto de marcos y muros o contravientos desde la base del sistema hasta al menos 75 por ciento de la altura de la estructura. Los diferentes componentes del sistema dual deben quedar interconectados por medio de diafragmas horizontales rígidos que cumplan con lo indicado en 2.8. La condición de diafragma rígido y la aportación del marco y muros o contravientos deben cumplirse en todos los entrepisos que incluyan muros o contravientos para clasificarse como sistema dual.
- [b] En el caso de que la resistencia a sismo quede aportada por el trabajo conjunto de tres o más tipos de elementos estructurales, tales como marcos, muros y contravientos, los marcos deberán ser capaces de resistir en cada entrepiso, sin contar con la contribución de los contravientos y muros, por lo menos 25 por ciento de la fuerza cortante. La condición de diafragma rígido y la aportación mínima de los marcos deben cumplirse en todos los entrepisos que conforman la estructura.

Tomando como referencia la tabla 1.1. el límite de distorsión es de 0.015. Sin embargo, gracias a estudios experimentales de autores tales como Lignos y Karamanci (2013) se ha visto que la falla del contraviento ocurre con distorsiones menores a 0.015. De esta manera, se puede identificar que el límite que establecen las normas vigentes podría ser mayor al esperado lo que significa que, si el contraventeo falla antes de este límite existe posibilidad de que se genere una falla en el sistema por piso débil (Tapia y López 2022).

1.3 Pruebas Experimentales

1.3.1 Lignos y Karamanci (2013)

En Lignos y Karamanci (2013) se analiza el resultado de 24 investigaciones diferentes.

En este artículo se estudia el desempeño de los contravientos, dejando de lado las placas de las conexiones. También se menciona que la falla de estos elementos es gobernada por los esfuerzos de compresión.

Se han analizado y descrito 3 etapas en la falla del contraviento: i) Pandeo Global (DSI): es el primer estado de falla que se presenta. Es así, que se identifica que el perfil sale del plano;

generalmente este desplazamiento no es mayor que el ancho del perfil. La resistencia a fuerza axial del contraviento se ve disminuida. En la mayoría de los casos los esfuerzos son menores que los esfuerzos de compresión de fluencia del material.

ii)Pandeo Local (DS2): Este estado de daño corresponde a la formación de una articulación plástica al centro del claro cuando se somete a fuerzas de compresión. Según informes experimentales cuando ocurre el pandeo local se genera una pérdida de resistencia del 40%.

iii)Fractura (DS3): cuando ocurre la fractura se produce una pérdida considerable de la capacidad del contraviento, la fractura se da en la articulación plástica. Esta falla se genera por una carga cíclica en el punto de formación de la articulación.

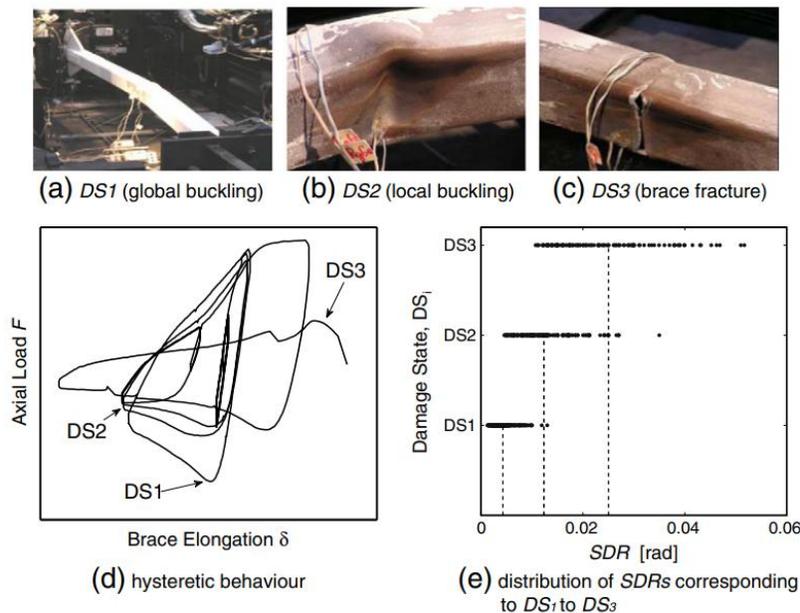


Figura 1.1 Definición del estado de daño de los contravientos (adaptada de Lignos y Karamanci 2013)

En el diagrama (d) de la figura 1.1 se muestra el comportamiento histerético del contraviento, con ello podemos deducir que en un inicio se tiene un comportamiento elástico, hasta que se llega al punto DS1 con el pandeo global. En este punto comienza la etapa inelástica, el contraviento resiste una mayor carga axial, pero pierde elasticidad; seguido de esto, viene una gran deformación y con ello pérdida de capacidad a compresión.

Al inicio del pandeo local DS2 con menores cargas axiales, se generan mayores deformaciones, el contraviento continúa disipando energía hasta que viene una gran deformación y finalmente la fractura.

En el diagrama (e) de la figura 1.1 se puede comprar el estado de daño en función de la distorsión del marco. De esta imagen podemos concluir que el pandeo local se genera en una distorsión menor que 0.015.

En este artículo se hacen estudios para 4 tipos secciones OC redondo, OR cuadrado o rectangular, IR y L o ángulo, se evalúa el comportamiento de estas secciones entre sí, el tipo de material, y las relaciones de esbeltez. Con lo anterior se trazan curvas de fragilidad para todos los casos, de esto se puede concluir lo siguiente en la tabla 2 y 3.

Tabla 1.2. Parámetros estadísticos para curvas de fragilidad en función de la distorsión de piso Lignos y Karamanci (2013).

Sección	Estado de daño		
	DS1	DS2	DS3
OR	0.40	1.02	1.60
OC	0.41	0.96	2.75
I	0.30	1.01	3.10
Ángulo L	0.27	0.70	1.43

Se aprecia que, teniendo en cuenta que el perfil L o ángulo es más susceptible a pandearse globalmente con magnitudes de distorsión menores a comparación con perfiles que tienden al pandeo lateral torsional.

En general, los perfiles OC y IR, tienden a fracturarse en distorsiones mayores en comparación con los perfiles HSS rectangulares o cuadrados.

Para las curvas de fragilidad en función del tipo de material ver la tabla 3. las magnitudes son muy variables, por ejemplo, para la sección OR las magnitudes de distorsión de acero A500 Gr. B, son menores que con acero Gr. C.

Tabla 1.3. Parámetros estadísticos para curvas de fragilidad en función del tipo de material. Lignos y Karamanci (2013)

Sección	Parámetro	Estado de daño		
		DS1	DS2	DS3
OR	A500 Gr. B ⁽¹⁾	0.39	0.93	1.52
	A500 Gr. C ⁽²⁾	0.42	0.72	1.72
OC	A500 Gr. B ⁽¹⁾	0.56	1.42	2.72
	A500 Gr. C ⁽²⁾	0.28	1.0	NA
I	A992 ⁽³⁾	0.27	1.23	2.79
	A36 ⁽⁴⁾	0.23	1.40	2.77

(1) A500 Gr.B 2,460 kg/cm² / 2,955 kg/cm². (2) A500 Gr. C 3,235 kg/cm² / 3,515 kg/cm².
 (3) A992 3,515 kg/cm². (4) A36 2,530 kg/cm²

Para la sección OC redonda pasa lo contrario las magnitudes de acero A500 Gr. B son mayores con respecto al Gr. C. Y para la sección IR, las magnitudes para los dos tipos de acero son variables en cada estado de daño.

La Influencia del radio de giro local y global en las curvas de fragilidad. Puede decirse que en promedio los contravientos de perfil de ángulo L se pandean globalmente a una distorsión

menor para una relación KL/r determinada a comparación con los otros perfiles mencionados. Esto se debe a que este perfil es susceptible al pandeo lateral torsional.

El efecto de KL/r en el pandeo global es un factor para destacar sin importar el tipo de sección, el perfil de acero para el contraventeo se pandeará por flexión para relaciones KL/r superiores a 100.

Los contravientos diseñados con KL/r elevados, tienden a tener una mayor vida útil a la fractura. Una magnitud elevada de KL/r generalmente guía a un retraso en las deformaciones locales en la sección transversal.

Para el perfil IR la vida de fractura de los contravientos de acero es mayor en comparación con los demás perfiles, sin embargo, las demandas por fatiga en las soldaduras pueden guiar a un desgarro y posterior falla con distorsiones menores.

En general se puede concluir que el estado de falla de un contraviento concéntrico está en función del tipo de sección del perfil.

1.3.2. Tapia y López (2022).

En Tapia y López (2022) se realizan modelos detallados en el Software *OpenSees*, para edificaciones de 6 y 10 pisos estructurados con marcos con contravientos concéntricos de acero con una configuración en cruz lo cual se puede observar en la figura 2. En estos modelos se propusieron escenarios de contravientos con pandeo global inicial para evaluar la redistribución de las demandas y la tenencia a formar un piso débil.

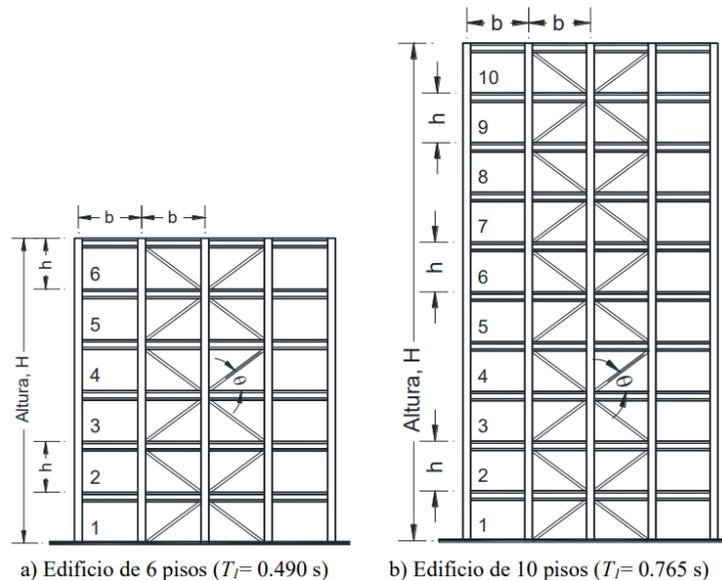


Figura 1.2. Elevación lateral de los modelos de la investigación (Tapia y López 2022).

En la siguiente figura se resumen los resultados para ambos modelos en términos de la probabilidad y la curva de fragilidad de aproximadamente 200 análisis, que se realizaron para

los modelos de 6 y 10 niveles. En las curvas se incluye la distorsión promedio reportada en Lignos y Karamanci (2013) para el escenario de daño de pando local 1.02% y fractura del contraviento 1.60%, se incluyó la magnitud de diseño de las NTC-2017 de 1.50% y la media de los resultados obtenidos igual a 1.11%.

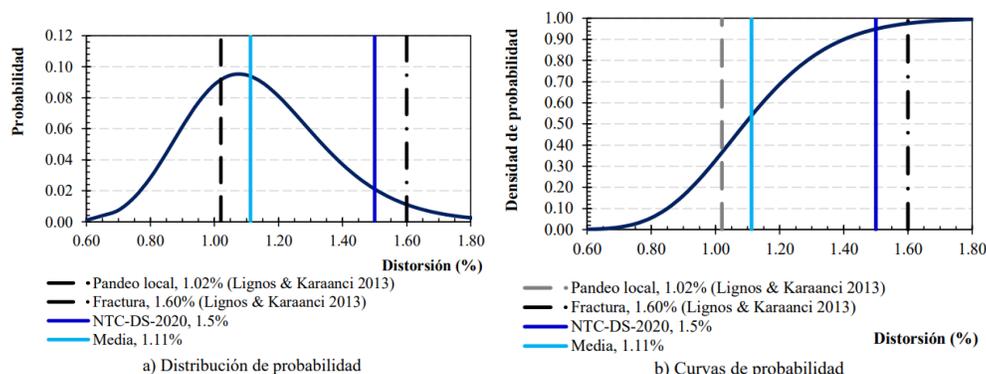


Figura 1.3. Resumen de resultados de los análisis realizados en la investigación (Tapia y López 2022).

Los resultados indican que la probabilidad de que un marco con contravientos concéntricos diseñados para una distorsión del 1.5% desarrolle una distorsión de entre piso de 1.5% o menor es del 94.8%. Aún en el caso que ocurra un pandeo global prematuro en los contravientos. Este escenario está relacionado a un 100% de probabilidad de que la redistribución de carga axial hacia las columnas está cubierta por las suposiciones de la filosofía del diseño por capacidad de las NTC-DCEM-2020. (Tapia y López 2022).

1.3.3. Tan *et al.* (2022)

En Tan *et al.* (2022) se emplearon modelos numéricos para explorar los parámetros clave que afectan el comportamiento a colapso de los marcos reforzados con contravientos. Se modelaron diversas configuraciones de contravientos y diversas relaciones de esbeltez para evaluar su comportamiento frente al colapso.

Se seleccionó el tipo de contraviento que se muestra en la figura 1.4 para realizar la prueba experimental que consistía en elaborar un modelo a escala, someterlo a pruebas físicas y compararlo con modelos de elemento finito FEM realizados en el Software ABAQUS se ejecutaron análisis dinámicos no lineales y se obtuvieron los siguientes resultados (ver figura 1.5).

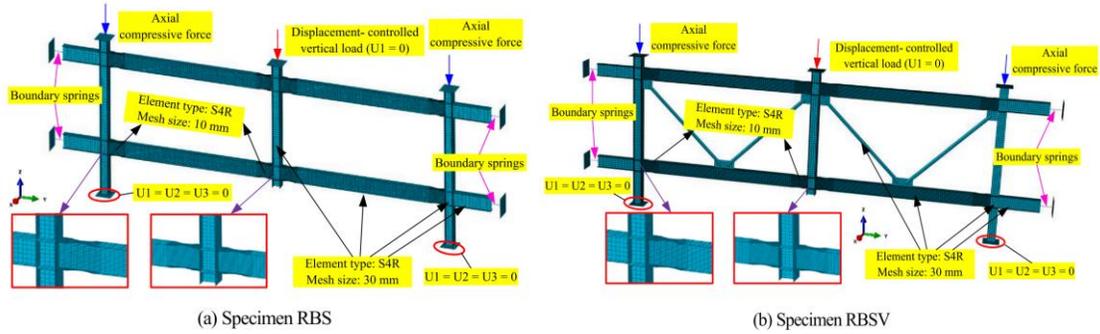


Figura 1.4. Geometría de los modelos con y sin contravento.

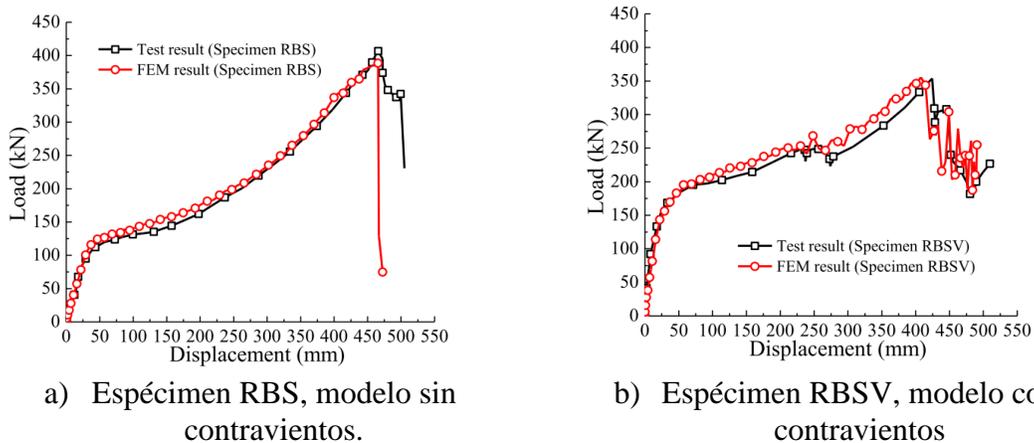


Figura 1.5. Comparación de cargas-desplazamiento entre los modelos de elemento finito en línea roja y las pruebas experimentales en línea negra.

Como se observa en la figura 1.5 la gráfica carga contra desplazamiento, el diagrama (a) corresponde a el modelo sin contraviento, prueba de modelo real línea color negro y Modelo de elemento finito en color rojo.

En la primera etapa se aprecia un comportamiento lineal hasta una carga aproximada de 125 KN y desplazamiento de 50 mm, posterior a esto comienza la etapa no lineal, la gráfica muestra un comportamiento exponencial, donde con poco incremento de carga el desplazamiento es considerablemente mayor. La comparación entre los dos resultados es similar, se llega a la fractura en el punto aproximado de 400 KN y 450mm.

Para la prueba con contravientos en la gráfica (b) el comportamiento lineal se mantiene hasta el punto aproximado de 175 KN y 30mm y el punto mayor Resistencia 350 KN y 375mm.

En estas graficas se puede concluir que cuando un marco tiene contravientos, aumenta el rango de comportamiento lineal, resiste mayor carga con menor desplazamiento que sin contraviento.

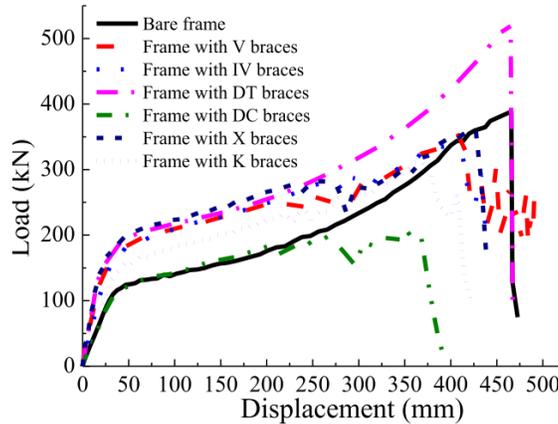


Figura 1.6. Curva de carga desplazamiento para diferentes configuraciones de contravientos.

En este artículo se evaluó el comportamiento de los contravientos frente al colapso, es decir, frente a la pérdida de una de las columnas. También, se realizaron modelos de elemento finito en el software ABAQUS, donde se probaron diferentes configuraciones de contravientos, en V, IV, DT, DC, X, K, y se comparó su comportamiento frente al colapso. En la figura 1.6 se observa el comportamiento de estos modelos para una gráfica de carga desplazamiento.

El comportamiento del contraviento DC es similar a el marco siempre, posterior a estos, el resto de las configuraciones muestran un comportamiento similar, mostrando diferencias en el rango inelástico en la etapa cercana a la ruptura. Podría concluirse que el estado de carga que se evalúa en el artículo el contraviento que muestra un mejor desempeño es el que tiene la configuración DT.

1.3.4 Yoo *et al.* (2008)

En Yoo *et al.* (2008) se analiza el comportamiento de un marco simple con un contraviento, se hace un estudio experimental, y se valida con un modelo matemático de elemento finito. El modelo fue utilizado evaluar el rendimiento inelástico del elemento estructural, determinar la ductilidad del marco y la concentración de deformaciones plásticas en el elemento estructural y la placa de conexión, así como la presencia de desgarres o fractura de miembros de soldadura.

Los resultados de esta investigación mostraron que placas de conexión gruesas aumentan el potencial de fractura del contraviento, pero en la mayoría de los casos reducen el potencial de agrietamiento de la soldadura. Placas de conexión gruesas combinadas con secciones de viga pesadas aumentan claramente el potencial de fractura del contraviento.

Los análisis y experimentos muestran que las placas de conexión compactas y flexibles mejoran el rendimiento sísmico del sistema, para contravientos de sección hueca OR. La placa de conexión debe de ser lo suficientemente fuerte para soportar las fuerzas requeridas, sin embargo, una rigidez más grande a la necesaria reducirá la ductilidad del sistema.

1.3.5 Tapia y Martínez (2017)

En este artículo se presenta un estudio de la variación de la carga axial en columnas de crujiás con contravientos bajo demandas sísmicas. En edificios regulares de 10, 14 y 18 pisos, la estructuración es con marcos momento resistentes dúctiles de acero con contravientos chevrón.

Durante un movimiento sísmico se genera una redistribución de cargas internas que debería coincidir con la condición de que rigió el diseño en la etapa inicial, esta redistribución de cargas depende de la respuesta del sistema de contravientos ver figura 1.7.

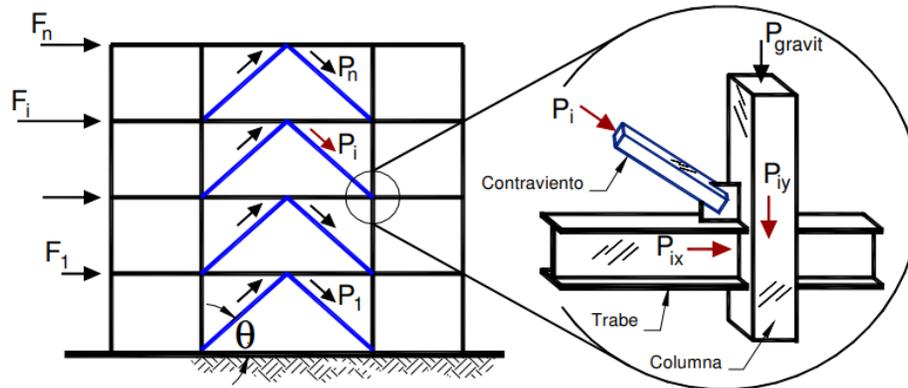


Figura 1.7. Distribución de demandas por carga axial del contraviento en la conexión.

Los modelos se realizaron en *OpenSees* con el material Steel02 desarrollado con el modelo Giuffre-Menegotto-Pinto, que incluye endurecimiento isotrópico por deformación. La longitud de los contravientos se subdividió en ocho elementos de sección transversal discretizada en fibras de longitud finita para modelos la variación de la deformación a lo largo de cada miembro.

Las principales aportaciones de esta investigación son que, la carga axial máxima que puede soportar una columna adyacente a una crujiá contraventeada durante un sismo intenso puede ser más de cinco veces la magnitud de la demanda gravitacional en los pisos inferiores.

1.3.6 De la Macorra y Tapia (2018)

Se discute la influencia del cortante lateral resistente que aporta el sistema de contravientos al sistema del marco (trabes y columnas) en la respuesta sísmica de marcos dúctiles de acero con contravientos concéntricos. Se varió la relación de esbeltez de los contravientos para estimar su influencia.

Se estudiaron modelos de 6 y 10 pisos, la altura de entrepiso se estableció en 4 metros y 4 crujiás en los extremos con un claro de 6 metros y los dos restantes en el centro de 4 metros, de tal manera que los contravientos queden a 45 grados, en el procedimiento de diseño se consideró estrictamente la filosofía de diseño por capacidad.

Las conclusiones de la investigación fueron que se identificó una relación entre la contribución del sistema de contravientos y la ductilidad que puede desarrollar el sistema. Esta observación es notoria cuando la relación de aspecto en los modelos es mayor a $H/B > 0.50$.

La incursión inelástica de los modelos está relacionada con una disminución de la ductilidad que pueden desarrollar los marcos. Esta disminución ocurre cuando la magnitud de la contribución de los contravientos es menor a 70%.

Cuando la relación de aspecto es menor a $H/B < 0.50$, se nota poca influencia entre la contribución al cortante lateral resistente del sistema de contravientos y la ductilidad que puede desarrollar el sistema.

La relación de esbeltez de los contravientos tiene poca influencia en la ductilidad que puede desarrollar el sistema.

Existe una relación entre la altura de los modelos y la ductilidad que pueden desarrollar; donde estructuras rígidas y cortas tienen incursiones inelásticas más estables.

1.3.7 Naderpour y Aghakouchak. (2018)

En este artículo se estudian contravientos concéntricos diagonales, compuestos por canales dobles cosidos punta a punta, bajo carga cíclica. Se adopta un enfoque probabilístico para evaluar la fractura del contraviento. Se realizaron modelos de elemento finito, y se consideraron medidas de daño probabilística con respecto a la fractura. Se diseñaron y analizaron 27 modelos con diferentes relaciones de esbeltez, diversas placas de refuerzo o conexión, y distancia entre los conectores para evaluar el comportamiento del sistema. Con los resultados obtenidos se desarrollaron curvas de fragilidad. Además, para incorporar los efectos de incertidumbre asociados con los elementos, se generaron y asignaron números aleatorios y se reevaluaron los modelos.

Los resultados muestran que la probabilidad de fractura de este tipo de riostra depende principalmente de la relación de esbeltez de toda la riostra, la probabilidad de fractura aumenta a medida que disminuye la relación de esbeltez.

Los contravientos con relaciones de esbeltez más bajas experimentan antes el pandeo local y con relaciones de esbeltez altas el pandeo global. Cuanto antes experimente el contraviento el pandeo local, mayor será la probabilidad de fractura de la riostra.

Se investigaron las principales incertidumbres en el contraviento, placas de conexión, soldaduras etc. Y se observó que, si bien estas deformaciones pueden afectar las deformaciones acumuladas en el contraviento, no contribuyen significativamente a la probabilidad de fractura del contraviento.

1.3.8 Onur Seker (2021)

Esta investigación tiene como objetivo analizar el comportamiento de los contravientos concéntricos especiales, junto con un sistema de marcos especiales resistentes a momento. El sistema dual antes mencionado es eficaz debido a su alta rigidez lateral y ductilidad, a pesar de los beneficios de este sistema, el efecto del contraviento en la respuesta sísmica diseñado siguiendo el diseño por capacidad de acuerdo con las Disposiciones sísmicas de AISC no se ha examinado a fondo hasta la fecha.

Se realizan modelos de contravientos concéntricos especiales de 4 y 10 pisos ver figura 8, con las configuraciones tipo chevron, *Split X*, V y *cross X*, diseñándolos de acuerdo con el ASCE 7 y AISC 341. Se realizaron análisis no lineales y se obtuvieron los resultados.

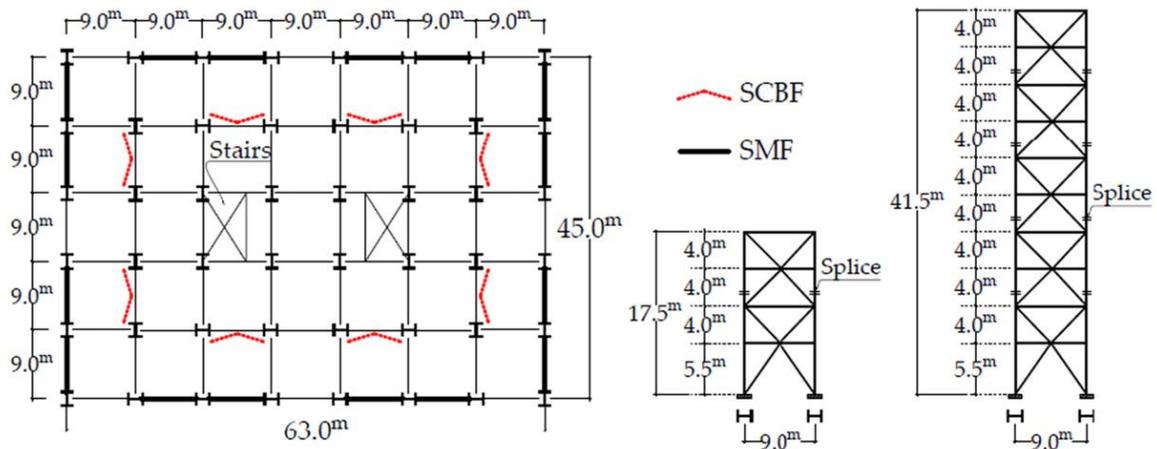


Figura 1.8. Plano de construcción (Izquierda) y elevación representativa de los contravientos (Derecha). SCBF: Contraviento concéntrico especial. SMF: Marcos especiales resistentes a momento.

Para garantizar la confiabilidad de los hallazgos, las suposiciones de los modelos numéricos se verifican utilizando las respuestas obtenidas en la mesa vibratoria. Después de la validación, ocho sistemas duales se someten primero a cargas estáticas que aumentan monótonamente, los resultados del análisis estático se evalúan a través de la rigidez y la resistencia lateral. las estructuras prototipo se sometieron a un conjunto de 44 movimientos de suelo.

Los resultados de la investigación muestran que los contravientos podrían tener un impacto significativo en la respuesta sísmica de los marcos en términos de todos los parámetros de demanda de la investigación. Este impacto se amplifica dependiendo de la altura de la estructura, y la respuesta de los miembros estructurales.

Las respuestas estáticas no líneas muestran que los contravientos podrían desempeñar un papel perjudicial en las rigideces laterales iniciales, la sobrerresistencia disponible en la estructura junto con la cantidad de cortante base resistido por los marcos.

Independientemente de la configuración de los contravientos, la media de las demandas máximas de distorsión para los 44 movimientos de suelo vario de 0.02 a 0.03 rad. En las estructuras duales de altura media y baja con configuración en V las distorsiones fueron 0.028 y 0.027 rad respectivamente. Las estructuras duales de 4 y 10 pisos con contraviento transversal en X tuvieron un mejor desempeño con una distorsión de 0.021 y 0.022 rad respectivamente.

Debido al diseño por capacidad adoptado para los contravientos concéntricos, la configuración de contravientos desempeña un papel importante en la respuesta del contraviento. Particularmente cuando las vigas son interceptadas por contravientos. Se encontró que el contraviento concéntrico dividido en X era propenso a fracturarse en comparación con las otras propuestas para edificaciones de poca altura.

1.3.9 Fell *et al.* (2006)

En esta investigación se presentan los hallazgos experimentales y las implicaciones de diseño de diecinueve pruebas de contravientos concéntricos de acero. Se utilizaron secciones huecas rectangulares (OR), sección redonda y sección I, con diferentes relaciones de ancho-espesor y relaciones de esbeltez sujetas a varios historiales de carga.

Para abordar el rendimiento dúctil de los sistemas de contravientos concéntricos frente a movimientos ocasionados por eventos sísmicos, el informe se centra en el rendimiento experimental de los miembros a gran escala, que se probaron como parte de un proyecto de investigación y simulación de ingeniería de terremotos (*Network for Earthquake Engineering Simulation and Research, NEESR*). El objetivo de las pruebas era proporcionar información sobre el rendimiento de los elementos y conexiones, así como validar nuevas técnicas de modelado de fractura y fatiga en componentes de acero a gran escala.

Dentro de los perfiles seleccionados las dos secciones OR proporcionan una evaluación directa de la influencia de las relaciones ancho-espesor en el desempeño de la riostra, la sección I permite evaluar los efectos de la esbeltez combinados con las propiedades de la sección. Las relaciones ancho-grueso de la sección OR, se encuentran dentro de los límites del AISC para los *Special concentrically braced frames* (SCBF), para el perfil I apenas se supera el límite AISC.

En la siguiente tabla se resumen los perfiles utilizados, el tipo de pruebas y las propiedades geométricas de las secciones.

Tabla 1.4. Secciones de contravientos y variables de carga (Fell *et al.* 2006).

Test #	Sección	Historia de Carga	Intervalo de carga	Relación ancho-grueso	$\frac{KL_B}{r}$ $K = 1.0$
1	OR 114 mm x 6.4 mm	Sismo lejano	Lento	14.20	77
2	OR 114 mm x 6.4 mm	Sismo cercano	Lento	14.20	77
3	OR 114 mm x 6.4 mm	Sismo lejano	Rápido	14.20	77
4	OR 114 mm x 9.5 mm	Sismo lejano	Lento	8.46	83
5	OR 114 mm x 9.5 mm	Sismo lejano	Rápido	8.46	83
6	IR 305 mm x 23.9 kg/m	Sismo lejano	Lento	14.20	155
7	IR 305 mm x 23.9 kg/m	Sismo cercano	Lento	14.20	155
8	IR 305 mm x 23.9 kg/m	Sismo lejano	Lento	14.20	155

Los historiales de carga (*Near-Field*) refleja las demandas impuestas por los movimientos del suelo cercanos a la falla, (*Far-Field*) historial de carga lejano o general se basa en la historia de tiempo no lineal.

En la tabla 1.5. se resumen los resultados de las pruebas experimentales para las secciones de nuestro interés. Los términos F-F y N-F hacen referencia a *Far-Fiel* y *Near-Field* respectivamente

Tabla 1.5. Resultados de pruebas experimentales Fell *et al.* (2006)

Test #	Sección	Historia de carga	Pandeo global Distorsión (%)	Pandeo local Distorsión (%)	Inicio de fractura Distorsión (%)	Perdida de fuerza Distorsión (%)
1	OR 114 mm x 6.4 mm	F-F	0.30	1.85	2.68	2.68
2	OR 114 mm x 6.4 mm	N-F	1.00	2.50	6.00	6.00
3	OR 114 mm x 6.4 mm	F-F	0.34	2.10	2.10	2.10
4	OR 114 mm x 9.5 mm	F-F	0.29	5.00	5.00	5.00
5	OR 114 mm x 9.5 mm	F-F	0.33	4.30	4.30	4.30
6	IR 305 mm x 23.9 kg/m	N-F	1.30	6.00	6.00	6.00
7	IR 305 mm x 23.9 kg/m	F-F	0.16	5.00	5.00	N/A
8	IR 305 mm x 23.9 kg/m	N-F	7.20	8.00	8.00	8.00

Para el caso de estudio de esta investigación el historial de carga F-F se apega al utilizado en los modelos analíticos.

Se encontró que la fractura dúctil durante el pandeo cíclico inelástico es impulsada por la amplificación de la deformación debido al pandeo local de la sección transversal. La forma de la sección transversal, la relación ancho-grueso y la relación de esbeltez, son los factores más importantes que controlan la ductilidad del contraviento.

Se observa que los perfiles OC e IR son más resistentes a la fractura en comparación con miembros de perfil OR, y que desarrollan grandes deformaciones inducidas por pandeo local en las esquinas.

Los parámetros que tienen un efecto menos significativo en la respuesta de pandeo y fractura incluyen el relleno de concreto en la sección del perfil OR y las tasas de carga.

La ductilidad de desplazamientos relativamente baja de los miembros OR, sugiere la necesidad de reducir los requisitos de espesor de ancho de sección permisible para el diseño sísmico.

Se encuentra que la resistencia máxima del contraviento se encuentra entre la resistencia de fluencia esperada ($R_y F_y A_g$) y la resistencia última esperada ($R_t F_u A_g$) utilizando los valores nominales especificados en las tablas de diseño.

1.4. Normativa

1.4.1 NTC-DCEA-2023 (2023)

En el capítulo 16 Estructuras Dúctiles, en la sección 16.3.3 Marcos con contravientos concéntricos de ductilidad alta ($Q=3$) se menciona las especificaciones que debe cumplir este sistema.

La resistencia de columnas, vigas y conexiones está basada en la combinación de cargas, este valor de fuerzas horizontales será el mayor de los siguientes análisis:

Análisis en donde todos los contravientos resisten las fuerzas correspondientes a sus resistencias esperadas en tensión o compresión

Análisis en donde todos los contravientos en tensión resisten las fuerzas correspondientes a sus resistencias esperadas y los contravientos comprimidos sus resistencias esperadas posterior al pandeo.

Los contravientos deben de resistir al menos 30 % de la fuerza lateral pero no más que el 70%.

La relación de esbeltez efectiva, KL/r , no será mayor que $4.0 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$

La fuerza axial máxima que aplican los contravientos a columnas y vigas, en tensión será $P_T = R_y F_y A_t$ y en los comprimidos $P_c = 0.3R_c$, se toma la fuerza que produzca el valor más desfavorable para el diseño del elemento que recibe la diagonal, ver figura 1.8.

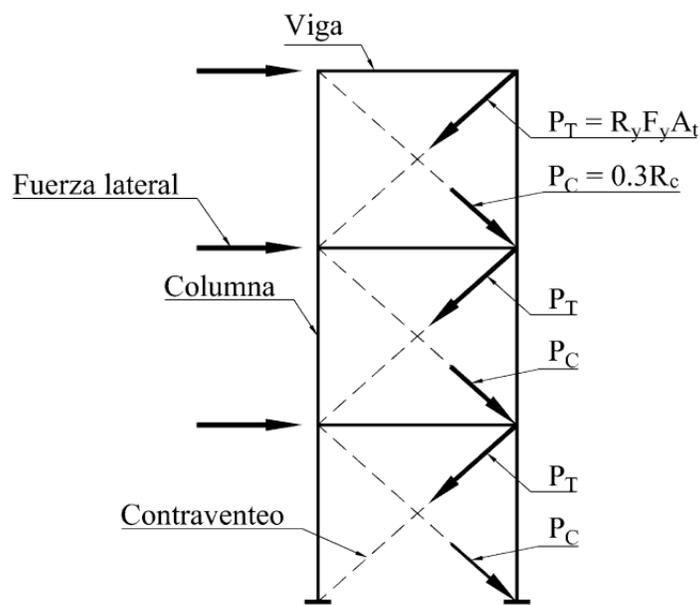


Figura 1.9. Fuerza máxima que producen los contraventeos en tensión y en compresión.

La resistencia esperada en compresión, R_c , de un contraventeo es igual a la menor de las siguientes expresiones, $R_y F_y A_t$ y $1.14 F_n A_t$.

Marcos con contraventeos concéntricos de ductilidad baja ($Q= 2$), las diagonales de contraventeo pueden resistir fuerzas de tensión y compresión importantes, bajo la acción de eventos sísmicos intensos, mientras admiten deformaciones inelásticas moderadas en ellas y sus conexiones.

Cuando la estructura no sea capaz de desarrollar grandes deformaciones inelásticas sin daño excesivo ni garantizar que no se fracture el contraviento o su conexión es necesario analizarla como marcos con contravientos concéntricos de ductilidad baja ($Q= 2$). Los marcos rígidos con contravientos concéntricos de ductilidad baja son capaces de desarrollar una magnitud reducida de deformación inelástica. Para compensar esa ductilidad limitada, estos marcos son diseñados para resistir una mayor demanda lateral usando un factor de comportamiento sísmico menor que los sistemas con marcos con contravientos concéntricos de ductilidad alta.

1.4.2 NTC-DS-2023 (2023)

El factor de comportamiento sísmico Q y distorsión límite γ_{max} adoptaran las magnitudes especificadas en la tabla 1.6. Los requisitos específicos que deben cumplirse para que una estructura pueda ser considerada como de ductilidad alta, media o baja se especifican en las Normas Técnicas correspondientes al material del que se trate.

Tabla 1.6 Factores de comportamiento sísmico y distorsiones límite para estructuras de acero y compuestas (NTC-DS-2023).

Estructuración	Ductilidad	Condición	Q	γ_{SV}	γ_{OI}
ii) Sistema dual ^{[a], [b]} formado por marcos de acero y contravientos de acero ^{[2], [3], [4]}	Media	Contravientos concéntricos de ductilidad alta ^[6]	3.0	0.015	0.0050
	Baja	Contravientos concéntricos de ductilidad media ^[7]	2.0	0.010	0.0050

[2] Los marcos en estos sistemas duales deberán ser capaces de resistir en cada entrepiso, sin contar con la contribución de los contraventeos o muros, por lo menos 25 por ciento de la fuerza cortante actuante. Los marcos deben ser detallados para obtener el mismo nivel de ductilidad que los muros o contraventeos.

[3] Se debe garantizar en los sistemas duales con contraventeos que los contraventeos en tensión sean capaces de resistir en cada entrepiso entre 30 y 70 por ciento de la fuerza cortante actuante

[4] En caso de que los sistemas estructurales utilicen muros, los valores de γ_{SV} y γ_{OI} podrán incrementarse en 0.005 cuando la relación de aspecto (cociente entre la altura y dimensión en planta) de todos los muros sea igual o mayor que 4. En caso de que se utilicen contraventeos metálicos, la relación de aspecto para considerar dicho incremento debe considerar la dimensión en planta de la crujía o crujías que hayan sido contraventeadas en forma consecutiva y de manera continua en altura. Este incremento es aplicable sólo cuando la rigidez lateral o la resistencia al corte de algún entrepiso no exceda en más del 20 por ciento la del entrepiso inmediatamente inferior, y que en el caso de muros se haga un diseño basado en capacidad que garantice un comportamiento plástico por flexión en su base.

[7] Para edificaciones construidas antes de 2018, los valores de Q y γ_{SV} indicados en la tabla 4.3.2 para contraventeos concéntricos de ductilidad alta deben sustituirse por 2.0 y 0.008, respectivamente, y deberán seguirse los criterios establecidos en la NTC-Evaluación.

[a] Se entiende por sistema dual aquel cuya resistencia a sismo queda aportada por el trabajo conjunto de marcos y muros o contravientos desde la base del sistema hasta al menos 75 por ciento de la altura de la estructura. Los diferentes componentes del sistema dual deben quedar interconectados por medio de diafragmas horizontales rígidos que cumplan con lo indicado en 2.8. La condición de diafragma rígido y la aportación del marco y muros o contravientos deben cumplirse en todos los entrepisos que incluyan muros o contravientos para clasificarse como sistema dual.

[b] En el caso de que la resistencia a sismo quede aportada por el trabajo conjunto de tres o más tipos de elementos estructurales, tales como marcos, muros y contravientos, los marcos deberán ser capaces de resistir en cada entrepiso, sin contar con la contribución de los contravientos y muros, por lo menos 25 por ciento de la fuerza cortante. La condición de diafragma rígido y la aportación mínima de los marcos deben cumplirse en todos los entrepisos que conforman la estructura.

Como se puede ver en la tabla 1.4 solo se hace la distinción para marcos con contravientos concéntricos de ductilidad alta y baja, sin embargo, no se hace mención del tipo de sección del contraviento.

1.4.3 AISC 341-16 (2016)

En el capítulo F y sección F1. Marcos con contraviento concéntrico ordinarios se especifica los requerimientos para el diseño de este sistema.

Las vigas del sistema en configuración V o V invertida deben ser continuas en la conexión de los contravientos, y deben cumplir con los siguientes puntos:

(a) La resistencia requerida de la viga se determinará asumiendo que los arriostramientos no proporcionan soporte de cargas vivas y muertas. Para combinaciones de carga que incluyen efectos sísmicos, se determinará el efecto de la carga sísmica, se determinará la carga sísmica como sigue:

(1) Se supondrá que las fuerzas en contraviento en tensión será la menor de:

(i) El efecto de carga basado en la carga sísmica de sobre resistencia.

(ii) La fuerza máxima que puede desarrollar el sistema.

(2) Se puede asumir que las fuerzas en compresión de los contravientos son igual a $0.3P_n$

Donde P_n es la resistencia nominal a compresión axial.

Requerimientos Básicos de los miembros, para configuraciones en V o V invertida los contravientos deben de cumplir con:

$$\frac{L_c}{r} \leq 4 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$$

En el mismo capítulo se mencionan los marcos con contraviento concéntrico especiales, de estos se espera proporcionen una capacidad de deformación inelástica significativa principalmente a través del pandeo del contraviento y la fluencia de este en tensión.

Para el análisis la resistencia requerida de las columnas, vigas, y conexiones se determinará utilizando el efecto de carga sísmica de capacidad limitada.

En conclusión, en esta normativa se hace una distinción para los contravientos concéntricos, se dividen en *Ordinary concentrically braced frames* (OCBF) contravientos concéntricos ordinarios y *Special concentrically braced frames* (SCBF) contravientos concéntricos especiales, la diferencia entre estos es que de acuerdo a la tabla D1.1 *Limiting Width-to-Thickness Ratios for compression elements*, los perfiles se dividen en ductilidad alta y ductilidad moderada, los perfiles de ductilidad alta se pueden utilizar para (SCBF) y los perfiles de ductilidad moderada en (OCBF).

Capítulo 2. Análisis y diseño de los marcos

RESUMEN

En este capítulo se detallan los criterios para el diseño de los marcos de esta investigación, considerando una estructura en tres dimensiones. Se realizó el análisis estructural y posterior diseño considerando la filosofía de diseño por capacidad. Para estructuras de 6 niveles con un sistema de contravientos en V invertida o chevrón y en X o cruz, para cada uno de los perfiles estudiados (IR, OR y ángulo).

La diferencia entre la configuración en V invertida y en X radica en el diseño y capacidad de las traveses principales donde se conectan los contravientos concéntricos, al ser una configuración en X a cada dos niveles, la descarga que generan los contravientos es resistida por los mismos contravientos del nivel superior e inferior, esto hace posible que se pueda tener una travesa más esbelta a comparación de la configuración en V invertida.

En general, los edificios bajos están gobernados por resistencia y los edificios altos están gobernados por rigidez.

Capítulo 2. Análisis y diseño de los marcos

2.1 Descripción

Para la elaboración de este proyecto se tomaría como referencia la ubicación de la torre BBVA localizada en la Av. Paseo de la Reforma 510, alcaldía Cuauhtémoc 06600. Ciudad de México. Después de varias propuestas, se determinó que la geometría del proyecto para el análisis lineal sea como se muestra en la figura 2.1.

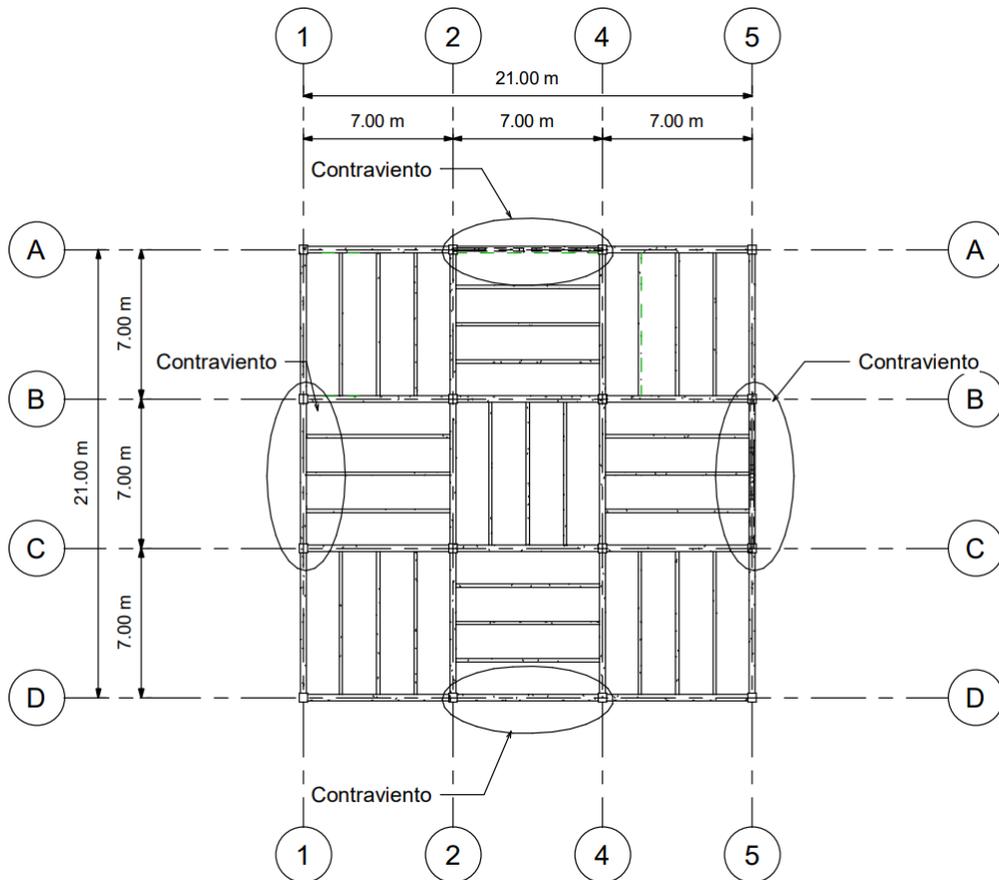


Figura 2.1. Geometría del proyecto.

El sistema estructural que se elige para este proyecto toma como referencia el utilizado en la práctica mexicana, se proponen marcos de acero con columnas de sección hueca cuadrada, trabes principales y secundarias de sección IR, el acero utilizado para los elementos será A572 Gr. 50, el sistema de piso será de losacero, a fin de guiar a un comportamiento similar en ambos sentidos, se propone colocar las vigas secundarias en tresbolillo como se muestra en la figura 1.1.

Se propone colocar los contravientos concéntricos en la crujía central de la estructura, como se observa en la figura anterior, la configuración de contravientos que se eligen para este

proyecto es dos, en V invertida y en X como se muestra en las figuras 2.2 y 2.3 respectivamente.

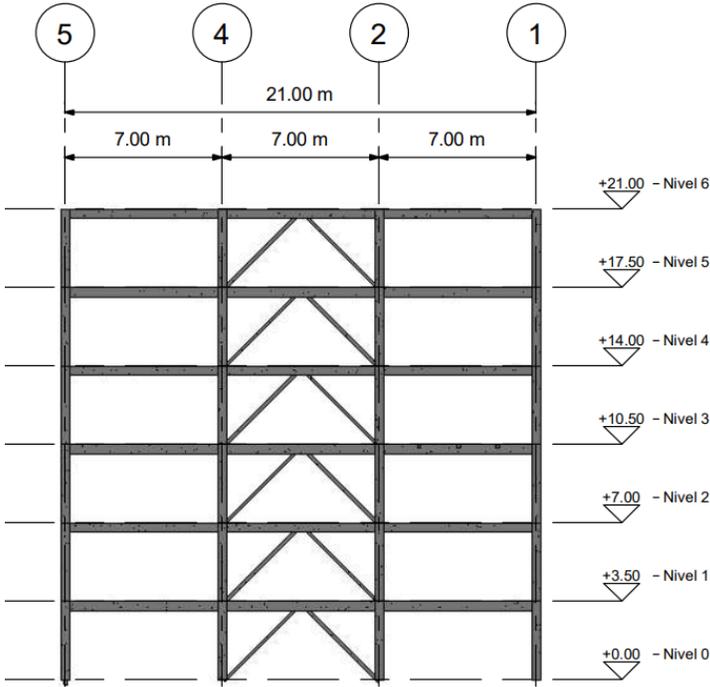


Figura 2.2. Perfil del modelo de contravientos concéntricos en configuración V invertido.

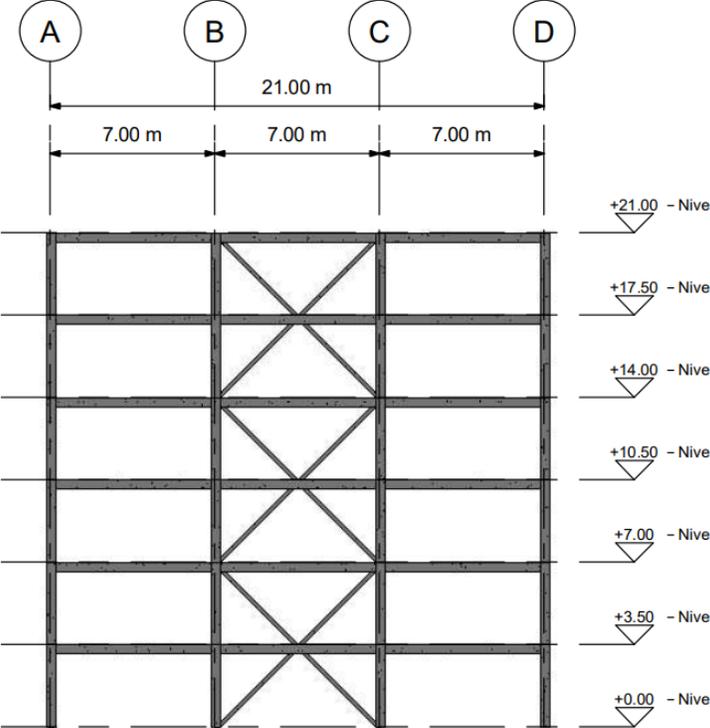


Figura 2.3. Perfil del modelo de contravientos concéntricos en configuración X.

En este documento se incluyen las imágenes referentes a los modelos de 6 niveles en ambas configuraciones.

2.2 Análisis estructural

2.2.1 Materiales

Las propiedades de los materiales utilizados serán de acuerdo con lo especificado en la siguiente tabla.

Tabla 2.1. Esfuerzos F_y y F_u de aceros estructurales.

Norma			Propiedades Mecánicas			
			F_y ⁽³⁾		F_u ⁽⁴⁾	
Acero de Alta Resistencia y Baja Aleación						
NMX ⁽¹⁾	ASTM ⁽²⁾	Grado (Gr.)	MPa	Kg/cm ²	MPa	Kg/cm ²
B-284	A572	50	345	3,515	450	4,570

Notas:

⁽¹⁾ Norma Mexicana

⁽²⁾ *American Society for Testing and Materials*

⁽³⁾ Valor mínimo garantizado del esfuerzo de fluencia

⁽⁴⁾ Valor mínimo garantizado del esfuerzo ultimo

2.2.2 Análisis de cargas

Las cargas del proyecto se obtuvieron considerando que el uso de la edificación será de oficinas, de tal manera que se consideran plafones para cubrir la estructura, instalaciones en el techo como se acostumbra en la práctica mexicana y un piso terminado a fin de mejorar la estética del lugar, en la siguiente tabla de describen las magnitudes propuestas.

Tabla 2.2. Análisis de cargas

Entrepiso Tipo		
Concepto	Carga	
Losacero <i>galvadeck</i> cal 22 ⁽¹⁾	230 kg/m ²	
Carga adicional de reglamento ⁽²⁾	40 kg/m ²	
Plafón de yeso ⁽³⁾	30 kg/m ²	
Piso terminado ⁽⁴⁾	130 kg/m ²	
Instalaciones ⁽⁵⁾	10 kg/m ²	
Muros / Ventanas/Puertas ⁽⁶⁾	400 kg/m ²	
TOTAL ⁽⁷⁾	840 kg/m ²	
Carga viva media (CV _m) ⁽⁸⁾	100 kg/m ²	940 kg/m ²
Carga viva instantánea (CV _i) ⁽⁸⁾	180 kg/m ²	1020 kg/m ²
Carga viva máxima (CVM) ⁽⁸⁾	250 kg/m ²	1090 kg/m ²

Notas:

- (1) De acuerdo con las cargas del proyecto se eligió la Losacero *galvadeck* cal. 22
- (2) Carga adicional del reglamento, sección NTC-criterios y acciones en el inciso 5.1.2.
- (3) Tomando en cuenta el proceso constructivo se incluye la carga de un plafón falso de yeso.
- (4) El piso terminado se determinó considerando piezas de loseta cerámica.
- (5) En este inciso se incluyen luminarias, tuberías etc.
- (6) La carga de los muros, ventanas y puertas, se sacó por nivel y se divide entre el área del entrepiso de tal manera de obtener una carga repartida.
- (7) La suma Total hasta ese punto se considera como sobre carga muerta (SCM).
- (8) Carga tomada de la tabla 6.1.1 se la sección de criterios y acciones de diseño, para uso de oficinas.

2.2.3 Espectro de Diseño

El espectro de diseño se obtuvo de la página de Sistema de Acciones Sísmicas de Diseño (SASID), la dirección del predio es, Avenida Paseo de la Reforma 510, Juárez, Ciudad de México, CDMX, México. Como factor de hiperestaticidad se consideró $kI=1$. El factor de importancia se considera del grupo B dadas las condiciones del proyecto y como factor de irregularidad 1.0.

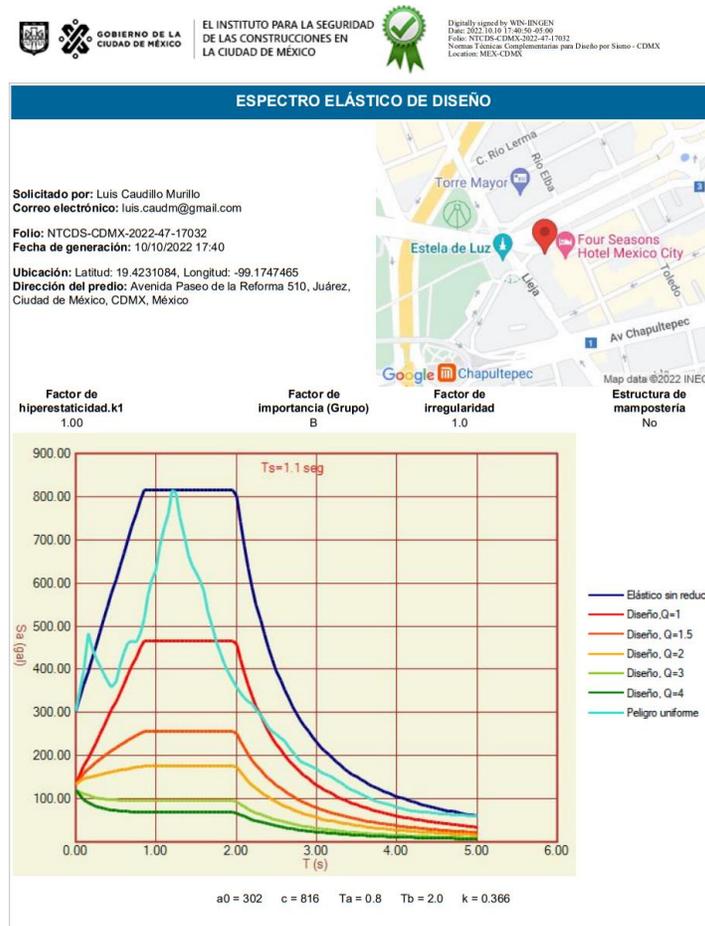


Figura 2.4. Captura de pantalla del espectro de diseño obtenido de SASID.

De acuerdo con el sistema estructural que se trata en este proyecto contravientos concéntricos, se tomara un factor de diseño $Q=3$.

2.2.4 Análisis Modal Espectral

La estructura se modelo en el espacio 3D para obtener resultados apegados a la realidad, se utilizó el software ETABS, este programa permite visualizar la estructura y así mismo observar los elementos mecánicos. Los parámetros mencionados en los incisos anteriores son incluidos en el modelo de la estructura.

Se analizaron 5 condiciones de carga que son:

- 1.- Carga muerta (CM)
- 2.- Carga viva instantánea (CV_i)
- 3.- Carga viva máxima (CV_{max})
- 4.- Sismo X
- 5.- Sismo Y

De estas condiciones de carga se realizaron 9 combinaciones que pueden llegar a presentarse, con los sismos X y Y positivo como negativo.

Tabla 2.3. Matriz de combinaciones para el análisis modal espectral.

Comb.	CM	CV_i	CV_{max}	Sismo X	Sismo Y
1	1.30	0.00	1.50	0.00	0.00
2	1.10	1.10	0.00	1.10	0.33
3	1.10	1.10	0.00	1.10	-0.33
4	1.10	1.10	0.00	-1.10	0.33
5	1.10	1.10	0.00	-1.10	-0.33
6	1.10	1.10	0.00	0.33	1.10
7	1.10	1.10	0.00	-0.33	1.10
8	1.10	1.10	0.00	0.33	-1.10
9	1.10	1.10	0.00	-0.33	-1.10

2.3 Diseño de los elementos estructurales Modelo 6 niveles

El proceso de diseño de los contravientos es iterativo, el siguiente ejemplo es el resultado de diversas iteraciones. El primer paso es obtener los elementos mecánicos de los contravientos, obtener la combinación más desfavorable en compresión, y la más desfavorable en tensión.

Con las magnitudes de los elementos mecánicos actuantes en los contravientos se selecciona un perfil que satisfaga los requerimientos, con ayuda de un software se asignan las propiedades del perfil seleccionado y se evalúan los desplazamientos laterales del modelo,

en algunos casos los desplazamientos serán mayores a los permitidos de tal manera que se debe de incrementar la sección del perfil, así hasta que se cumplan los requerimientos.

Para fines prácticos se mostrará un ejemplo de diseño para cada uno de los distintitos perfiles de contravientos OR, IR y ángulo, sin embargo, los incisos restantes estarán calculados de acuerdo con los resultados obtenidos del contraviento OR.

NOTA: La hoja de cálculo se realizó en el *software Mathcad*, el termino **tonne** se refiere a toneladas, que equivale a 1000 kg.

2.3.1 Contraviento sección OR

Para el modelo de 6 niveles en configuración de V invertida, se seleccionó el perfil OR 178 x 15.9 (7'' x 5/8''), con base en la tabla del Manual del Instituto Mexicano para la Construcción en Acero (IMCA, 2020).

Diseño del contraviento CT-1

Sección OR

OR 178 x 15.9

Acero A572 Gr. 50

$b := 178 \text{ mm}$	$I_x := 3887.6 \text{ cm}^4$	$J := 6576.5 \text{ cm}^4$	$C_{act} := 140 \text{ tonne}$
$t_p := 15.9 \text{ mm}$	$Z_x := 542.4 \text{ cm}^3$	$f_u := 4570 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	$T_{act} := 104 \text{ tonne}$
$A := 90.32 \text{ cm}^2$	$S_x := 437.5 \text{ cm}^3$	$R_y := 1.1$	$E := 2039000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
$f_y := 3520 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	$r_x := 6.55 \text{ cm}$		

Limite ancho/grueso

De acuerdo con la tabla 16.1.2. (NTC-DCEA, 2023) se establecen límites para considerar a los perfiles de ductilidad alta o media, estos límites son menores a comparación de la tabla 3.2.1. de la misma norma.

Paredes de secciones HSS Rectangulares

Ductilidad Alta

$$0.65 \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot f_y}} = 14.916$$

$$\frac{b}{t_p} = 11.195$$

Ductilidad Media

$$0.76 \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot f_y}} = 17.44$$

Ductilidad Alta

La sección propuesta satisface los requisitos y puede ser utilizada como ductilidad alta.

Relación de esbeltez

En la sección 16.3.3.4.1 Diagonales de contravento (NTC-DCEA, 2023) la relación de esbeltez efectiva no será mayor que la siguiente expresión.

Relación de esbeltez

$$4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 96.271 \quad L_{real} := L_{ejes} \cdot 0.8 = 3.96 \text{ m} \quad K := 0.9$$
$$\frac{K \cdot L_{real}}{r_x} = 54.409 \quad \text{Cumple con la relación}$$

La longitud real en este momento no se conoce, se debe de considerar las dimensiones de columnas y vigas, por lo tanto, para obtener una aproximación de esta longitud, se reduce en 0.8 la distancia entre ejes conocida. El factor $K=0.9$ fue propuesto por el profesor.

Tomando en cuenta la relación de esbeltez y el límite ancho grueso nos damos cuenta de que no todos los perfiles que aparecen en el manual IMCA con calificados para utilizar en este sistema estructural.

Resistencia en compresión

Para determinar la resistencia a compresión de elementos de sección transversal tipo OR nos debemos referenciar a la sección 6.3.1 de (NTC-DCEA, 2023).

Resistencia en Compresión

$$K := 1 \quad F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_{real}}{r_x}\right)^2} = 5506.219 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad \lambda_c := \sqrt{\frac{f_y}{F_e}} = 0.8$$
$$n := 2.0 \quad F_R := 0.9 \quad \chi := \left(1 + \lambda_c^{2 \cdot n}\right)^{\frac{1}{n}} = 0.843$$
$$R_c := F_R \cdot \chi \cdot f_y \cdot A = 241.081 \text{ tonne} \quad C_{act} = 140 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

El valor de n es un coeficiente adimensional, se seleccionó el valor de 2.0 para columnas de sección transversal H o I, laminadas y flexionadas alrededor de cualquiera de sus ejes de simetría, o de acero con límite de fluencia no menor de 414 MPa (4220 kg/cm²). El factor de reducción F_R es igual a 0.9.

La resistencia a compresión obtenida debe de ser mayor que la demanda de carga axial que resulta del análisis modal espectral.

Resistencia en tensión

Conforme a la sección 5.3. de (NTC-DCEA, 2023) sobre la resistencia de diseño de un miembro en tensión, el estado límite de fluencia en la sección total se calculó como:

Resistencia en Tensión

$$R_t := F_R \cdot f_y \cdot A = 286.134 \text{ tonne}$$

$$T_{act} = 104 \text{ tonne}$$

Cumple

Resistencias máximas esperadas

En la sección 16.3.3.5.3 (NTC-DCEA, 2023) sobre la resistencia de las diagonales de contraventeo, la resistencia esperada en compresión de un contraviento es igual a la menor de las siguientes magnitudes.

Resistencia en Compresión Máxima Esperada

$$R_{ce} := 1.14 \cdot \chi \cdot f_y \cdot A \cdot R_y = 335.907 \text{ tonne}$$

$$R'_{ce} := 0.3 \cdot R_{ce} = 100.772 \text{ tonne}$$

Resistencia en Tensión Máxima Esperada

$$R_{te} := R_y \cdot f_y \cdot A = 349.719 \text{ tonne}$$

Redistribución de cargas

Una vez que se verifica que el contraviento propuesto cumple con las acciones de diseño, se realiza la redistribución de cargas, es decir, se supone que el contraviento falla y se consideran las máximas resistencias esperadas antes calculadas.

Redistribución de Cargas

$$H_1 = 3.5 \text{ m}$$

$$B_1 = 3.5 \text{ m}$$

$$\theta := \text{atan}\left(\frac{H_1}{B_1}\right) = 45 \text{ deg}$$

$$F_{xa1} := \cos(\theta) \cdot R_{te} = 247.289 \text{ tonne}$$

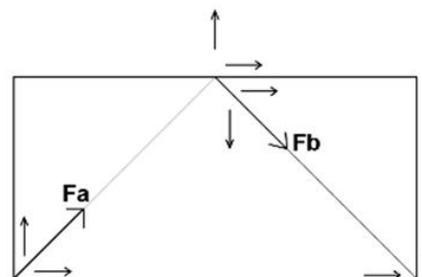
$$F_{ya1} := \sin(\theta) \cdot R_{te} = 247.289 \text{ tonne}$$

$$F_{xb1} := \cos(\theta) \cdot R_{ce} = 237.522 \text{ tonne}$$

$$F_{yb1} := \sin(\theta) \cdot R_{ce} = 237.522 \text{ tonne}$$

$$F_{yResultante1} := -F_{ya1} + F_{yb1} = -9.767 \text{ tonne}$$

$$F_{xResultante1} := F_{xa1} + F_{xb1} = 484.811 \text{ tonne}$$



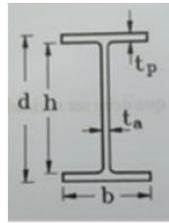
Se determina la fuerza resultante en el sentido vertical F_y que actuaría como una fuerza puntual sobre la trabe y sobre la columna, y la fuerza horizontal F_x que actúa comprimiendo la viga horizontal. Para los contravientos en configuración V invertida, esta fuerza F_x es de gran importancia en las vigas principales debido a que deben de revisarse por flexo compresión.

2.3.2 Contraviento sección I

Para el modelo de 6 niveles en configuración de V invertida, se seleccionó el perfil IR 203 x 71.5, con base en la tabla del Manual del Instituto Mexicano para la Construcción en Acero (IMCA, 2020).

Diseño del contraviento CT-1

Acero A572 Gr. 50



IR 203 x 71.5

W 8 x 48

$$d := 216 \text{ mm}$$

$$A := 91 \text{ cm}^2$$

$$I_y := 2535 \text{ cm}^4$$

$$t_a := 10.2 \text{ mm}$$

$$I_x := 7656 \text{ cm}^4$$

$$Z_y := 375 \text{ cm}^3$$

$$b := 206 \text{ mm}$$

$$Z_x := 803 \text{ cm}^3$$

$$S_y := 246 \text{ cm}^3$$

$$t_p := 17.4 \text{ mm}$$

$$S_x := 708 \text{ cm}^3$$

$$r_y := 5.3 \text{ cm}$$

$$R_{act1} := 155 \text{ tonne}$$

$$h := 160 \text{ mm}$$

$$r_x := 9.2 \text{ cm}$$

$$J := 82 \text{ cm}^4$$

$$R_{act2} := 85 \text{ tonne}$$

$$\frac{b}{2 \cdot t_p} = 5.92$$

$$\frac{h}{t_a} = 15.686$$

$$C_a := 250007 \text{ cm}^6$$

$$T_{act1} := 120 \text{ tonne}$$

$$T_{act2} := 52 \text{ tonne}$$

$$f_y := 3520 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$E := 2039000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Limite ancho/grueso

De acuerdo con la tabla 16.1.2. (NTC-DCEA, 2023) se establecen límites para considerar a los perfiles de ductilidad alta o media, estos límites son menores a comparación de la tabla 3.2.1. de la misma norma.

Patín de perfil IPR

Ductilidad Alta

$$0.32 \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot f_y}} = 7.343 \quad \frac{b}{2 \cdot t_p} = 5.92$$

Ductilidad Media

$$0.40 \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot f_y}} = 9.179$$

Ductilidad Alta

Alma de perfil IPR

Ductilidad Alta

$$1.57 \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot f_y}} = 36.028 \quad \frac{d - 2 \cdot t_p}{t_a} = 17.765$$

Ductilidad Media

$$1.57 \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot f_y}} = 36.028$$

Ductilidad Alta

Relación de esbeltez

En la sección 16.3.3.4.1 Diagonales de contravento (NTC-DCEA, 2023) la relación de esbeltez efectiva no será mayor que la siguiente expresión.

Relación de esbeltez

$$4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 96.271 \quad L_{real} := L_{ejes} \cdot 0.8 = 3.96 \text{ m} \quad K := 0.9$$

$$\frac{K \cdot L_{real}}{r_x} = 38.737 \quad \text{Cumple con la relación}$$

$$\frac{K \cdot L_{real}}{r_y} = 67.242 \quad \text{Cumple con la relación}$$

Resistencia en compresión

Para determinar la resistencia a compresión de elementos de sección transversal tipo IR nos debemos referenciar a la sección 6.3. de (NTC-DCEA, 2023).

Pandeo Local Alma

$$k := 4 \quad \sigma_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0.3^2)} \cdot \left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \cdot k = 52591.842 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Límite de Proporcionalidad

$$\frac{f_y}{2} = 1760 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Corrección por inelasticidad

$$\sigma_{crelA} := f_y \cdot \left(1 - \frac{f_y}{4 \cdot \sigma_{cr}}\right) = 3461.101 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad F_R := 0.9$$

$$R_c := F_R \cdot \sigma_{crelP} \cdot A = 242.887 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Pandeo Local Patín

$$k := 0.425 \quad \sigma_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0.3^2)} \cdot \left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \cdot k = 5587.883 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Límite de Proporcionalidad

$$\frac{f_y}{2} = 1760 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Corrección por inelasticidad

$$\sigma_{cre1P} := f_y \cdot \left(1 - \frac{f_y}{4 \cdot \sigma_{cr}}\right) = 2965.658 \frac{kg}{cm^2}$$

Pandeo Global

$$K := 1$$

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_{real}}{r_x}\right)^2} = 10862.92 \frac{kg}{cm^2} \quad F_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_{real}}{r_y}\right)^2} = 3605.144 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\lambda_c := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ey}}} = 0.988 \quad n := 2.0 \quad F_R := 0.9 \quad R_y := 1.1$$

$$\chi := \left(1 + \lambda_c^{2 \cdot n}\right)^{\frac{1}{n}} = 0.716$$

$$R_c := F_R \cdot \chi \cdot f_y \cdot A = 206.272 \text{ tonne} \quad R_{act1} = 155 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Resistencia en tensión

Conforme a la sección 5.3 de (NTC-DCEA, 2023) sobre la resistencia de diseño de un miembro en tensión, el estado límite de fluencia en la sección total se calculó como:

Resistencia en Tensión

$$R_t := F_R \cdot f_y \cdot A = 288.288 \text{ tonne} \quad T_{act1} = 120 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Resistencias máximas esperadas

En la sección 16.3.3.5.3 (NTC-DCEA, 2023) sobre la resistencia de las diagonales de contraventeo, la resistencia esperada en compresión de un contraviento es igual a la menor de las siguientes magnitudes.

Resistencia en Compresión Máxima Esperada

$$R_{ce} := 1.14 \cdot \chi \cdot f_y \cdot A \cdot R_y = 287.405 \text{ tonne}$$

$$R'_{ce} := 0.3 \cdot R_{ce} = 86.222 \text{ tonne}$$

Resistencia en Tensión Máxima Esperada

$$R_{te} := R_y \cdot f_y \cdot A = 352.352 \text{ tonne}$$

Redistribución de cargas

Una vez que se verifica que el contraviento propuesto cumple con las acciones de diseño, se realiza la redistribución de cargas, es decir, se supone que el contraviento falla y se consideran las máximas resistencias esperadas antes calculadas.

Redistribución de Cargas

$$H_1 = 3.5 \text{ m} \quad B_1 = 3.5 \text{ m} \quad \theta := \text{atan}\left(\frac{H_1}{B_1}\right) = 45 \text{ deg}$$

$$F_{xa1} := \cos(\theta) \cdot R_{te} = 249.15 \text{ tonne}$$

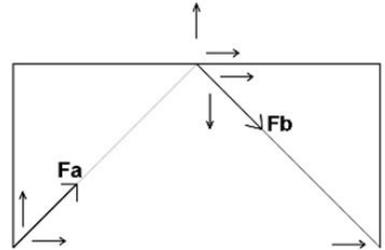
$$F_{ya1} := \sin(\theta) \cdot R_{te} = 249.15 \text{ tonne}$$

$$F_{xb1} := \cos(\theta) \cdot R_{ce} = 203.226 \text{ tonne}$$

$$F_{yb1} := \sin(\theta) \cdot R_{ce} = 203.226 \text{ tonne}$$

$$Fy_{Resultante1} := -F_{ya1} + F_{yb1} = -45.924 \text{ tonne}$$

$$Fx_{Resultante1} := F_{xa1} + F_{xb1} = 452.377 \text{ tonne}$$



2.3.3 Contraviento sección ángulo

Para el modelo de 6 niveles en configuración de V invertida, se seleccionó el perfil L 203 mm x 25.4 mm, con base en la tabla del Manual del Instituto Mexicano para la Construcción en Acero (IMCA, 2020).

Diseño del contraviento CT-1

Acero A572 Gr. 50

ANGULO 203 mm x 25.4 mm

$b := 203 \text{ mm}$	$t_p := 25.4 \text{ mm}$	$A := 96.8 \text{ cm}^2$
$C_a := 6293.8 \text{ cm}^6$	$J := 215.1 \text{ cm}^4$	$r_o := 12.2 \text{ cm}$
$I_x := 3708.6 \text{ cm}^4$	$Z_x := 467 \text{ cm}^3$	$S_x := 258.9 \text{ cm}^3$
$r_x := 6.17 \text{ cm}$	$y_o := 5.99 \text{ cm}$	$x_o := 5.99 \text{ cm}$
$I_z := 1539 \text{ cm}^4$	$S_z := 214.6 \text{ cm}^3$	$r_z := 3.96 \text{ cm}$
$f_y := 3520 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	$E := 2039000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	$G := 784000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$
$R_{act1} := 155 \text{ tonne}$	$T_{act1} := 120 \text{ tonne}$	
$R_{act2} := 85 \text{ tonne}$	$T_{act2} := 52 \text{ tonne}$	

Limite ancho/grueso

De acuerdo con la tabla 16.1.2. (NTC-DCEA, 2023) se establecen límites para considerar a los perfiles de ductilidad alta o media, estos límites son menores a comparación de la tabla 3.2.1. de la misma norma.

Patín de Angulo

Ductilidad Alta

$$0.32 \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot f_y}} = 7.343 \quad \frac{b}{t_p} = 7.992$$

Ductilidad Media

$$0.40 \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y \cdot f_y}} = 9.179$$

Ductilidad Media

Relación de esbeltez

En la sección 16.3.3.4.1 Diagonales de contraventeo (NTC-DCEA, 2023) la relación de esbeltez efectiva no será mayor que la siguiente expresión.

Relación de esbeltez

$$4 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 96.271 \quad L_{real} := L_{ejes} \cdot 0.8 = 3.96 \text{ m} \quad K := 0.9$$

$$\frac{K \cdot L_{real}}{r_x} = 57.76 \quad \text{Cumple con la relación}$$

Resistencia en compresión

Para determinar la resistencia a compresión de elementos de sección transversal tipo OR nos debemos referenciar a la sección 5.3 de (NTC-DCEA, 2023), donde se utilizan las siguientes ecuaciones.

Pandeo Local Patín

$$k := 0.425 \quad \sigma_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0.3^2)} \cdot \left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \cdot k = 12261.924 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Límite de Proporcionalidad

$$\frac{f_y}{2} = 1760 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

Corrección por inelasticidad

$$\sigma_{cre1P} := f_y \cdot \left(1 - \frac{f_y}{4 \cdot \sigma_{cr}}\right) = 3267.381 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad F_R := 0.9$$

$$R_c := F_R \cdot \sigma_{cre1P} \cdot A = 284.654 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Pandeo Global

$$K := 1$$

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_{real}}{r_x}\right)^2} = 4885.863 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F_{ez} := \left((G \cdot J) + \left(\frac{\pi^2 \cdot E \cdot C_a}{(K \cdot L_{real})^2} \right) \right) \cdot \frac{1}{A \cdot r_o^2} = 11760.796 \frac{kg}{cm^2}$$

$$H := 1 - \left(\frac{x_o^2 + y_o^2}{r_o^2} \right) = 0.518$$

$$F_e := \frac{F_{ex} + F_{ez}}{2 \cdot H} \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot F_{ex} \cdot F_{ez} \cdot H}{(F_{ex} + F_{ez})^2}} \right) = 3933.079 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\lambda_c := \sqrt{\frac{f_y}{F_e}} = 0.946 \quad n := 2.0 \quad F_R := 0.9 \quad R_y := 1.1$$

$$\chi := \left(1 + \lambda_c^{2 \cdot n} \right)^{\frac{1}{n}} = 0.745$$

$$R_c := F_R \cdot \chi \cdot f_y \cdot A = 228.511 \text{ tonne} \quad R_{act1} = 155 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Resistencia en tensión

Conforme a la sección 5.3. de (NTC-DCEA, 2023) sobre la resistencia de diseño de un miembro en tensión, el estado límite de fluencia en la sección total se calculó como:

Resistencia en Tensión

$$R_t := F_R \cdot f_y \cdot A = 306.662 \text{ tonne} \quad T_{act2} = 52 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Resistencias máximas esperadas

En la sección 16.3.3.5.3 (NTC-DCEA, 2023) sobre la resistencia de las diagonales de contravento, la resistencia esperada en compresión de un contraviento es igual a la menor de las siguientes magnitudes.

Resistencia en Compresión Máxima Esperada

$$R_{ce} := 1.14 \cdot \chi \cdot f_y \cdot A \cdot R_y = 318.392 \text{ tonne}$$

$$R'_{ce} := 0.3 \cdot R_{ce} = 95.517 \text{ tonne}$$

Resistencia en Tensión Máxima Esperada

$$R_{te} := R_y \cdot f_y \cdot A = 374.81 \text{ tonne}$$

Redistribución de cargas

Una vez que se verifica que el contraviento propuesto cumple con las acciones de diseño, se realiza la redistribución de cargas, es decir, se supone que el contraviento falla y se consideran las máximas resistencias esperadas antes calculadas.

Redistribución de Cargas

$$H_1 = 3.5 \text{ m} \quad B_1 = 3.5 \text{ m} \quad \theta := \text{atan}\left(\frac{H_1}{B_1}\right) = 45 \text{ deg}$$

$$F_{xa1} := \cos(\theta) \cdot R_{te} = 265.03 \text{ tonne}$$

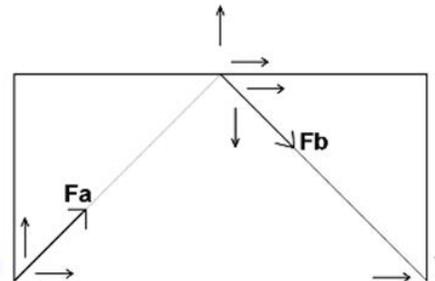
$$F_{ya1} := \sin(\theta) \cdot R_{te} = 265.03 \text{ tonne}$$

$$F_{xb1} := \cos(\theta) \cdot R_{ce} = 225.137 \text{ tonne}$$

$$F_{yb1} := \sin(\theta) \cdot R_{ce} = 225.137 \text{ tonne}$$

$$Fy_{Resultante1} := -F_{ya1} + F_{yb1} = -39.894 \text{ tonne}$$

$$Fx_{Resultante1} := F_{xa1} + F_{xb1} = 490.167 \text{ tonne}$$



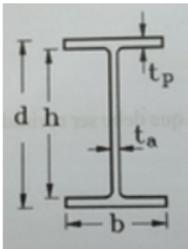
2.3.4 Trabe Principal

Para el diseño de la trabe principal, se debe de tener en cuenta el diseño por flexo compresión, a causa de la fuerza F_x generada por la falla y esfuerzo máximo esperado del contraviento. Así como el diseño de los contravientos este es un proceso iterativo, el ejemplo de diseño que se muestra a continuación, es resultado de varias iteraciones.

Diseño de Trabe Principal
Acero A572 Gr. 50

IR 356 x 196.5

W14 x 132



$$d = 374 \text{ mm} \quad A = 250.4 \text{ cm}^2 \quad S_x = 3425 \text{ cm}^3$$

$$t_a = 16.4 \text{ mm} \quad I_x = 63684 \text{ cm}^4 \quad S_y = 1221 \text{ cm}^3$$

$$b = 374 \text{ mm} \quad I_y = 22809 \text{ cm}^4 \quad Z_x = 3835 \text{ cm}^3$$

$$t_p = 26.2 \text{ mm} \quad r_x = 16 \text{ cm} \quad Z_y = 1852 \text{ cm}^3$$

$$h = 290 \text{ mm} \quad r_y = 9.6 \text{ cm} \quad J = 512 \text{ cm}^4$$

$$f_y = 3520 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad G = 784000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad C_a = 1801876 \text{ cm}^6$$

$$E = 2039000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad L = 1.75 \text{ m}$$

La sección propuesta se tomó del manual antes mencionado IMCA, tomando en cuenta que la edificación se está diseñando para un $Q=3$, esto quiere decir que se desea desarrollar una ductilidad alta, por lo tanto, el perfil propuesto debe de cumplir con ser una sección compacta.

En la tabla 2.2.1.2.6.b de (NTC-DCEA, 2023) valores máximos de las relaciones ancho/grueso para elementos flexo comprimidos, se evalúa el tipo de sección.

$$0.30 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 7.22 \quad \frac{b}{2 \cdot t_p} = 7.137 \quad 2.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 58.966 \quad \frac{h}{t_a} = 17.683$$

Patín Tipo 1

Alma Tipo 1

Tanto el alma como el patín cumplen con ser secciones del tipo 1 por lo que se garantiza que una vez que se genere el momento plástico lo mantengan.

Resistencia en flexión

Se toman los elementos mecánicos del software para la combinación más desfavorable y se realiza el diseño.

Para determinar el momento que resiste la viga se propone utilizar el método alterno descrito en la sección 7.2.1.2 de las (NTC-DCEA, 2023) debido a que se considera que la viga principal estará soportada lateralmente por las trabes secundarias, por la conexión del contraviento, y constructivamente por polines verticales y horizontales, se propone utilizar la longitud efectiva de la viga de $L=1.75m$, esta distancia pertenece a la separación entre vigas secundarias.



Figura 2.5. Captura de pantalla de los elementos mecánicos de la trabe principal.

Elementos Mecánicos (Para la combinación mas desfavorable)

Tramo 01

Método Alterno

$$M_1 := 8 \quad M_2 := 36.3 \quad C_b := \left(0.6 - 0.4 \cdot \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \right)^{-1} = 1.954$$

$$M_e := \frac{C_b \cdot \pi}{L} \cdot \sqrt{(E \cdot I_y \cdot G \cdot J) + \left(\frac{\pi \cdot E}{L} \right)^2} \cdot I_y \cdot C_a = 3011.69 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_p := Z_x \cdot f_y = 134.992 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_p \cdot \frac{2}{3} = 89.995 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_n := 1.15 \cdot M_p \cdot \left(1 - \frac{0.28 \cdot M_p}{M_e} \right) = 153.292 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

Tramo 02

Método Alterno

$$M_1 := 8 \quad M_2 := -27 \quad C_b := \left(0.6 - 0.4 \cdot \left(\frac{M_1}{M_2} \right) \right)^{-1} = 1.392$$

$$M_e := \frac{C_b \cdot \pi}{L} \cdot \sqrt{(E \cdot I_y \cdot G \cdot J) + \left(\frac{\pi \cdot E}{L} \right)^2} \cdot I_y \cdot C_a = 2145.415 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_p := Z_x \cdot f_y = 134.992 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_p \cdot \frac{2}{3} = 89.995 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_n := 1.15 \cdot M_p \cdot \left(1 - \frac{0.28 \cdot M_p}{M_e} \right) = 152.506 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

Se determina el coeficiente C_b que está en función de los momentos que actúan en el tramo de estudio, y se sustituye en la ecuación de momento 6.3.4, si es necesario se debe de corregir por inelasticidad.

El momento nominal es mayor que el momento actuante por lo tanto se acepta este perfil.

Resistencia en cortante

Para determinar la resistencia a cortante de un perfil debemos de referirnos al capítulo 8.2. Resistencia en cortante de (NTC-DCEA, 2023), donde se debe de considerar el factor C_v en función de la geometría del perfil, en este caso se considera $K=5$ ya que no se proponen

atiesadores inicialmente, evaluando la relación de h/t_a y comparando con las magnitudes mostradas en dicho inciso se determina el valor de C_v .

El cortante resistente se compara con el que se obtiene del modelo, y además debe de tomarse en cuenta la componente vertical de las fuerzas máximas esperadas de los contravientos, y suponerse en el peor de los casos como una carga puntual al centro de la viga.

Resistencia en Cortante
Sección Simple

$$V_n := 0.6 \cdot f_y \cdot A_a \cdot C_v$$

$$A_a := h \cdot t_a = 47.56 \text{ cm}^2$$

$$k_v := 5$$

$$\frac{h}{t_a} = 17.683 \quad 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 59.199 \quad C_v := 1$$

$$V_n := 0.6 \cdot f_y \cdot A_a \cdot C_v = 100.447 \text{ tonne}$$

$$V_R := 0.9 \cdot V_n = 90.402 \text{ tonne}$$

$$V_{act} := 34 \text{ tonne} + \frac{Fy_{Resultante1}}{2} = 56.202 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Se verifica que la sección propuesta cumple con el cortante actuante tanto de los elementos mecánicos del análisis, así como de la carga del contraviento en falla, de esta manera se logra el diseño por capacidad y forma parte de una de las primeras líneas de defensa del sistema estructural.

Flujo plástico local del alma

Este estado limite se revisa de acuerdo con la sección 10.8 (NTC-DCEA, 2023).

Se supone que la distancia de la cara exterior del patín a la región crítica del alma es de 3.5 cm y la longitud de apoyo $N=50$ cm, la fuerza resistida debe de ser mayor a él cortante actuante como a las fuerzas puntuales que actúan en la viga.

Revisión del Alma Bajo cargas puntuales
Evaluando los estados limite para el alma

Flujo Plástico local del Alma

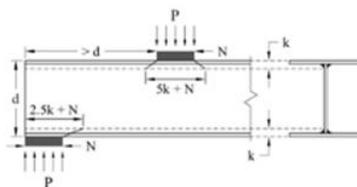


Figura 10.8.3 Longitud del tramo crítico; estado límite de flujo plástico local del alma de la viga

$$K := 3.5 \text{ cm} \quad N := 50 \text{ cm}$$

$$RN := (2.5 \cdot K + N) \cdot f_y \cdot t_a = 339.152 \text{ tonne}$$

$$Rr := 0.75 \cdot RN = 254.364 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

$$RN := (5 \cdot K + N) \cdot f_y \cdot t_a = 389.664 \text{ tonne}$$

$$Rr := 0.75 \cdot RN = 292.248 \text{ tonne} \quad V_{act} = 56.202 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Abollamiento local del alma

Para revisar este estado limite se toma la ecuación 10.8.4 de las (NTC-DCEA, 2023), en esta sección de la norma se muestran diversas ecuaciones para realizar esta revisión, estas dependen de la posición y distancia en la que se aplica la fuerza.

Abollamiento local del Alma

Como la fuerza puntual esta aplicada a una distancia mayor que $d/2$ se utilizara la siguiente expresión.

$$RN := 0.80 \cdot t_a^2 \cdot \left(1 + \left(3 \cdot \frac{N}{h} \cdot \frac{t_a}{t_p} \right)^{1.5} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{E \cdot f_y \cdot t_p}{t_a}} = 1572.673 \text{ tonne}$$

$$V_{act} = 56.202 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

La fuerza resistida debe de ser mayor que el cortante actuante y las fuerzas causadas por los contravientos en falla.

Resistencia en Flexocompresión

Para los contravientos concéntricos en configuración V invertida, el diseño de la trabe principal es un aspecto fundamental, esto debido a que cuando se aplica una carga lateral sobre la estructura y el contraviento falla, la componente horizontal de contraviento actúa como una fuerza axial de compresión, y esto podría guiar a una falla por flexo compresión en la viga principal. De la teoría de placas, debemos de revisar dependiendo el perfil, los patines y el alma para el perfil IR, y por último el conjunto es decir el pandeo global.

Se revisa el patín y el alma ante el pandeo local, tomando como referencia la teoría de placas, que se puede consultar en (De Buen, 1980), el factor k está en función del tipo de apoyo, y en este caso si se considera atiesada o no atiesada, el patín como se une solo en un extremo a el alma se considera no atiesada y le corresponde un valor de $k=0.425$, y el para el alma $k=4$ por estar unida en los dos extremos por ambos patines.

Revisión a Flexo compresión por la carga de Contraviento
Pandeo Local Patín

$$k := 0.425 \quad \sigma_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0.3^2)} \cdot \left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \cdot k = 3843.639 \frac{kg}{cm^2}$$

Limite de Proporcionalidad

$$\frac{f_y}{2} = 1760 \frac{kg}{cm^2}$$

Corrección por inelasticidad

$$\sigma_{cre1P} := f_y \cdot \left(1 - \frac{f_y}{4 \cdot \sigma_{cr}}\right) = 2714.097 \frac{kg}{cm^2}$$

Pandeo Local Alma

$$k := 4 \quad \sigma_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0.3^2)} \cdot \left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \cdot k = 36175.43 \frac{kg}{cm^2}$$

Limite de Proporcionalidad

$$\frac{f_y}{2} = 1760 \frac{kg}{cm^2}$$

Corrección por inelasticidad

$$\sigma_{cre1A} := f_y \cdot \left(1 - \frac{f_y}{4 \cdot \sigma_{cr}}\right) = 3434.373 \frac{kg}{cm^2} \quad F_R := 0.9$$

$$R_c := F_R \cdot \sigma_{cre1P} \cdot A = 611.649 \text{ tonne}$$

$$Fx_{Resultante1} = 538.982 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Se comprueba que tanto el patín como el alma soportan la descarga horizontal y no fallarían por pandeo local. Para determinar la resistencia por pandeo global del perfil nos debemos referenciar a la sección 6.3. de (NTC-DCEA, 2023).

Pandeo Global

$$K := 1$$

$$F_{ex} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r_x}\right)^2} = 168221.244 \frac{kg}{cm^2}$$

$$F_{ey} := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L}{r_y}\right)^2} = 60559.648 \frac{kg}{cm^2}$$

$$\lambda_c := \sqrt{\frac{f_y}{F_{ey}}} = 0.241 \quad n := 2.4 \quad F_R := 0.9$$

$$\chi := \left(1 + \lambda_c^{2 \cdot n}\right)^{\frac{1}{n}} = 1$$

$$R_c := F_R \cdot \chi \cdot f_y \cdot A = 792.91 \text{ tonne} \quad Fx_{Resultante1} = 538.982 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

La fuerza horizontal actuante es menor que la resistida por el perfil de tal manera que la sección propuesta se acepta. Como se puede notar parece que la sección esta sobrada al comparar el momento y cortante actuante contra los resistentes, sin embargo, se hace hincapié que para esta configuración de contravientos V invertida el valor que rige el diseño de la viga principal es la fuerza horizontal de los contravientos en falla.

2.3.5 Trabe secundaria

Para el diseño de la trabe secundaria se emplea un método que parte de suponer una carga en etapa de construcción, así como una longitud efectiva en el proceso constructivo, en la práctica profesional se debe de colocar un puntal al centro del claro y mantenerlo en esa posición hasta que el firme de concreto alcance su resistencia máxima. Al colocar el puntal en el centro se logra disminuir el momento actuante y de esta manera utilizar una sección esbelta, que una vez que se coloca el sistema de piso actúa como sección compuesta y el momento resistente aumenta considerablemente.

Resistencia en flexión en sección simple.

$$F_R := 0.9 \quad L := 3.5 \text{ m}$$

$$q_u := 2000 \frac{\text{kg}}{\text{m}} \quad \text{Carga en etapa de construcción}$$

$$M_u := \frac{q_u \cdot L^2}{8} = 3.063 \text{ tonne} \cdot \text{m} \quad V_u := \frac{q_u \cdot L}{2} = 3.5 \text{ tonne}$$

$$S_{Req} := \frac{M_u}{F_R \cdot f_y} = 96.67 \text{ cm}^3$$

$$\delta_c := \frac{L}{480} + 5 \text{ mm} = 1.229 \text{ cm}$$

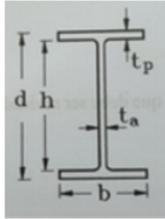
$$I_{Req} := \frac{5 \cdot q_u \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot \delta_c} = 1559.24 \text{ cm}^4$$

El primer paso para determinar la viga secundaria es realizar un análisis de cargas en etapa de construcción, para fines de este proyecto se propuso que la carga en etapa de construcción es igual a 2000 kg/m. Con las ecuaciones de la esquadria y la ecuación de la flecha máxima que permite la norma, se obtiene la Inercia mínima requerida.

Diseño de trabe secundaria
Acero A572 Gr. 50

IR 254 x 44.7

W10 x 30



$$d := 267 \text{ mm}$$

$$A := 57.1 \text{ cm}^2$$

$$S_x := 531 \text{ cm}^3$$

$$t_a := 7.7 \text{ mm}$$

$$I_x := 7076 \text{ cm}^4$$

$$S_y := 94 \text{ cm}^3$$

$$b := 148 \text{ mm}$$

$$I_y := 695 \text{ cm}^4$$

$$Z_x := 600 \text{ cm}^3$$

$$t_p := 13 \text{ mm}$$

$$r_x := 11.1 \text{ cm}$$

$$Z_y := 145 \text{ cm}^3$$

$$E := 2039000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$h := 225 \text{ mm}$$

$$r_y := 3.5 \text{ cm}$$

$$J := 26 \text{ cm}^4$$

$$L = 3.5 \text{ m}$$

$$f_y := 3520 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$G := 784000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$C_a := 111174 \text{ cm}^6$$

$$0.30 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 7.22 \quad \frac{b}{2 \cdot t_p} = 5.692$$

$$2.45 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 58.966 \quad \frac{h}{t_a} = 29.221$$

Patina Tipo 1

Alma Tipo 1

Se propone la sección que cumpla con la inercia mínima requerida en el sentido x y se evalúa el tipo de sección, a fin de ser congruentes con los parámetros de diseño de una estructura dúctil, se comprueba que se trata de una sección tipo 1 y se acepta.

Resistencia en Flexión

De acuerdo con las condiciones de apoyo se determina el uso del método de los 4 momentos descrito en la sección 6.2. de las (NTC-DCEA, 2023).

Método de los 4 momentos

$$M_{max} := 30$$

$$M_a := 20$$

$$M_b := 30$$

$$M_c := 20$$

$$C_b := \frac{12 \cdot M_{max}}{2.5 \cdot M_{max} + 3 \cdot M_a + 4 \cdot M_b + 3 \cdot M_c} = 1.143$$

$$L = 3.5 \text{ m}$$

$$M_e := \frac{C_b \cdot \pi}{L} \cdot \sqrt{(E \cdot I_y \cdot G \cdot J) + \left(\frac{\pi \cdot E}{L}\right)^2} \cdot I_y \cdot C_a = 24.007 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_p := Z_x \cdot f_y = 21.12 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_p \cdot \frac{2}{3} = 14.08 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_n := 1.15 \cdot M_p \cdot \left(1 - \frac{0.28 \cdot M_p}{M_e}\right) = 18.305 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_R := F_R \cdot M_n = 16.475 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

Cumple

Resistencia en cortante

Para determinar la resistencia a cortante de un perfil debemos de referirnos al capítulo 8.2 Resistencia en cortante de (NTC-DCEA, 2023), donde se debe de considerar el factor C_v en función de la geometría del perfil, en este caso se considera $K=5$ ya que no se proponen atiesadores inicialmente, evaluando la relación de h/t_a y comparando con las magnitudes mostradas en dicho inciso se determina el valor de C_v .

Resistencia en Cortante Sección Simple

$$V_n := 0.6 \cdot f_y \cdot A_a \cdot C_v$$

$$A_a := h \cdot t_a = 17.325 \text{ cm}^2$$

$$k_v := 5$$

$$\frac{h}{t_a} = 29.221 \qquad 1.10 \cdot \sqrt{\frac{k_v \cdot E}{f_y}} = 59.199 \qquad C_v := 1$$

$$V_n := 0.6 \cdot f_y \cdot A_a \cdot C_v = 36.59 \text{ tonne}$$

$$V_{actsec} := 16 \text{ tonne}$$

Cumple

Se compara el cortante resistente con el actuante en la trabe secundaria, este factor es el que rige la primera etapa del diseño de la viga, una vez que la sección propuesta satisface estas condiciones se debe de revisar la sección compuesta.

Sección compuesta

Para evaluar la sección compuesta primero se debe de seleccionar el sistema de piso, por ejemplo, en la práctica mexicana al utilizar estructuras de acero el sistema es de láminas de acero con una capa de compresión, común mente se conoce como losacero, para escoger cual lamina utilizar debemos de referirnos a los manuales de los proveedores, para este ejemplo se selecciona la losacero *Galvadeck 25* Cal.22.

Resistencia como Viga Compuesta

$$M_u := 29 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$V_u := 16.6 \text{ tonne}$$

$$F_R := 0.9$$

$$b_e := 2 \text{ m} \qquad f'_c := 250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \qquad E_c := 14000 \cdot \sqrt{f'_c \cdot \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} = 221359.436 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$a := \frac{A \cdot f_y}{b_e \cdot 0.85 \cdot f'_c} = 4.729 \text{ cm}$$

Losacero Galvadeck 25 Cal.22

$$e := 5 \text{ cm}$$

$$t := 6.3 \text{ cm}$$

$$F_R := 0.85$$

$$t_c := e + t = 11.3 \text{ cm}$$

$$e' := \frac{d}{2} + t_c - \frac{a}{2} = 22.285 \text{ cm}$$

$$T_r := A \cdot f_y = 200.992 \text{ tonne}$$

$$M_n := T_r \cdot e' = 44.792 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_R := F_R \cdot M_n = 38.073 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

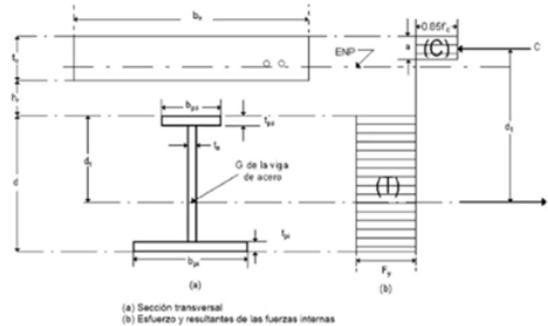


Figura 2.6. Esquema para calcular momentos en sección compuesta (De Buen, 1980).

En la literatura (De Buen, 1980) podemos encontrar un método para obtener el momento en sección compuesta, el cual se resumen en los cálculos antes mostrados. Y se comprueba que el momento resistente es mayor al actuante.

2.3.6 Diseño de columna

En la práctica mexicana se utilizan columnas tipo cajón cuadradas como columnas, por esta razón para el presente proyecto se propone utilizar sección cajón como columnas. De acuerdo con las demandas del modelo y a la combinación más desfavorable se debe de realizar una columna con placas soldadas. Además, debe de considerarse el efecto en carga vertical de la fuerza producida por la falla de uno de los contravientos, para que de esta manera se cumpla el diseño por capacidad.

El primer paso es determinar una sección que cumpla con las demandas, al ser un proceso iterativo a continuación se muestra la sección que satisface las demandas.

Columna en Flexo compresión
Placas 550 mm x 25.4 mm

Acero A572 Gr. 50

$$b := 600 \text{ mm} - 1 \text{ in} \quad t_p := 1 \text{ in} \quad h := b + t_p = 600 \text{ mm} \quad t_a := t_p = 25.4 \text{ mm}$$

$$A := (2 \cdot b \cdot t_p) + (2 \cdot h \cdot t_a) = 596.697 \text{ cm}^2$$

$$I_x := \left(\frac{t_p \cdot h^3}{12} \cdot 2 \right) + 2 \cdot \left(\left(\frac{b \cdot t_a^3}{12} \right) + \left(b \cdot t_p \cdot \left(\frac{h - t_p}{2} \right)^2 \right) \right) = 332532.318 \text{ cm}^4$$

$$S_x := \frac{I_x}{\frac{h}{2}} = 11084.411 \text{ cm}^3$$

$$Z_x := \left(2 \cdot b \cdot t_p \cdot \left(\frac{h - t_p}{2} \right) \right) + \left(2 \cdot \frac{h}{2} \cdot t_a \cdot \frac{h - 2 \cdot t_p}{4} \right) = 10478.647 \text{ cm}^3$$

$$r_x := \sqrt{\frac{I_x}{A}} = 23.607 \text{ cm}$$

$$C_a := 0$$

$$J_y := \frac{1}{3} \cdot \left((2 \cdot b \cdot t_p^3) + (2 \cdot h \cdot t_a^3) \right) = 1283.216 \text{ cm}^4$$

$$f_y := 3520 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad f_u := 4570 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \quad R_y := 1.1 \quad E := 2039000 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$L_{\text{real}} := 3.5 \text{ m}$$

La sección propuesta se revisa de acuerdo con lo estipulado en el capítulo 8 miembros bajo cargas combinadas, el primer paso es determinar los momentos de diseño que se obtienen del análisis modal espectral para la combinación más desfavorable.

Elementos Mecánicos (Para la combinación mas desfavorable)

$$M_{u_{\text{ox}A}} := 38 \text{ tonne} \cdot \text{m} \quad M_{u_{\text{oy}A}} := 3 \text{ tonne} \cdot \text{m} \quad P_u := F_{y_{b1}} + 640 \text{ tonne}$$

$$M_{u_{\text{ox}B}} := 72 \text{ tonne} \cdot \text{m} \quad M_{u_{\text{oy}B}} := 6 \text{ tonne} \cdot \text{m} \quad P_u = 931.694 \text{ tonne}$$

Momentos de Diseño

$$M'_{u_{\text{ox}}} := 72 \text{ tonne} \cdot \text{m} \quad M'_{u_{\text{oy}}} := 6 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

Para la carga axial de la combinación más desfavorable debe de sumarse la acción del contraviento en condición de falla en su componente vertical.

Para que el sistema estructural se comporte a lo esperado, debemos de asegurarnos que se trata de una sección compacta tipo 1.

Relaciones ancho grueso

Paredes de secciones HSS Rectangulares

Patines

$$1.12 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 26.956 \quad 1.40 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 33.695 \quad \frac{b}{t_p} = 22.622 \quad \text{Tipo 1}$$

Almas

$$2.42 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 58.244 \quad 5.70 \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 137.187 \quad \frac{h}{t_a} = 23.622 \quad \text{Tipo 1}$$

Al ser una columna de placas soldadas conviene revisar el pandeo local de las placas tanto como patín y alma, y de esta manera asegurarnos que placas nos fallaran localmente antes que globalmente.

Pandeo Local

Pandeo Local Patín

$$k := 4 \quad \sigma_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0.3^2)} \cdot \left(\frac{t_p}{b}\right)^2 \cdot k = 14404.245 \frac{kg}{cm^2}$$

Limite de Proporcionalidad

$$\frac{f_y}{2} = 1760 \frac{kg}{cm^2}$$

Corrección por inelasticidad

$$\sigma_{crelP} := f_y \cdot \left(1 - \frac{f_y}{4 \cdot \sigma_{cr}}\right) = 3304.952 \frac{kg}{cm^2}$$

Pandeo Local Alma

$$k := 4 \quad \sigma_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E}{12 \cdot (1 - 0.3^2)} \cdot \left(\frac{t_a}{h}\right)^2 \cdot k = 13210.5 \frac{kg}{cm^2}$$

Limite de Proporcionalidad

$$\frac{f_y}{2} = 1760 \frac{kg}{cm^2}$$

Corrección por inelasticidad

$$\sigma_{crelA} := f_y \cdot \left(1 - \frac{f_y}{4 \cdot \sigma_{cr}}\right) = 3285.52 \frac{kg}{cm^2} \quad F_R := 0.9$$

$$R_c := F_R \cdot \sigma_{crelA} \cdot A = 1764.413 \text{ tonne} \quad \text{Cumple}$$

Se compara el escenario más desfavorable en este caso es el alma de la columna y se evalúa la carga crítica de pandeo, y esta resulta ser mayor que la carga actuante por lo tanto se aceptan las placas.

Pandeo Global

Pandeo Global

$$K := 1 \quad F_e := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{K \cdot L_{real}}{r_x}\right)^2} = 91550.566 \frac{kg}{cm^2} \quad \lambda_c := \sqrt{\frac{f_y}{F_e}} = 0.196$$

$$n := 2.0 \quad F_R := 0.9 \quad \chi := \left(1 + \lambda_c^{2 \cdot n}\right)^{\frac{1}{n}} = 0.999$$

$$R_c := F_R \cdot \chi \cdot f_y \cdot A = 1888.94 \text{ tonne}$$

Cumple

Revisando el pandeo global de la columna con las ecuaciones antes descritas, se puede ver que la carga crítica de pandeo global y local son muy cercanas por lo tanto se acepta esta propuesta se columna.

Resistencia en flexión

Evaluando la columna por flexo torsión y flexo compresión es necesario obtener los momentos resistentes en ambos sentidos, siguiendo lo establecido en el capítulo 7 diseño por flexión de (NTC-DCEA, 2023) se determina el momento nominal en sentido X y Y.

Resistencia en Flexión en X

$$M_{px} := Z_x \cdot f_y = 368.848 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$\frac{2}{3} \cdot M_{px} = 245.899 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$C_{bx} := \left(0.6 - 0.4 \cdot \left(\frac{M_{uoxA}}{M_{uoxB}} \right) \right)^{-1} = 2.571 \quad C_{by} := \left(0.6 - 0.4 \cdot \left(\frac{M_{uoyA}}{M_{uoyB}} \right) \right)^{-1} = 2.5$$

$$C_b := 2.5$$

$$M_e := \frac{C_b \cdot \pi \cdot E}{L} \cdot \sqrt{I_y \cdot \left(\frac{J}{2.6} + \left(\frac{\pi}{L} \right)^2 \cdot C_a \right)} = 270.396 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_n := 1.15 \cdot M_{px} \cdot \left(1 - \frac{0.25 \cdot M_{px}}{M_e} \right) = 318.132 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_{RX} := M_n = 318.132 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

Resistencia en Flexión en Y

$$M_{ny} := f_y \cdot Z_x = 368.848 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

$$M_{ny1.6} := 1.6 \cdot f_y \cdot Z_x = 590.157 \text{ tonne} \cdot \text{m} \quad F_R = 0.9$$

$$M_{RY} := F_R \cdot M_{ny} = 331.964 \text{ tonne} \cdot \text{m}$$

Revisión bajo cargas combinadas

Con los momentos resistentes antes obtenidos, y siguiendo lo establecido capítulo 9 de las (NTC-DCEA, 2023).

Resistencia en Flexo compresión
Resistencia en secciones extremas

$$P_y := A \cdot f_y = 2100.373 \text{ tonne}$$

Superiores

$$\frac{P_u}{F_R \cdot P_y} + \frac{0.85 \cdot M_{uoxA}}{F_R \cdot M_{RX}} + \frac{0.6 \cdot M_{uoyA}}{F_R \cdot M_{RY}} = 0.612 \quad \text{SE ACEPTA}$$

$$\frac{0.85 \cdot M_{uoxA}}{F_R \cdot M_{RX}} + \frac{0.6 \cdot M_{uoyA}}{F_R \cdot M_{RY}} = 0.119 \quad \text{SE ACEPTA}$$

Inferiores

$$\frac{P_u}{F_R \cdot P_y} + \frac{0.85 \cdot M_{uoxB}}{F_R \cdot M_{RX}} + \frac{0.6 \cdot M_{uoyB}}{F_R \cdot M_{RY}} = 0.719 \quad \text{SE ACEPTA}$$

$$\frac{0.85 \cdot M_{uoxB}}{F_R \cdot M_{RX}} + \frac{0.6 \cdot M_{uoyB}}{F_R \cdot M_{RY}} = 0.226 \quad \text{SE ACEPTA}$$

Revisando las secciones superiores e inferiores se debe de garantizar en ambos casos que la suma de los cocientes sea menor a uno, si es así se acepta y pasa la revisión.

Con la ecuación 8.1.6 se revisa como columna completa y nuevamente debe de verificarse que la suma de los cocientes sea menor a la unidad.

Revisión como columna completa

$$\frac{P_u}{R_c} + \frac{M'_{uox}}{M_{RX}} + \frac{M'_{uoy}}{F_R \cdot M_{RY}} = 0.74 \quad \text{SE ACEPTA}$$

2.3.7 Resultados del análisis

Utilizando un software de cálculo estructural en este caso ETABS, se asignan las propiedades antes diseñadas con el fin de evaluar los desplazamientos y comportamiento de la estructura ante el espectro de diseño. Del software se obtiene que el periodo del modo 1 $T_1=1.051 s$, y debido a la estructuración el periodo del modo 2 es igual al del modo 1, $T_1=T_2=1.051 s$. Los resultados se muestran a continuación

Resultados del Análisis

$T_{1y} := 0.85 s$	$T_{2x} := 0.85 s$	Periodos de la Estructura	
$T_s := 1.2 s$	$K_s := 0.25$	$a_o := 302 \frac{cm}{s^2}$	$Q := 3$
$c := 816 \frac{cm}{s^2}$	$T_a := 0.8 s$	$T_b := 2 s$	$k := 0.366$
$p := k + (1 - k) \cdot \left(\frac{T_b}{T_{1y}}\right)^2 = 3.876$		$\beta := 0.2$	
$Q_y' := 1 + (Q - 1) \cdot \sqrt{\frac{\beta}{k}} = 2.478$			

El factor K_s se considera igual a 0.25 porque el periodo T_s es mayor a 1 segundo, con la ecuación 3.1.3 del capítulo 3 espectro para diseño sísmico de las (NTC-DS-17, 2017). Con la ecuación 3.4.1. se determina el valor de Q' en nuestro caso se seleccionó la ecuación donde el Periodo T está en los rangos $T_a < T < T_b$.

$$\begin{aligned}
 R_o &:= 2.0 \\
 k_1 &:= 1.0 \\
 k_{2y} &:= 0.5 \cdot \left(1 - \left(\frac{T_{1y}}{T_a} \right)^{0.5} \right) = -0.015 & k_{2x} &:= 0.5 \cdot \left(1 - \left(\frac{T_{2x}}{T_a} \right)^{0.5} \right) = -0.015 \\
 R_x &:= k_1 \cdot R_o + k_{2y} = 1.985 & R_y &:= k_1 \cdot R_o + k_{2x} = 1.985 \\
 R_x &= 1.985 & R_y &= 1.985
 \end{aligned}$$

El factor de sobre resistencia se calculó siguiendo lo establecido en el inciso 3.5 de la norma antes mencionada, se estableció el valor de $R_o=2$ porque se está considerando un valor de $Q=3$, y $k_l=1$ porque el sistema estructural tiene al menos 3 crujeas.

Se debe verificar cuáles son los desplazamientos en la estructura, y elaborar una pequeña hoja de cálculo como se muestra a continuación, los desplazamientos obtenidos en el software deben de ser multiplicados por los factores obtenidos anteriormente Q' y R , y realizar el análisis de las distorsiones, dividiendo el desplazamiento de entrepiso entre la altura del entrepiso. Y por último el valor obtenido se comprara con la tabla 4.2.2 de las normas, donde se especifica que para sistemas con contravientos concéntricos con $Q=3$ el límite de distorsión es 0.015.

Tabla 2.4. Análisis de distorsiones por nivel.

Nivel	h	Desp. X	Desp. Y	Q_x'	Q_y'	R_x	R_y	Dis X	Dis Y
	cm	cm	cm						
6	350	2.670	2.603	2.478	2.478	1.979	1.979	0.0044	0.0044
5	350	2.354	2.290	2.478	2.478	1.979	1.979	0.0061	0.0060
4	350	1.921	1.864	2.478	2.478	1.979	1.979	0.0074	0.0072
3	350	1.395	1.352	2.478	2.478	1.979	1.979	0.0075	0.0074
2	350	0.857	0.825	2.478	2.478	1.979	1.979	0.0075	0.0072
1	350	0.321	0.315	2.478	2.478	1.979	1.979	0.0045	0.0044

En la tabla 2.4. el termino Desp. X o Y se refiere a los desplazamientos de la estructura en cada nivel, y las dos columnas de la derecha es la distorsión, esta magnitud es menor al límite que marcan las normas de 0.015.

2.3.8 Resumen de resultados

A continuación, se muestran los resultados para los modelos de 6 niveles en ambas combinaciones, en las tablas 2.5 y 2.6, se indican las secciones finales del modelo para las

distintas configuraciones, además se hace notar la variación del periodo con respecto al tipo de sección en los contravientos.

Tabla 2.5. Modelo 6 Niveles V invertida

Nivel	Periodo	0.87 s	0.869 s	0.85 s	Viga Principal I
	Columnas	Contraviento OR	Contraviento I	Contraviento Angulo	
6	600 mm x 22.2 mm	178 mm x 12.7 mm	203 mm x 59.6 kg/m	203 mm x 22 mm	356 mm x 196.5 kg/m
5					
4					
3	600 mm x 25.4 mm	178 mm x 15.9 mm	203 mm x 71.5 kg/m	203 mm x 25.4 mm	
2					
1					

Tabla 2.6. Modelo 6 Niveles en X

Nivel	Periodo	0.92 s	0.926 s	0.907 s	Viga Principal I
	Columnas	Contraviento OR	Contraviento I	Contraviento Angulo	
6	600 mm x 22.2 mm	178 mm x 12.7 mm	203 mm x 59.6 kg/m	203 mm x 22 mm	356 mm x 122 kg/m
5					
4					
3	600 mm x 25.4 mm	178 mm x 15.9 mm	203 mm x 71.5 kg/m	203 mm x 25.4 mm	
2					
1					

El diseño de los elementos estructurales para ambas configuraciones V invertida y X es similar, la principal diferencia entre estos es las dimensiones de la trabe principal, esto se debe a que la trabe debe de resistir la descarga horizontal en la configuración V invertida de tal manera que, para la configuración en X este elemento resulta ser más ligero.

Tabla 2.7. Comparación entre configuración V invertida y X, contraviento OR

Nivel	Columnas		Contraviento OR		Periodo	
	Elemento	Capacidad columna completa	Elemento	Descarga F_y	V invertida	X
6	600 mm x 22.2 mm	0.398	178 mm x 12.7 mm	256 ton	0.87 s	0.92 s
5						
4						
3	600 mm x 25.4 mm	0.739	178 mm x 15.9 mm	292 ton		
2						
1						

Tabla 2.8. Comparación entre configuración V invertida y X, contraviento perfil I

Nivel	Columnas		Contraviento I		Periodo	
	Elemento	Capacidad columna completa	Elemento	Descarga F_y	V invertida	X
6	600 mm x 22.2 mm	0.373	203 mm x 59.6 kg/m	216 ton	0.869 s	0.926 s
5						
4	600 mm x 25.4 mm	0.725	203 mm x 71.5 kg/m	264 ton		
3						
2						
1						

Tabla 2.9. Comparación entre configuración V invertida y X, contraviento perfil ángulo

Nivel	Columnas		Contraviento L		Periodo	
	Elemento	Capacidad columna completa	Elemento	Descarga F_y	V invertida	X
6	600 mm x 22.2 mm	0.368	203 mm x 22 mm	206 ton	0.85 s	0.907 s
5						
4	600 mm x 25.4 mm	0.74	203 mm x 25.4 mm	295 ton		
3						
2						
1						

En las tablas 2.7, 2.8 y 2.9, se hace una comparación entre las dos configuraciones V invertida y X en función del periodo, además al ser las mismas secciones de contravientos en ambas configuraciones, se indica la descarga vertical F_y que es transmitida a la columna de tal manera que se logre justificar el dimensionamiento de las columnas.

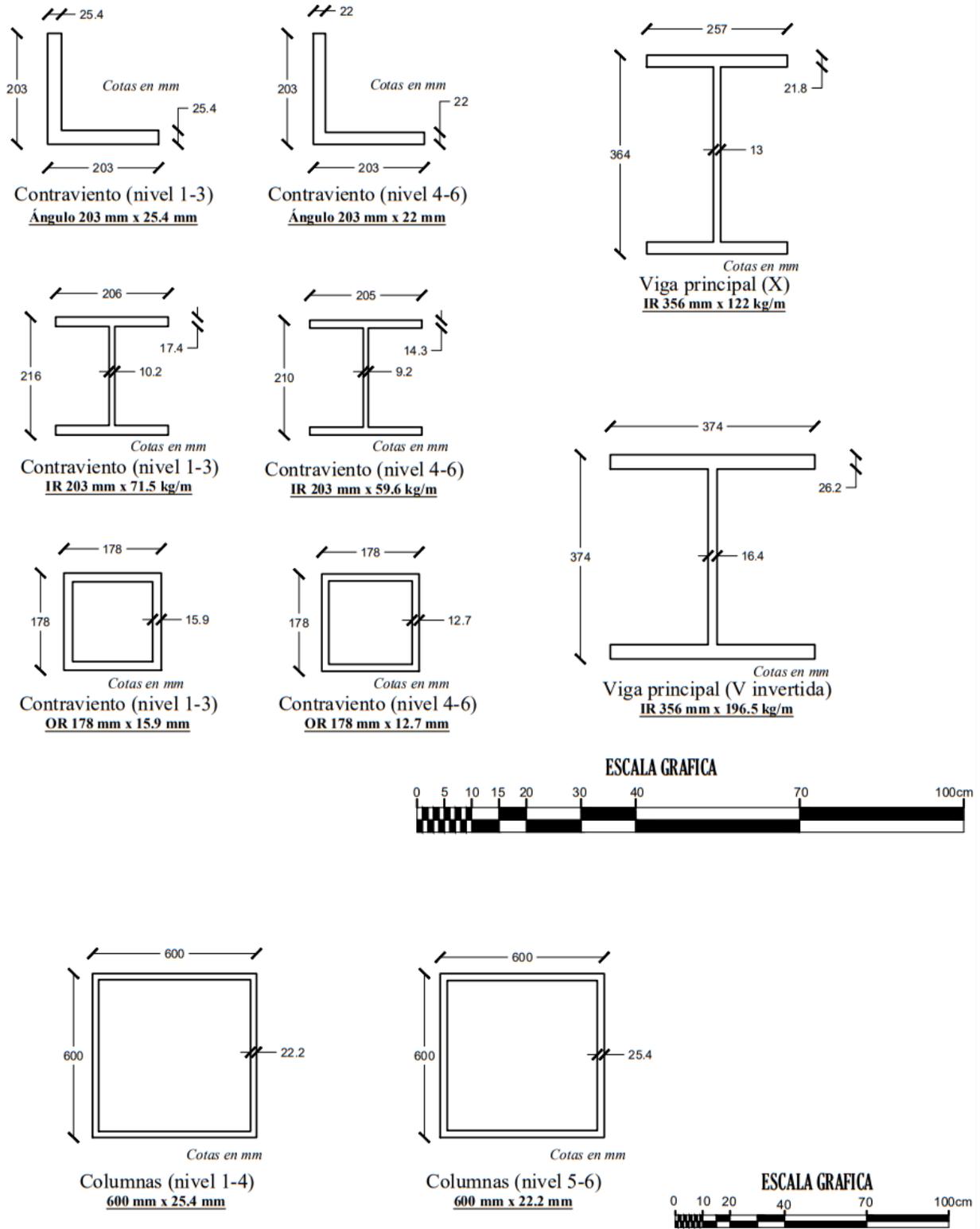


Figura 2.7. Elementos estructurales para el modelo de 6 niveles.

2.4 Conclusiones

En este capítulo se discute el proceso de diseño por capacidad para marcos con contravientos concéntricos, de 6 niveles, en configuración V invertida y X, manteniendo un ángulo de inclinación constante en los modelos de 45 grados.

En el diseño por capacidad, se establece que el eslabón más débil son los contravientos, después las vigas y por último las columnas, de tal manera que si llegaran a fallar los contravientos las vigas resistan las cargas generadas por los contravientos.

La diferencia entre la configuración en V invertida y en X radica en el diseño y capacidad de las trabes principales donde se conectan los contravientos concéntricos, al ser una configuración en X a cada dos niveles, la descarga que generan los contravientos es resistida por los mismos contravientos del nivel superior e inferior, esto hace posible que se pueda tener una trabe más esbelta a comparación de la configuración en V invertida.

Para la configuración en V invertida el elemento que resiste la descarga de los contravientos son las trabes principales, de esta manera debe de garantizarse que una vez que fallen los contravientos este elemento resista dicha descarga lo que genera un perfil con una capacidad mayor que en la configuración en X.

En general, los edificios bajos están gobernados por resistencia y los edificios altos están gobernados por rigidez.

Para el modelo de 6 niveles la capacidad de los contravientos a compresión oscila en magnitudes de 210 ton a 250 ton, sin embargo, las demandas están alrededor de 150 ton, se podría deducir que los elementos seleccionados están sobrados, sin embargo, es necesario que tengan esa capacidad para cumplir con los límites de distorsión.

Capítulo 3. Análisis no lineal

RESUMEN

En el presente capítulo se describe el procesamiento de las señales, estas fueron obtenidas en distintos puntos de la Ciudad de México a causa del sismo del 19 de septiembre de 2017, en total se obtuvieron 130 registros, de los cuales se seleccionaron 40 para el modelo de 6 niveles. Así mismo se describe el modelo matemático a través de scripts del software *OpenSees* (Mazzoni *et al.* 2006), y se valida partiendo del comportamiento de los contravientos.

Se llegó a la conclusión de que, los perfiles utilizados IR, OR y ángulo tienen un comportamiento similar, es decir, cuentan con una primera etapa elástica, alcanzan un pandeo global y después un post-pandeo global, llegando al final del primer ciclo con la carga de fluencia. La carga de pandeo global y las cargas de post-pandeo posteriores dependen de la relación de esbeltez del perfil y del número de ciclos. Si la relación de esbeltez es muy pequeña la carga de pandeo es muy similar a R_c .

Capítulo 3. Análisis no lineal

3.1 Descripción

En el presente capítulo se describe el procesamiento de las señales, se trata de acelerogramas en función del tiempo, estas fueron obtenidas en distintos puntos de la Ciudad de México a causa del sismo del 19 de septiembre de 2017, en total se obtuvieron 130 registros, de los cuales se seleccionaron 40 para el modelo de 6 niveles. Así mismo se describe el modelo matemático a través de scripts del software *OpenSees* (Mazzoni et al. 2006), y se valida partiendo del comportamiento de los contravientos.

3.2. Selección de las señales

El primer paso es procesar las señales, para esto se utilizó el *software PRISM* con el objetivo de generar espectros de aceleración para cada uno de los registros. Como se puede ver en las siguientes imágenes, se debe de importar la señal y configurar las unidades; posteriormente, correr el programa y generar el espectro de aceleración.

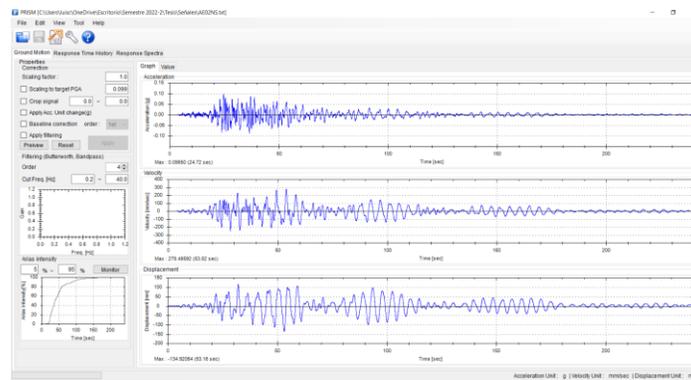


Figura 3.1. Registro de la señal AE02NS, en orden superior a inferior, aceleración, velocidad y desplazamiento.

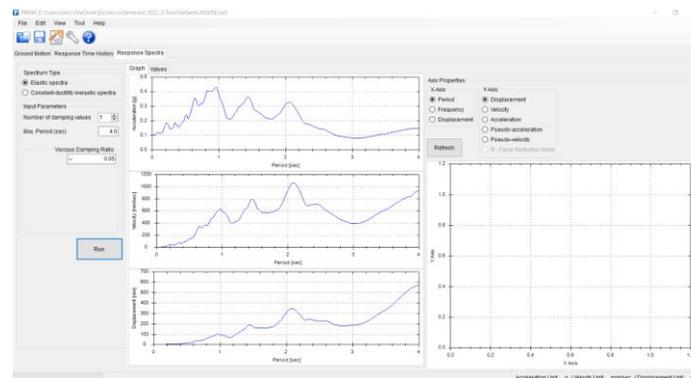


Figura 3.2. Espectros para la señal AE02NS, en orden superior a inferior, aceleración, velocidad y desplazamiento.

Una vez generado el espectro de aceleración, se toman las magnitudes de este y se grafican comparándolo con el espectro elástico sin reducir del lugar, la ubicación es: Latitud: 19.4231084, Longitud: -99.144765, la dirección del predio es Avenida Paseo de la Reforma 510, Juárez, Ciudad de México, CDMX, México. En la siguiente figura se muestra el espectro elástico, y el periodo de la estructura de 6 niveles.

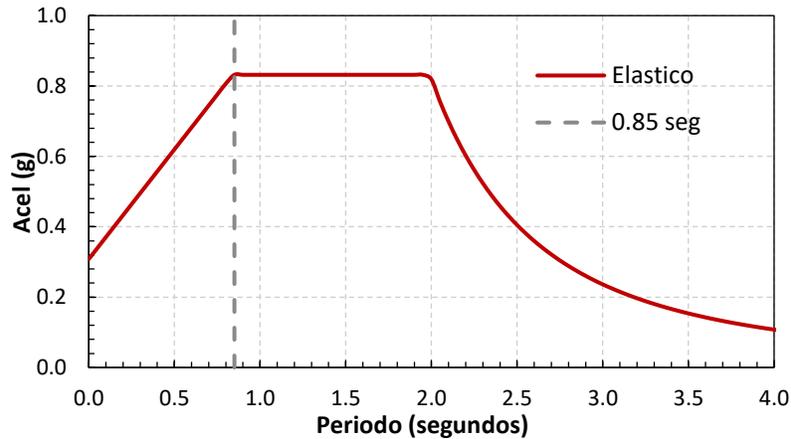


Figura 3.3. En color rojo el espectro elástico sin reducir del lugar de estudio, en color azul con línea punteada $T_1=0.85s$ del modelo de 6 niveles.

La grafica del espectro elástico sin reducir y la ubicación del periodo en esta, nos ayuda a preestablecer la forma y la tendencia que deben de tener las señales a seleccionar. En un principio se trata de seleccionar señales que sigan una tendencia ascendente uniforme tal como se muestra en la pendiente del espectro elástico sin reducir. Por ejemplo, en la siguiente imagen podemos notar claramente esta tendencia, se trata de la señal AE02NS, si bien las señales son aleatorias y algunas tienen sus magnitudes máximas en la parte creciente del espectro, se deben de seleccionar las que en un principio no rebasen el espectro elástico, para que al aplicar un factor de escala esta pueda generar una intersección en la zona de interés.

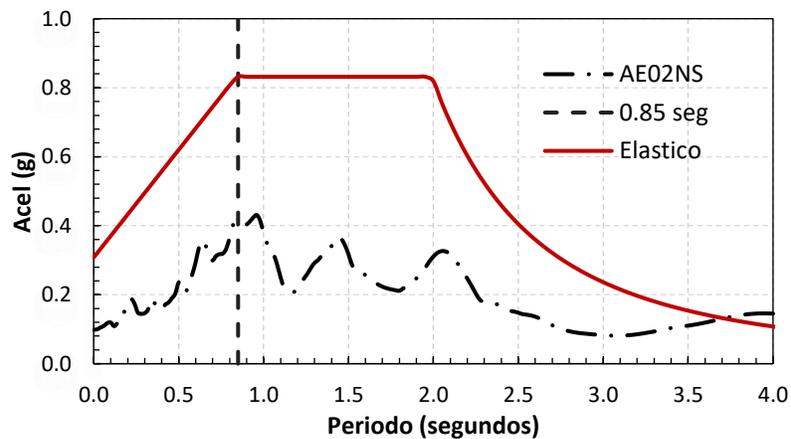


Figura 3.4. Se complementa la gráfica con el espectro de aceleración de la señal AE02NS.

Se trata de obtener el factor que, al multiplicarlo por la señal, coinciden los puntos A y B de la gráfica anterior, como ejemplo tomaremos la señal AE02NS las coordenadas del punto A (0.85, 0.832) corresponden a la intersección de la línea punteada azul con el espectro elástico en color rojo y del punto B (0.85, 0.399) se refiere a la intersección entre la línea punteada y el espectro de la señal AE02NS.

$$0.399 x = 0.832$$

$$x = \frac{0.832}{0.399} = 2.085$$

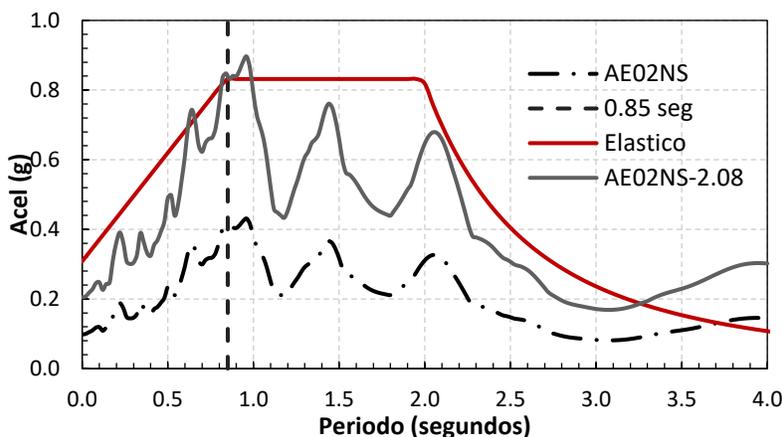


Figura 3.5. En color negro la señal AE02NS sin factor y en color azul la misma señal multiplicada por el factor de 2.08.

Se deberán de procesar los 130 registros disponibles, obtener el espectro de aceleración, graficarlos y compararlos con el espectro elástico sin reducir, por indicaciones del profesor se seleccionaron 40 señales.

En el ejemplo anterior se utilizó la señal AE02NS, el espectro de aceleración generado en color negro en la figura 18, a grandes rasgos de 0 a 1 segundo tiene un incremento con tendencia uniforme, de 1 a 2 segundos se tienen 3 picos máximos y de 2 segundos en adelante tiende a disminuir. Es decir, esta señal tiene una tendencia favorable para el estudio ya que, al multiplicarlo por el factor de escala es muy cercana al espectro elástico. Sin embargo, esto no sucederá en todos los casos; por ejemplo, las señales que reportan los máximos en el periodo igual a un segundo y conforme aumenta el tiempo estos disminuyen. En esta investigación esa tendencia se consideró como un criterio para descartar la señal.

El siguiente paso es graficar todas las señales y seleccionarlas comparándolas con el espectro elástico sin reducir. Se seleccionarán 40 señales para analizar el modelo de 6 niveles, pese a que se tiene una base de 130 registros.

3.2.1 Señales Modelo 6 Niveles

En la figura 3.6. se muestran los espectros de respuesta que se seleccionaron para el modelo de 6 pisos. Los espectros no incluyen factor de escalamiento, sino que se pretende analizar su posible uso para excitar el modelo. Se compara contra el espectro de diseño considerado en el capítulo 2 de esta investigación y se hace énfasis en el periodo fundamental de vibrar igual a $T_I = 0.85$ s.

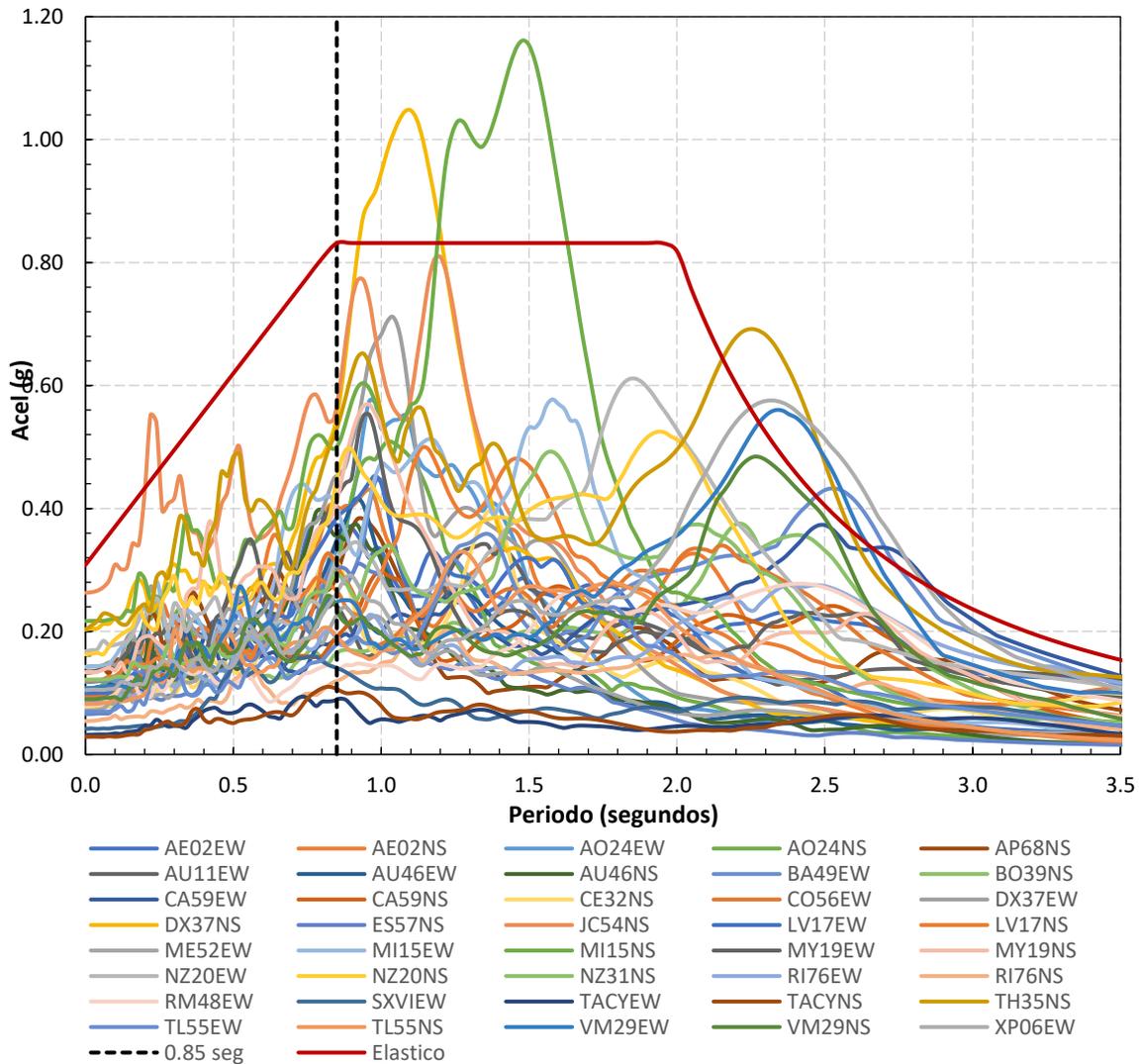


Figura 3.6. Espectro elástico sin reducir, $T_I = 0.85$ s y 40 señales sin factor para el modelo de 6 niveles.

En la figura 3.6. se aprecian las señales sin factor que se seleccionaron para el modelo de 6 niveles, las señales corresponden a los espectros de aceleración. En la figura 3.7. se muestran

las señales, multiplicadas por el factor correspondiente de tal manera que se genere una intersección en punto de interés.

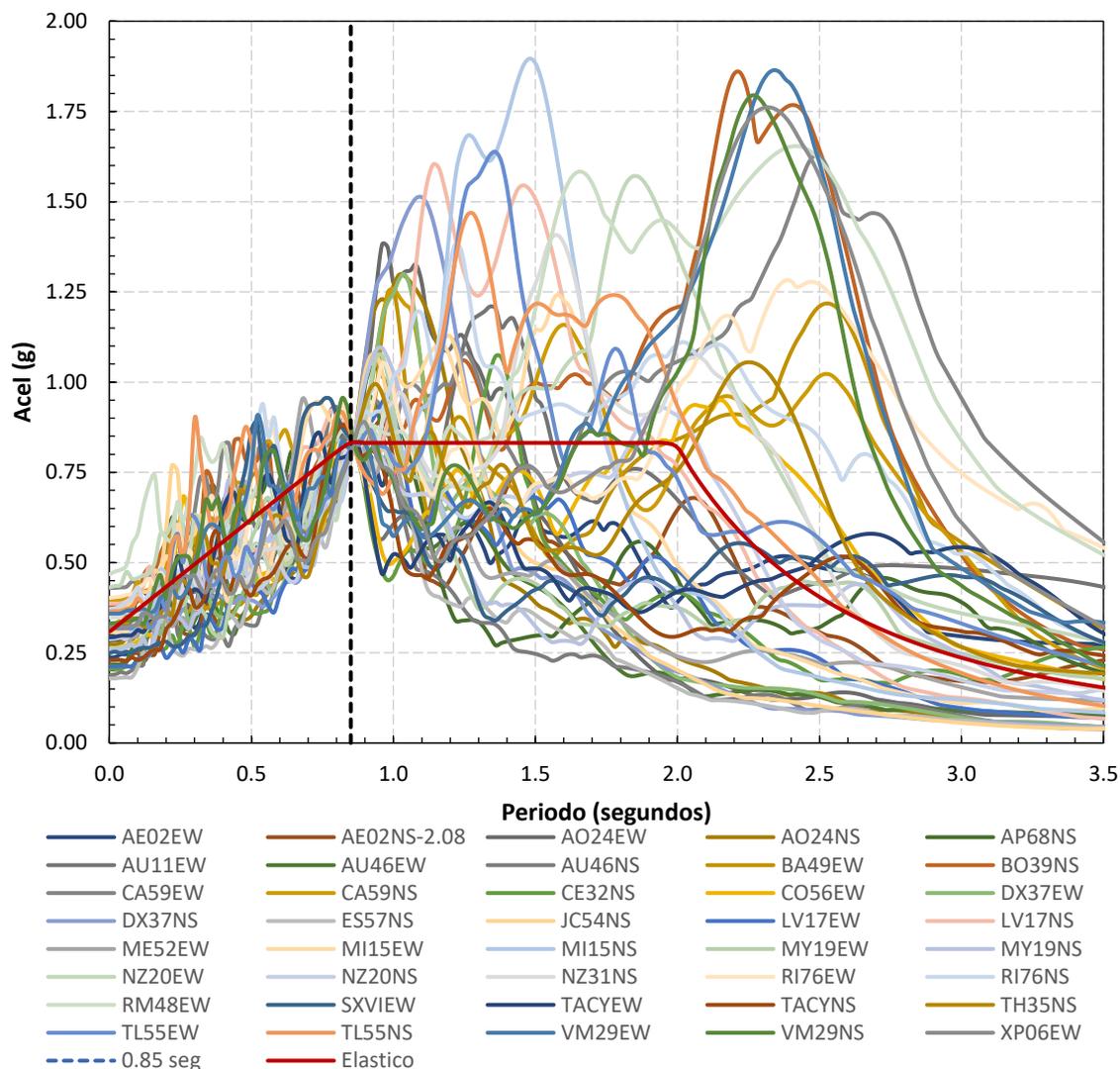


Figura 3.7. Señales escaladas y ajustadas para $T_I = 0.85$ s

A continuación, en la tabla 3.1, se hace un resumen de las señales seleccionadas la dirección y el factor de escala por el que se multiplicó cada señal.

Tabla 3.1. Acelerogramas seleccionados para los modelos de 6 niveles.

No.	Nombre de estación	Clave	Dirección	Factor de escala	S_a max (kg/cm ²)
1	Esc. Prim. "González Garzón"	AE02	EW	2.23	378.15
2		AE02	NS	2.08	422.80
3	Alberca olímpica	AO24	EW	2.40	564.01
4		AO24	NS	2.55	499.03

5		AP68	NS	2.71	375.68
6	Autódromo	AU11	EW	3.54	335.46
7	Esc. Sec. Téc. No. 14	AU46	EW	2.30	408.94
8		AU46	NS	2.34	389.70
9	Buenos aires	BA49	EW	2.82	437.63
10	Bondoquito	BO39	NS	4.96	367.92
11	Candelaria	CA59	EW	4.36	365.81
12		CA59	NS	4.24	291.38
13		CE32	NS	2.72	386.80
14	Esc. Sec. Téc. No. 18	CO56	EW	2.80	332.75
15	Dgcoh Xotepingo	DX37	EW	1.83	698.00
16		DX37	NS	1.44	1027.76
17	Escandón	ES57	NS	2.73	303.57
18	Parque jardines de Coyoacán	JC54	NS	1.39	793.87
19	Lindavista	LV17	EW	2.13	444.58
20		LV17	NS	3.21	489.86
21	Esc. Sec. Téc. "Rafael Dondé"	ME52	EW	3.55	263.55
22	Miramontes	MI15	EW	2.15	566.35
23		MI15	NS	1.63	1139.41
24	Meyehualco	MY19	EW	1.94	541.79
25		MY19	NS	1.92	558.18
26	Nezahualcóyotl	NZ20	EW	2.57	599.52
27		NZ20	NS	1.77	515.04
28		NZ31	NS	2.86	482.68
29		RI76	EW	4.64	270.83
30		RI76	NS	6.86	197.99
31	Esc. Prim. "Rodolfo Menéndez"	RM48	EW	5.96	272.31
32		SXVI	EW	6.00	156.20
33		TACY	EW	9.17	91.88
34		TACY	NS	8.02	107.89
35	Tláhuac	TH35	NS	1.52	678.51
36	Tlatelolco	TL55	EW	4.57	351.94
37		TL55	NS	4.45	323.27
38	Villa del mar	VM29	EW	3.33	549.74
39		VM29	NS	3.71	474.87
40	Jardín de niños "Xochipilli"	XP06	EW	3.06	564.75

3.3 Modelo *OpenSees*

3.3.1 Introducción

Open System for Earthquake Engineering Simulation (OpenSees) (Mazzoni et al. 2006) es un software que se utiliza para simular el desempeño de sistemas estructurales y geotécnicos sujetos a terremotos. Su objetivo es mejorar el modelado y simulación computacional en ingeniería sísmica a través de un código abierto. Este software fue patrocinado por *Pacific Earthquake Engineering Research Center*. Se realizaron análisis no lineales siguiendo los criterios de modelado de estudios previos (Tapia y López. 2022). Se modelaron elementos estructurales discretizados en fibras, siguiendo los criterios que se recomiendan en (López 2021).

3.3.2. Descripción

El software *OpenSees* carece de una interfaz gráfica a comparación de los softwares comerciales, a pesar de que el código de *OpenSees* fue definido originalmente en lenguaje C++, se debe combinar el uso de comando preestablecidos, estos llaman procedimientos para la definición y análisis del modelo, con instrucciones en *TCL (Tool Command Language)* (Velasco y Guerrero. 2020)

El primer paso para elaborar el modelo de análisis no lineales en *OpenSees*, es introducir un contador de tiempo, para esto se utiliza la función *TiempoInicio* en milisegundos, se definen el número de dimensiones y el número de grados de libertad con la función *model BasicBuilder*.

```
# Introduce un contador de tiempo
set TiempoInicio [clock Crick -milliseconds]

model BasicBuilder -ndm 2 -ndf 3;
```

Los archivos *HSSsection2D.tcl* y *WSection2D.tcl* son las subrutinas que ayudan a definir las propiedades de los perfiles OC e IPR.

```
source HSSsection2D.tcl
source WSection2D.tcl

# Parámetros del análisis sísmico
set AnalysisTimeStep 0.01
set EntriesEq_deltaTime 0.01
set NbrOfEqEntries 24003
set IncrementalFactor 2.230
set TorsionFactor 1.000
set g 1.0
set EQ_File "AE02EW.txt"
set EQ_Time [expr $NbrOfEqEntries*$EntriesEq_deltaTime]
```

En los parámetros del análisis sísmico se define el intervalo de tiempo de los análisis, para los archivos fuente de las señales *AE02EW.txt*, se define el intervalo de tiempo, el número de pasos y el factor de incremento que se determinó en el capítulo anterior.

El segundo paso fue definir los nodos de la estructura, en función de las dimensiones de los marcos del contraviento. A continuación, se muestra la configuración y numeración de los nodos del modelo.

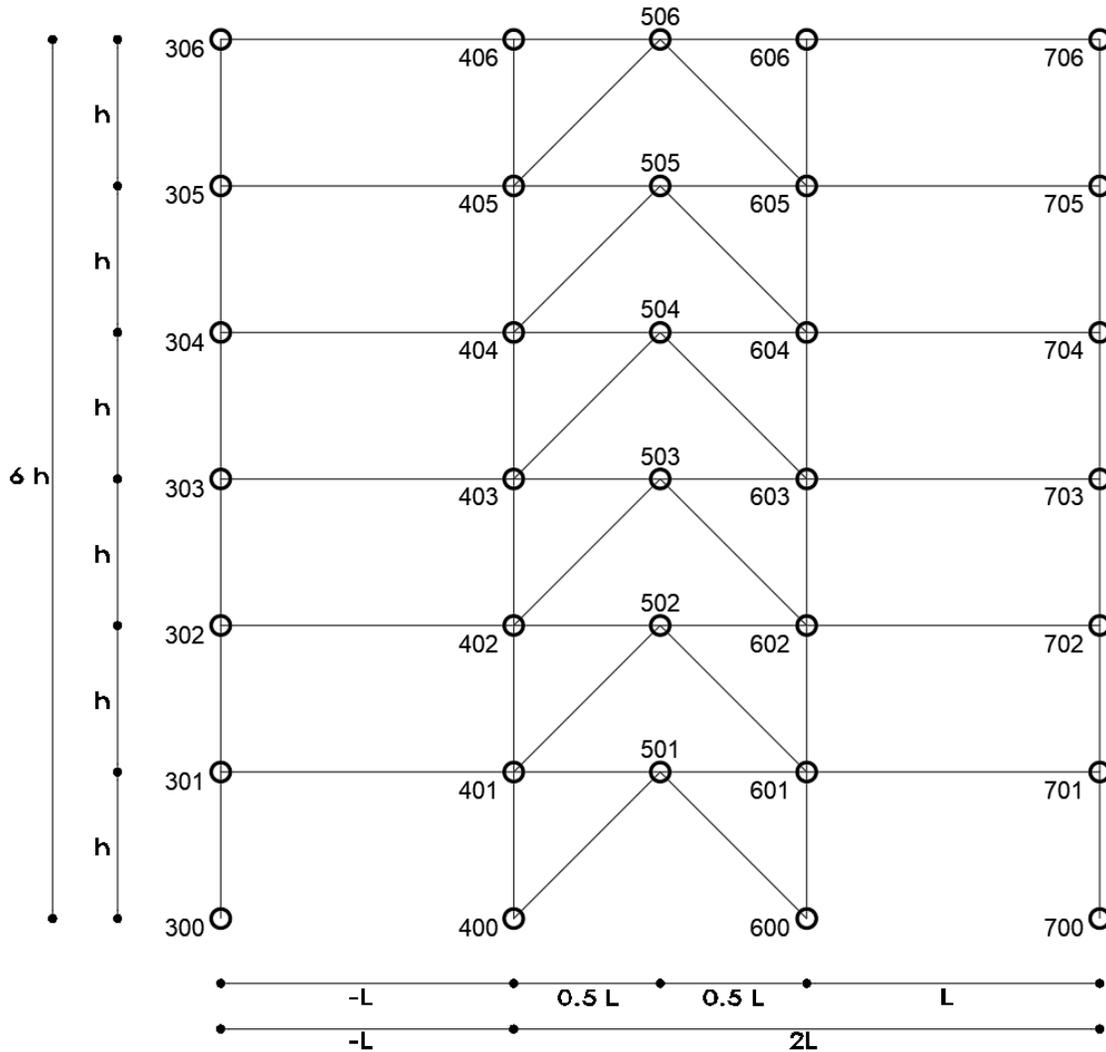


Figura 3.8. Numeración y ubicación de los nodos, para el modelo de 6 niveles y configuración en V invertida.

Se definieron los nodos en función de la configuración de la estructura, es decir, los nodos de la primera columna van del nodo 300 a 306, 300 para el apoyo de la columna y de acuerdo con el nivel, por ejemplo 306 para el nivel 6. y para definir las columnas de izquierda a derecha, 300, 400, 500, 600, 700 respectivamente.

Se estableció un sistema de coordenadas, en el eje horizontal L y en el vertical h , teniendo como punto central el nodo 400, las literales L y h corresponden a el ancho y altura del marco respectivamente.

A continuación, se muestra parte del código en donde se definen los nodos del proyecto. Se hace énfasis que los nodos quedan en función de L y h.

```

node 300 [expr -1.0*$L] 0.;
node 400 0. 0.;
node 500 [expr 0.5*$L] 0.;
node 600 [expr 1. *$L] 0.;
node 700 [expr 2. *$L] 0.;

node 301 -$L $h -mass [expr $m1/$Nn] 0.01 0.;
node 401 0. $h -mass [expr $m1/$Nn] 0.01 0.;
node 501 [expr 0.5*$L] $h -mass [expr $m1/$Nn] 0.01 0.;
node 601 [expr 1. *$L] $h -mass [expr $m1/$Nn] 0.01 0.;
node 701 [expr 2. *$L] $h -mass [expr $m1/$Nn] 0.01 0.;

node 302 -$L [expr 2. *$h] -mass [expr $m2/$Nn] 0.01 0.;
node 402 0. [expr 2. *$h] -mass [expr $m2/$Nn] 0.01 0.;
node 502 [expr 0.5*$L] [expr 2. *$h] -mass [expr $m2/$Nn] 0.01 0.;
node 602 [expr 1. *$L] [expr 2. *$h] -mass [expr $m2/$Nn] 0.01 0.;
node 702 [expr 2. *$L] [expr 2. *$h] -mass [expr $m2/$Nn] 0.01 0.;

node 303 -$L [expr 3. *$h] -mass [expr $m3/$Nn] 0.01 0.;
node 403 0. [expr 3. *$h] -mass [expr $m3/$Nn] 0.01 0.;
node 503 [expr 0.5*$L] [expr 3. *$h] -mass [expr $m3/$Nn] 0.01 0.;
node 603 [expr 1. *$L] [expr 3. *$h] -mass [expr $m3/$Nn] 0.01 0.;
node 703 [expr 2. *$L] [expr 3. *$h] -mass [expr $m3/$Nn] 0.01 0.;

node 304 -$L [expr 4. *$h] -mass [expr $m4/$Nn] 0.01 0.;
node 404 0. [expr 4. *$h] -mass [expr $m4/$Nn] 0.01 0.;
node 504 [expr 0.5*$L] [expr 4. *$h] -mass [expr $m4/$Nn] 0.01 0.;
node 604 [expr 1. *$L] [expr 4. *$h] -mass [expr $m4/$Nn] 0.01 0.;
node 704 [expr 2. *$L] [expr 4. *$h] -mass [expr $m4/$Nn] 0.01 0.;

node 305 -$L [expr 5. *$h] -mass [expr $m5/$Nn] 0.01 0.;
node 405 0. [expr 5. *$h] -mass [expr $m5/$Nn] 0.01 0.;
node 505 [expr 0.5*$L] [expr 5. *$h] -mass [expr $m5/$Nn] 0.01 0.;
node 605 [expr 1. *$L] [expr 5. *$h] -mass [expr $m5/$Nn] 0.01 0.;
node 705 [expr 2. *$L] [expr 5. *$h] -mass [expr $m5/$Nn] 0.01 0.;

node 306 -$L [expr 6. *$h] -mass [expr $m6/$Nn] 0.01 0.;
node 406 0. [expr 6. *$h] -mass [expr $m6/$Nn] 0.01 0.;
node 506 [expr 0.5*$L] [expr 6. *$h] -mass [expr $m6/$Nn] 0.01 0.;
node 606 [expr 1. *$L] [expr 6. *$h] -mass [expr $m6/$Nn] 0.01 0.;
node 706 [expr 2. *$L] [expr 6. *$h] -mass [expr $m6/$Nn] 0.01 0.;

```

Una vez definidos los nodos principales se definen zonas rígidas en los extremos de las columnas de cada nivel. La ubicación de estas está en función del peralte de la trabe y de la placa de conexión.

```

node 40011 [expr 0. *$L] [expr 1. *$h-$P_trabe-$H_placa];
node 40012 [expr 0. *$L] [expr 1. *$h+$P_trabe+$H_placa];

node 40021 [expr 0. *$L] [expr 2. *$h-$P_trabe-$H_placa];

```

```

node 40022 [expr 0. *$L] [expr 2. *$h+$P_trabe+$H_placa];

node 40031 [expr 0. *$L] [expr 3. *$h-$P_trabe-$H_placa];
node 40032 [expr 0. *$L] [expr 3. *$h+$P_trabe+$H_placa];

node 40041 [expr 0. *$L] [expr 4. *$h-$P_trabe-$H_placa];
node 40042 [expr 0. *$L] [expr 4. *$h+$P_trabe+$H_placa];

node 40051 [expr 0. *$L] [expr 5. *$h-$P_trabe-$H_placa];
node 40052 [expr 0. *$L] [expr 5. *$h+$P_trabe+$H_placa];

node 40061 [expr 0. *$L] [expr 6. *$h-$P_trabe-$H_placa];

```

La numeración de los nodos para las zonas rígidas está definida en la figura 3.9. donde solo se definen estas zonas para las columnas.

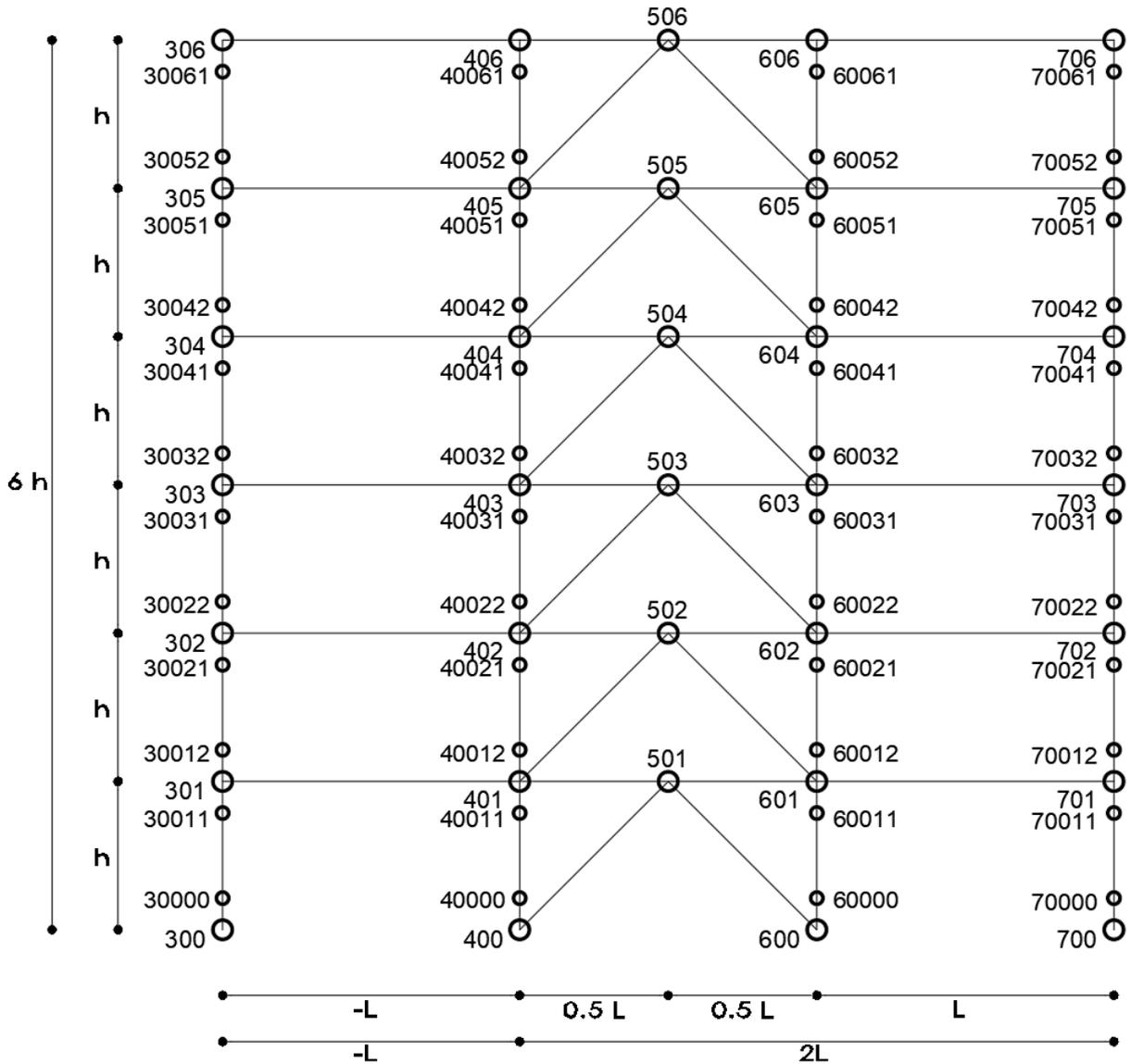


Figura 3.9. Numeración y ubicación de nodos de zonas rígidas en columnas.

En los análisis se supusieron pandeos globales iniciales al centro del claro del contraviento provocados por la carga en compresión en los niveles 2, 4 y 6, se realizó para evaluar la estabilidad global y la respuesta inelástica ante esta condición.

Esta condición inicial se incluyó en el modelo siguiendo lo estudiado en (Tapia y López, 2020) donde de acuerdo con los cálculos, la deformación inicial al centro del contraviento resulta ser aproximadamente igual a $L/25$.

```

set pandeo [expr $Lc/500.0];          # Pandeo inicial.
set pandeo1 [expr $Lc/25.0];         # Pandeo inicial.

# CV entre eje 4 y 5 N_01
node 4011 0. 0.
node 4012 [expr 0.5*$L/2.0-$pandeo*cos($beta) [expr
$h/2.0+$pandeo*sin($beta) ]
node 4013 [expr 0.5*$L] $h
# CV entre eje 5 y 6 N_01
node 5011 [expr 1. *$L] 0.0
node 5012 [expr 0.5*$L+0.5*$L/2.0+$pandeo*cos($beta) ] [expr
$h/2.0+$pandeo*sin($beta) ]
node 5013 [expr 0.5*$L] $h

# CV entre eje 4 y 5 N_02
node 4021 [expr 0.0*$L] $h
node 4022 [expr 0.5*$L/2.0+$pandeo1*cos($beta) ] [expr
$h+$h/2.0+$pandeo1*sin($beta) ]
node 4023 [expr 0.5*$L] [expr 2. *$h]
# CV entre eje 5 y 6 N_02
node 5021 [expr 1. *$L] $h
node 5022 [expr 0.5*$L+0.5*$L/2.0-$pandeo1*cos($beta) ] [expr
$h+$h/2.0+$pandeo1*sin($beta) ]
node 5023 [expr 0.5*$L] [expr 2. *$h]

```

En el script anterior se incluyen los contravientos de los dos primeros niveles a manera de ejemplo, se muestra la manera en la que se incluye el pandeo global inicial, se define como pandeo1 la función $L/25$, en el ejemplo el pandeo global se incluye en el nivel 2. Como se mencionó anteriormente el pandeo global inicial se supuso en los niveles 2, 4 y 6 de tal manera que se tiene que realizar este cambio en el nivel correspondiente del contraviento.

Los nodos extremos de los contravientos coinciden con la intersección de las columnas de los ejes 400 y 600 con las trabes, y la intersección de los contravientos en el eje 500, la distancia del eje 400 a eje 500 es de $0.5 L$. En la figura 3.10 los nodos extremos de los contravientos se muestran desfasados a pesar de estar en la misma posición, con el fin de dejar clara la descripción.

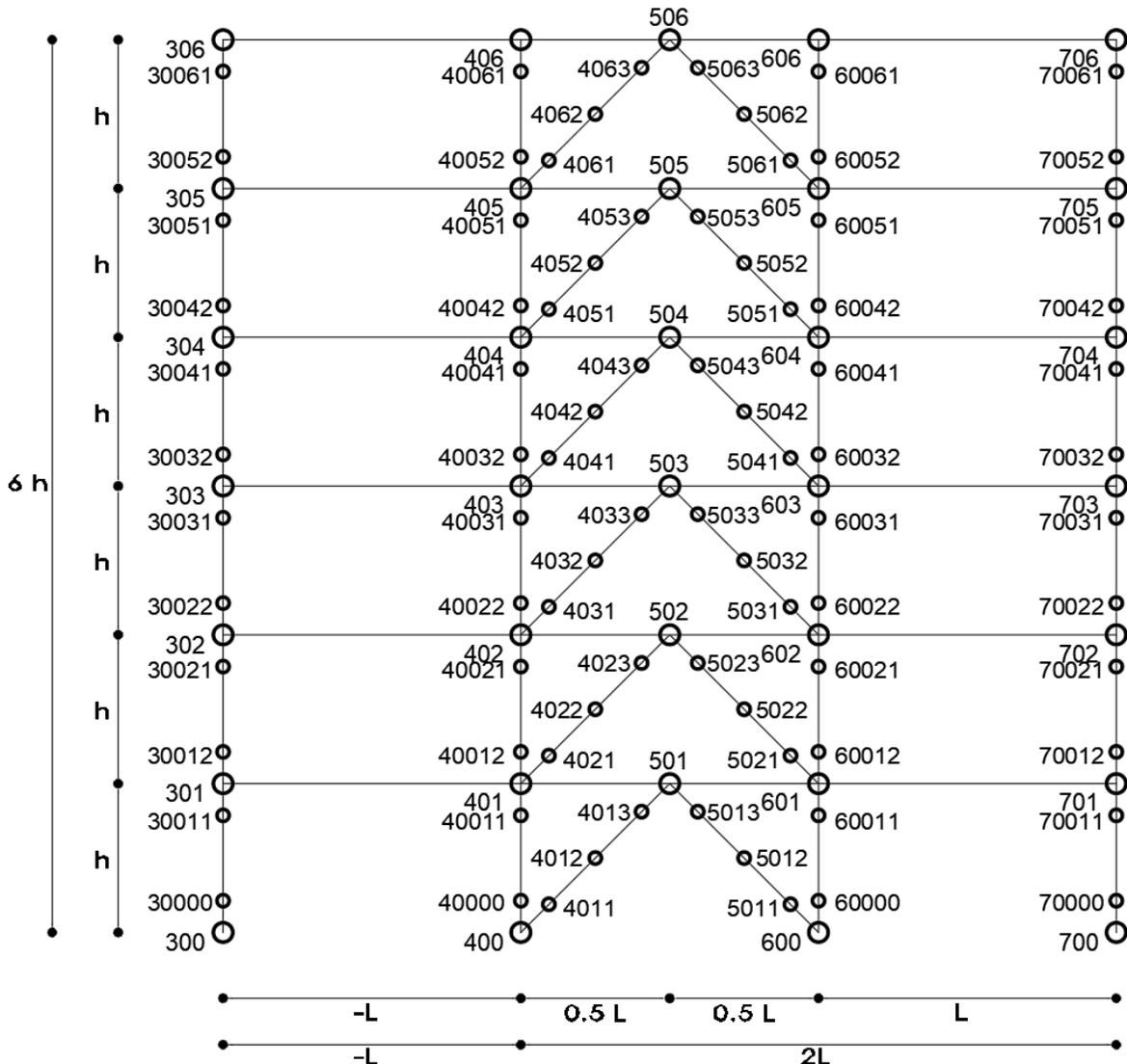


Figura 3.10. Numeración y ubicación de nodos de zonas rígidas en columnas y nodos en los contravientos en configuración V invertida.

La configuración de los nodos de los contravientos en configuración X quedaría de la siguiente forma, nodo intermedio de todos los contravientos queda igual en ambas configuraciones, el ajuste se realiza en los niveles 2, 4 y 6. A manera de ejemplo se muestra parte del script de la configuración en X.

```
# CV entre eje 4 y 5 N_01
node 4011 0. 0.
node 4012 [expr 0.5*$L/2.0-$pandeo*cos($beta)] [expr
$h/2.0+$pandeo*sin($beta)]
node 4013 [expr 0.5*$L] $h
# CV entre eje 5 y 6 N_01
node 5011 [expr 1.*$L] 0.0
node 5012 [expr 0.5*$L+0.5*$L/2.0+$pandeo*cos($beta)] [expr
$h/2.0+$pandeo*sin($beta)]
node 5013 [expr 0.5*$L] $h
```

```

# CV entre eje 4 y 5 N_02
node 4021 [expr 0.5*$L] $h
node 4022 [expr 0.5*$L/2.0+$pandeo1*cos($beta)] [expr
$h+$h/2.0+$pandeo1*sin($beta)]
node 4023 [expr 0.0*$L] [expr 2.*$h]
# CV entre eje 5 y 6 N_02
node 5021 [expr 0.5*$L] $h
node 5022 [expr 0.5*$L+0.5*$L/2.0-$pandeo1*cos($beta)] [expr
$h+$h/2.0+$pandeo1*sin($beta)]
node 5023 [expr 1.0*$L] [expr 2.*$h]

```

En la figura 3.11. se muestra la configuración de los nodos del modelo para la estructura con contravientos en X.

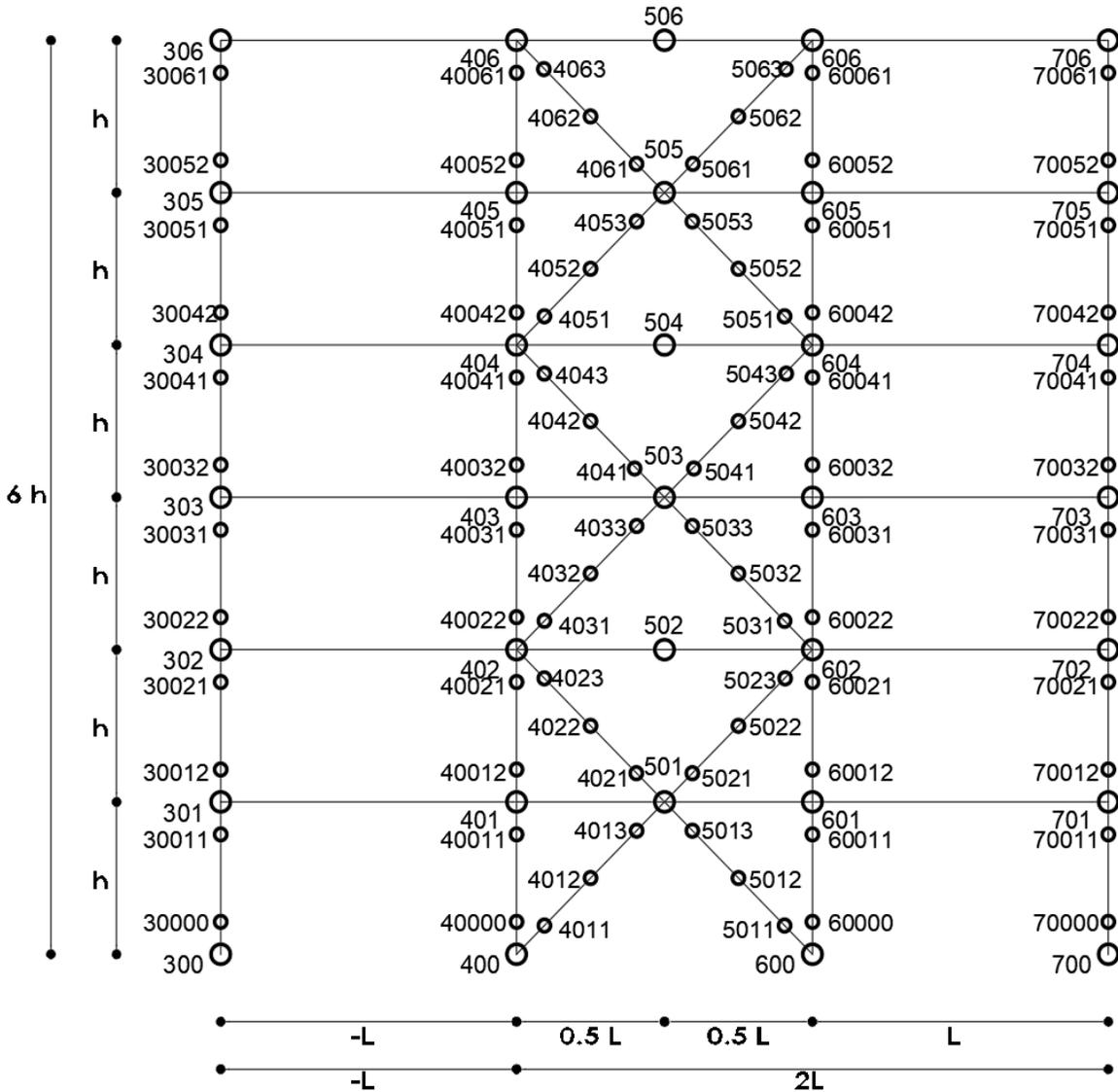


Figura 3.11. Numeración y ubicación de nodos de zonas rígidas en columnas y nodos en los contravientos en configuración X.

Las condiciones de apoyo se definen de la siguiente manera, se suponen apoyos empotrados con el termino *fix*, la estructura queda empotrada en la base, los términos 1 1 1, se refieren a los grados de libertad.

```
fix 300 1 1 1
fix 400 1 1 1
fix 600 1 1 1
fix 700 1 1 1
```

El diafragma rígido se define con la función *equalDOF*, el primer nodo es el maestro y el siguiente el esclavo, el ultimo termino se refiere a el sentido donde queda restringido, la estructura se modelo en 2 dimensiones, el termino 1 es para el sentido horizontal y 2 para el sentido vertical.

```
# Se crea el diafragma rígido
equalDOF 301 401 1;
equalDOF 301 501 2;
equalDOF 301 601 1;
equalDOF 301 701 1;

equalDOF 302 402 1;
equalDOF 302 502 2;
equalDOF 302 602 1;
equalDOF 302 702 1;

equalDOF 303 403 1;
equalDOF 303 503 2;
equalDOF 303 603 1;
equalDOF 303 703 1;

equalDOF 304 404 1;
equalDOF 304 504 2;
equalDOF 304 604 1;
equalDOF 304 704 1;

equalDOF 305 405 1;
equalDOF 305 505 2;
equalDOF 305 605 1;
equalDOF 305 705 1;

equalDOF 306 406 1;
equalDOF 306 506 2;
equalDOF 306 606 1;
equalDOF 306 706 1;
```

La conexión entre los contravientos y la estructura principal se supone como articulaciones, para esto se utilizó nuevamente la función *equalDOF*, después de realizar diversas configuraciones se reportaron errores en los resultados, los nodos extremos de los contravientos se ligaron a los nodos de las zonas rígidas de las columnas.

```

# Se crea una articulación el extremo de los contravientos
equalDOF 40000 4011 1 2;
equalDOF 60000 5011 1 2;

equalDOF 40012 4021 1 2;
equalDOF 501 4013 1 2;
equalDOF 501 5013 1 2;
equalDOF 60012 5021 1 2;

equalDOF 40022 4031 1 2;
equalDOF 502 4023 1 2;
equalDOF 502 5023 1 2;
equalDOF 60022 5031 1 2;

equalDOF 40032 4041 1 2;
equalDOF 503 4033 1 2;
equalDOF 503 5033 1 2;
equalDOF 60032 5041 1 2;

equalDOF 40042 4051 1 2;
equalDOF 504 4043 1 2;
equalDOF 504 5043 1 2;
equalDOF 60042 5051 1 2;

equalDOF 40052 4061 1 2;
equalDOF 505 4053 1 2;
equalDOF 505 5053 1 2;
equalDOF 60052 5061 1 2;

equalDOF 506 4063 1 2;
equalDOF 506 5063 1 2;

```

En el siguiente script quedan definidos los esfuerzos de fluencia para los perfiles, en todos los casos se utiliza el material fy_2 , la magnitud de 3.866 considera la sobre resistencia es decir $fy * 1.1$. $Fy=3,515 \text{ kg/cm}^2$.

```

# Se define el material del contraventeo.
set steelTag 1000
set fy_1 3.235;
set fy_2 3.866;
set fy_3 2.530;
set Es 2039.0;

```

Se definen las propiedades inelásticas del material y la influencia de la fatiga sobre este, así mismo se le asigna la etiqueta de $steelTag+1$, con este nombre se aplican las propiedades del material a los perfiles de la estructura.

```

# Acero para HSS fy=3515 kg/cm2
uniaxialMaterial Steel02 [expr $steelTag+1] $fy_2 $Es 0.003 20.0 0.925 0.15
0.05 1.0 0.05 1.0 0.0;
uniaxialMaterial MinMax [expr $steelTag+2] [expr $steelTag+1] -min -0.05 -
max 0.05
uniaxialMaterial Fatigue $steelTag [expr $steelTag+2]

```

```
# Acero para Secciones IR fy=3515 kg/cm2
uniaxialMaterial Steel02 [expr $steelTag+4] $fy_2 $Es 0.003 20.0 0.925 0.15
0.05 1.0 0.05 1.0 0.0;
```

El termino *secID 1* corresponde a una subrutina que crea la sección transversal del perfil, tomando en cuenta las dimensiones y el número de fibras a utilizar.

```
set secID 1
# SSsection2D {secID matID d t nfdy nfty nfdz nftz}
HSSsection2D [expr $secID+101] [expr $steelTag+1] 60. 2.54 6 4 6 4;
HSSsection2D [expr $secID+102] [expr $steelTag+1] 60. 2.54 6 4 6 4;
HSSsection2D [expr $secID+103] [expr $steelTag+1] 60. 2.54 6 4 6 4;
HSSsection2D [expr $secID+104] [expr $steelTag+1] 60. 2.54 6 4 6 4;
HSSsection2D [expr $secID+105] [expr $steelTag+1] 60. 2.22 6 4 6 4;
HSSsection2D [expr $secID+106] [expr $steelTag+1] 60. 2.22 6 4 6 4;

# Secciones de contraviento por Nivel
WSection2D [expr $secID+201] [expr $steelTag+4] 21.6 20.6 1.74 1.02 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+202] [expr $steelTag+4] 21.6 20.6 1.74 1.02 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+203] [expr $steelTag+4] 21.6 20.6 1.74 1.02 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+204] [expr $steelTag+4] 21.0 20.5 1.43 0.92 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+205] [expr $steelTag+4] 21.0 20.5 1.43 0.92 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+206] [expr $steelTag+4] 21.0 20.5 1.43 0.92 6 6 6 6;

# Secciones de vigas por Nivel
WSection2D [expr $secID+301] [expr $steelTag+4] 36.4 25.7 2.18 1.30 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+302] [expr $steelTag+4] 36.4 25.7 2.18 1.30 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+303] [expr $steelTag+4] 36.4 25.7 2.18 1.30 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+304] [expr $steelTag+4] 36.4 25.7 2.18 1.30 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+305] [expr $steelTag+4] 36.4 25.7 2.18 1.30 6 6 6 6;
WSection2D [expr $secID+306] [expr $steelTag+4] 36.4 25.7 2.18 1.30 6 6 6 6;
```

En el ejemplo anterior las columnas son cuadradas de sección hueca con base en 60 cm y espesor de 2.54 cm, con un mallado de 6 x 4. Los contravientos son definidos con un perfil IR, con un peralte de 21.6 cm, base de 20.6 cm, espesor de patín 1.74 cm y espesor de alma de 1.02 cm, con un mallado de 6 x 6. A las vigas se les asigno un perfil IR, el peralte de la viga es 36.4 cm la base 25.7 cm, el espesor del patín 2.18 cm y el espesor del alma 2.18 cm, con un mallado de 6 x 6, para obtener más información de las secciones referirse al capítulo de diseño.

Como se ha mencionado se realizaron análisis no lineales para contravientos en 2 configuraciones en V invertida y en X, además los contravientos cambiaron para cada configuración los perfiles fueron IR, OR y ángulo, a continuación de describe como quedaría la asignación de perfil OR y ángulo para los contravientos.

```
# Secciones de contraviento por Nivel
HSSsection2D [expr $secID+201] [expr $steelTag] 17.8 1.59 10 4 10 4;
HSSsection2D [expr $secID+202] [expr $steelTag] 17.8 1.59 10 4 10 4;
HSSsection2D [expr $secID+203] [expr $steelTag] 17.8 1.59 10 4 10 4;
HSSsection2D [expr $secID+204] [expr $steelTag] 17.8 1.27 10 4 10 4;
HSSsection2D [expr $secID+205] [expr $steelTag] 17.8 1.27 10 4 10 4;
HSSsection2D [expr $secID+206] [expr $steelTag] 17.8 1.27 10 4 10 4;
```

La dimensión de los contravientos con perfil OR para los primero 3 niveles, tiene una base de 17.8 cm y espesor de 1.59 cm y para los niveles 4, 5 y 6, base de 17.8 cm y espesor de 1.27 cm. con un mallado de 10 x 4 para ambos perfiles.

Para definir los perfiles IR y OR se crearon unas subrutinas y posteriormente se asignan magnitudes para crear el perfil, en el caso del perfil ángulo L, fue diferente se definieron dentro del script principal de la siguiente manera.

```
#SECCIÓN L8''x7/8''-----
#
#matTag          #GJ
uniaxialMaterial Elastic      3          $Es
section Fiber 3 {
#   L 8"x7/8" C2
#   b=   20.32 cm
#   t=   2.2225 cm
#   x=   5.89 cm
#           Iy Iz Jy   Jz   Ky   Kz   Ly   Lz
patch quad 1000 5 5 -3.66 -5.89 14.43 -5.89 14.43 -3.66 -3.66 -3.66
patch quad 1000 5 5 -5.89 -3.66 -3.66 -3.66 -3.66 14.43 -5.89 14.43
patch quad 1000 5 5 -5.89 -5.89 -3.66 -5.89 -3.66 -3.66 -5.89 -3.66
}
#Sección L8''x7/8''          SecTag   MatTag   String Torsion SectionTag
section Aggregator          2560      3         T -section      3
```

Con ayuda de una hoja de cálculo se determinaron las propiedades geométricas de la sección en función de sus dimensiones, para los primero 3 niveles se utilizó el perfil ángulo con base de 20.32 cm y espesor de 2.22 cm, la etiqueta que se asignó a este perfil fue 2560.

```
#SECCIÓN L8''x1''-----
#matTag          #GJ
uniaxialMaterial Elastic      2          $Es
section Fiber 2 {
#   L 8"x1" C1
#   b=   20.32 cm
#   t=   2.54 cm
#   x=   6.02 cm
#           Iy Iz Jy   Jz   Ky   Kz   Ly   Lz
patch quad 1000 5 5 -3.48 -6.02 14.3 -6.02 14.3 -3.48 -3.48 -3.48
patch quad 1000 5 5 -6.02 -3.48 -3.48 -3.48 -3.48 14.3 -6.02 14.3
patch quad 1000 5 5 -6.02 -6.02 -3.48 -6.02 -3.48 -3.48 -6.02 -3.48
}
#Sección L8''x1''          SecTag   MatTag   String Torsion SectionTag
section Aggregator          2550      2         T -section      2
```

Para los últimos 3 niveles se utilizó el perfil ángulo con una base de 20.32 cm y espesor de 2.54 cm, a este perfil se le asigno la etiqueta 2550. Una vez con los perfiles definidos se procede a asignarlos a los elementos del modelo que corresponde. Para fines prácticos se muestra la definición de los elementos de las columnas del eje 4.

```
# Columna eje 4.
element elasticBeamColumn 400 400 40000 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;
element forceBeamColumn 401 40000 40011 $nPC [expr $secID+101] $TransfCor;
```

```

element elasticBeamColumn 402 40011 401 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;

element elasticBeamColumn 403 401 40012 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;
element forceBeamColumn 404 40012 40021 $nPC [expr $secID+102] $TransfCor;
element elasticBeamColumn 405 40021 402 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;

element elasticBeamColumn 406 402 40022 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;
element forceBeamColumn 407 40022 40031 $nPC [expr $secID+103] $TransfCor;
element elasticBeamColumn 408 40031 403 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;

element elasticBeamColumn 409 403 40032 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;
element forceBeamColumn 410 40032 40041 $nPC [expr $secID+104] $TransfCor;
element elasticBeamColumn 411 40041 404 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;

element elasticBeamColumn 412 404 40042 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;
element forceBeamColumn 413 40042 40051 $nPC [expr $secID+105] $TransfCor;
element elasticBeamColumn 414 40051 405 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;

element elasticBeamColumn 415 405 40052 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;
element forceBeamColumn 416 40052 40061 $nPC [expr $secID+106] $TransfCor;
element elasticBeamColumn 417 40061 406 $A_R $Es_R $Iz_R $TransfLin;

```

En las columnas se definió una zona rígida en los extremos y está en función del peralte de la viga y de la placa de conexión, por ejemplo, del nodo 400 a 40000 se define la zona rígida, y este elemento tiene el nombre 400. Del nodo 40000 a 40011 el elemento 401 con el perfil y materiales asignados a la etiqueta *secID+101*. Este proceso se repite en todos los ejes y niveles. Para definir las vigas el proceso es similar.

```

# Viga.
element forceBeamColumn 3501 301 401 $nPC [expr $secID+301] $TransfLin;
element forceBeamColumn 4501 401 501 $nPC [expr $secID+301] $TransfLin;
element forceBeamColumn 5601 501 601 $nPC [expr $secID+301] $TransfLin;
element forceBeamColumn 6601 601 701 $nPC [expr $secID+301] $TransfLin;

```

En las vigas no se definieron zonas rígidas, se crea el elemento 3501 que va de los nodos 301 a 401, y tiene las propiedades que se definieron a *secID+301*. Sucesivamente se define el elemento 4501 de los nodos 401 a 501 con las propiedades de *secID+301*. Estas vigas corresponden al primer nivel, al momento de definir las secciones se estableció que el último dígito de la expresión *secID+301* corresponde al nivel donde se asignaran.

Para asignar los contravientos con la sección IR y OR el proceso es similar al antes descrito.

```

# Contraventeo convencional.
element forceBeamColumn 4011 4011 4012 $nPC [expr $secID+201] $TransfCor;
element forceBeamColumn 4012 4012 4013 $nPC [expr $secID+201] $TransfCor;
element forceBeamColumn 5011 5011 5012 $nPC [expr $secID+201] $TransfCor;
element forceBeamColumn 5012 5012 5013 $nPC [expr $secID+201] $TransfCor;

```

Cuando los contravientos tienen la sección ángulo, en lugar de utilizar la expresión *secID+201*, se cambia por la etiqueta que se le asignó al perfil 2550 o 2560 dependiendo del caso, y quedaría de la siguiente forma.

```

element forceBeamColumn 4021 4021 4022 $nPC 2550 $TransfCor;
element forceBeamColumn 4022 4022 4023 $nPC 2550 $TransfCor;
element forceBeamColumn 5021 5021 5022 $nPC 2550 $TransfCor;
element forceBeamColumn 5022 5022 5023 $nPC 2550 $TransfCor;

```

Las cargas del modelo W se definen al principio del script, la magnitud de las cargas puede cambiar con el fin de ajustar el periodo de la estructura a 0.85 seg, que es el periodo al que están escaladas las señales que se utilizan en el análisis.

Las cargas están aplicadas en los nodos 301, 401, 601, 701, para el primer nivel, y están aplicadas en todos los niveles en la misma posición. la carga W está definida por nivel, de tal forma que se divide entre 4 para que se distribuya uniformemente en los nodos de la estructura.

```

# Cargas gravitacionales en la estructura
pattern Plain 1 Linear {
    load 301 0.0 [expr -1. *$W1/4] 0.00
    load 401 0.0 [expr -1. *$W1/4] 0.00
    load 601 0.0 [expr -1. *$W1/4] 0.00
    load 701 0.0 [expr -1. *$W1/4] 0.00

    load 302 0.0 [expr -1. *$W2/4] 0.00
    load 402 0.0 [expr -1. *$W2/4] 0.00
    load 602 0.0 [expr -1. *$W2/4] 0.00
    load 702 0.0 [expr -1. *$W2/4] 0.00

    load 303 0.0 [expr -1. *$W3/4] 0.00
    load 403 0.0 [expr -1. *$W3/4] 0.00
    load 603 0.0 [expr -1. *$W3/4] 0.00
    load 703 0.0 [expr -1. *$W3/4] 0.00

    load 304 0.0 [expr -1. *$W4/4] 0.00
    load 404 0.0 [expr -1. *$W4/4] 0.00
    load 604 0.0 [expr -1. *$W4/4] 0.00
    load 704 0.0 [expr -1. *$W4/4] 0.00

    load 305 0.0 [expr -1. *$W5/4] 0.00
    load 405 0.0 [expr -1. *$W5/4] 0.00
    load 605 0.0 [expr -1. *$W5/4] 0.00
    load 705 0.0 [expr -1. *$W5/4] 0.00

```

El software *Open Sees* funciona como un ejecutable, es decir, el script se realiza en un editor de texto con formato. tcl con la función *source* se toma el archivo y se ejecuta en el software. En primera instancia en la interfaz gráfica se puede visualizar el modelo de esta manera nos aseguramos de que los nodos están bien definidos, después se verifica el periodo de la estructura para los modelos de 6 niveles es de 0.85 seg.

Al finalizar el análisis se generan archivos de texto con formato *.out*, estos archivos contienen la información de las distorsiones de entrepiso y esfuerzos en los elementos.

3.4 Validación del modelo

Una vez completado el modelo, era necesario validarlo, para esto se realizaron diversas comprobaciones, la primera de ellas era asegurarse de que, con las masas definidas, se lograba ajustar el periodo de la estructura a 0.85 seg. La segunda fue validar que se generaba el diafragma rígido en cada entrepiso, para esto se comprobaron los desplazamientos de los nodos involucrados en el nivel, otra forma de validar el modelo fue, asegurarse de que no había elementos o nodos sueltos, es decir que todo estaba conectado.

El argumento que se tomó para validar el modelo y el comportamiento de los contravientos fue, analizar el rendimiento de los contravientos, haciendo una gráfica de histéresis del contraviento para ver el comportamiento en tensión y compresión, de esta forma comprobar que las propiedades del perfil se definieron de manera correcta y que el rendimiento del perfil era el adecuado.

Para comprobar el rendimiento de los contravientos, se determina la resistencia máxima a compresión R_{ce} y la resistencia máxima en tensión P_{ce} . El termino X es el factor de corrección por inelasticidad para la carga critica de pandeo, y el factor R_y corresponde a el cociente del esfuerzo de fluencia esperado entre el mínimo especificado, de la tabla 12.1.1 de las NTC-DS-2023 (2023) para nuestro caso es de 1.1.

$$R_{ce} = 1.14 \chi f_y A R_y$$

$$P_{ce} = R_{te} = f_y A R_y$$

Los cálculos fueron realizados con $f_y=3,515 \text{ kg/cm}^2$, $R_y=1.1$, el valor X fue determinado en el capítulo 2 para cada perfil, y el termino A es el área de cada perfil.

En la sección 16.3.3.5.3 (NTC-DCEA, 2023) sobre la resistencia de las diagonales de contraviento, la resistencia esperada en compresión de un contraviento es igual a la menor de las siguientes magnitudes.

Resistencia en Compresión Máxima Esperada

$$R_{ce} := 1.14 \cdot \chi \cdot f_y \cdot A \cdot R_y = 287.405 \text{ tonne}$$

$$R'_{ce} := 0.3 \cdot R_{ce} = 86.222 \text{ tonne}$$

Resistencia en Tensión Máxima Esperada

$$R_{te} := R_y \cdot f_y \cdot A = 352.352 \text{ tonne}$$

La resistencia máxima esperada en compresión y tensión, se tomarán para cada perfil y se compara con los resultados de las gráficas de histéresis. Para tener más detalles de estos cálculos referirse al capítulo 2 de diseño.

En las siguientes figuras 3.12 a 3.17 se muestra la evolución del comportamiento de los contravientos en los niveles 2 y 4 para los modelos de 6 niveles, bajo la señal RM48EW, debido a que los contravientos en todos los niveles fluyen.

Se establecieron puntos de referencia en las figuras, y se compararon con los puntos antes descritos resistencia máxima a compresión R_{ce} y la resistencia máxima en tensión P_{ce} . El objetivo de este análisis es comprobar que el modelo matemático es válido a partir del comportamiento de los contravientos, y también comparar el comportamiento de los contravientos dependiendo la sección de estos.

El punto 1 es la carga en tensión al inicio del pandeo global, este no es el punto de fluencia es inferior a este, por lo tanto, se tiene un intervalo elástico hasta que se llega a la carga de pandeo global de tal manera que el punto 1 depende de la carga de pandeo. El punto 2 carga de pandeo global R_c , es donde comienza el decrecimiento de la resistencia del contraviento, se puede considerar el inicio del daño.

El punto 3 es la carga post-pandeo en el primer ciclo R'_c , una vez alcanzada la carga de pandeo global hay un decrecimiento de la resistencia hasta el punto 3. El punto 4 es la carga de fluencia P_y , se considera el último punto antes del cambio abrupto de pendiente, esta carga es generada por la tensión aplicada al contraviento.

El punto 5 R''_c es la carga post-pandeo en el segundo ciclo, cuando se llega a la carga de fluencia P_y , el daño en el perfil es mayor de tal forma que el rendimiento baja, cuando se llega el punto de fluencia se considera que se llega al primer ciclo, la carga del punto 5 es menor a comparación del punto 3, la diferencia entre estos dos puntos es un tema de estudio que se discute al final de esta sección.

El último punto es el 6 carga post-pandeo en el tercer ciclo R'''_c , en este punto el contraviento llega a la etapa final de su rendimiento, la deformación y la pérdida de resistencia es evidente.

El resumen de puntos para cada contraviento se expone en las tablas 3.3 a 3.8. En las tablas se toman las coordenadas de los puntos antes descritos, deformación unitaria y carga axial, se establece carga axial en tensión cuando se expresa con signo positivo (+) y carga en compresión con signo negativo (-) de la misma manera para la deformación unitaria.

La deformación corresponde a la multiplicación de la deformación unitaria por la longitud del contraviento, este parámetro nos indica el acortamiento o alargamiento del contraviento en centímetros.

La carga normalizada, es la división de la carga axial del contraviento entre la resistencia máxima a compresión R_{ce} y la resistencia máxima en tensión P_{ce} , este parámetro nos indica el porcentaje de carga que se alcanza con respecto a las resistencias esperadas.

3.4.1 Perfil IR 203 mm x 71.5 kg/m

En la figura 3.12 se describe el comportamiento del contraviento de perfil IR 203 mm x 71.5 kg/m, ubicado en el nivel 2, del modelo de 6 niveles en configuración V invertida para la señal RM48EW.

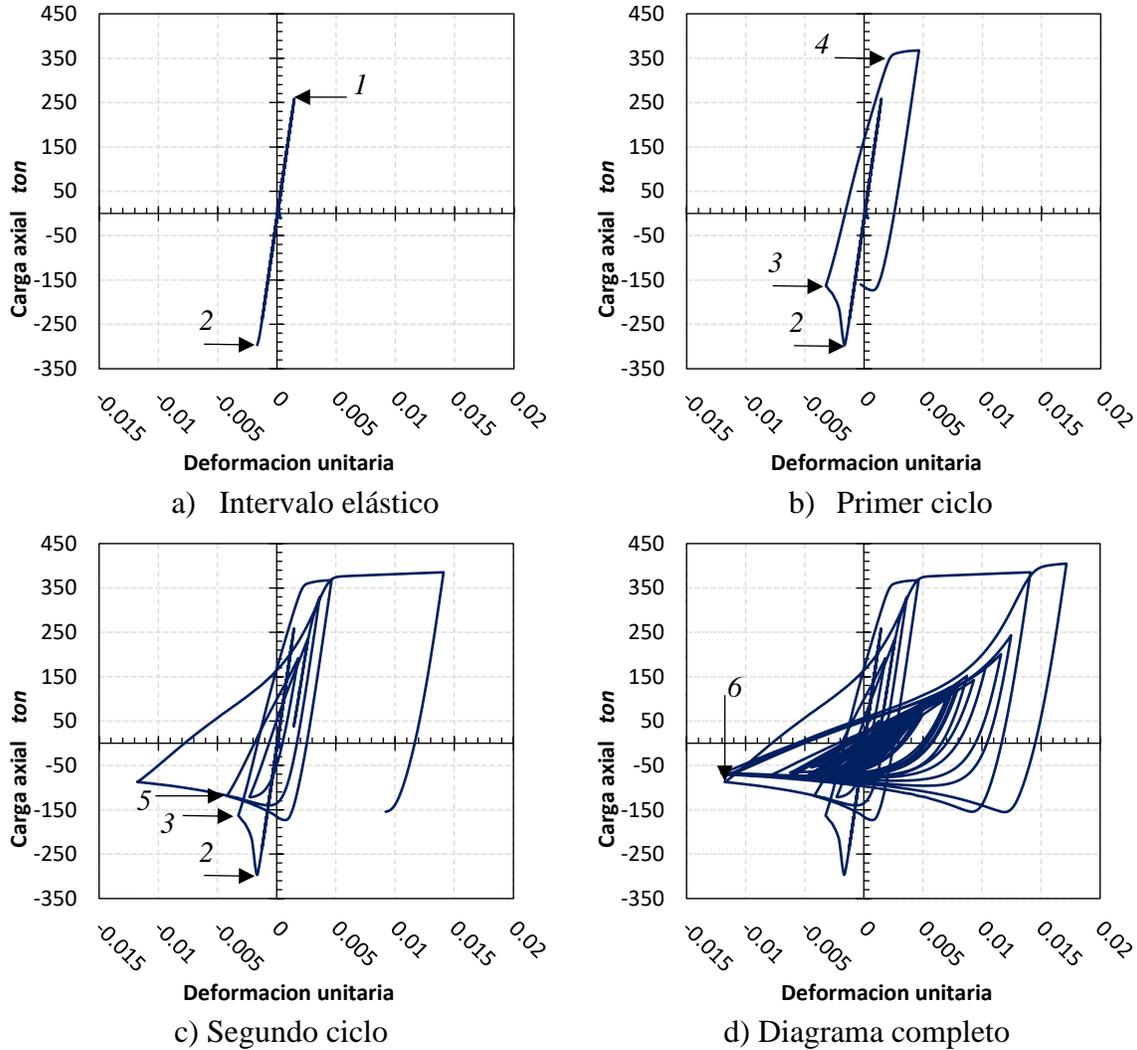


Figura 3.12. Grafica de histéresis para el perfil IR 203 mm x 71.5 kg/m.

Tabla 3.3. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento IR 203 mm x 71.5 kg/m.

Punto	Descripción	Deformación (cm)*	Carga axial, P (t)*	Def. Unit (cm/cm) *	Carga normalizada P/R _c ; P/P _y *
1	Carga de tensión al inicio del pandeo global	0.693	258	0.0014	0.732
2	Carga de pandeo global R _c	-0.792	-296	-0.0016	-0.972
3	Carga post-pandeo en el primer ciclo R' _c	-1.584	-157	-0.0032	-0.516

4	Carga de fluencia P_y	1.089	349	0.0022	0.990
5	Carga post-pandeo en el segundo ciclo R''_c	1.980	-110	0.004	-0.361
6	Carga post-pandeo en el tercer ciclo R'''_c	-5.643	-88	-0.0114	-0.289

*Las magnitudes expresadas con signo negativo (-) corresponden a compresión y con signo (+) positivo en tensión.

3.4.2 Perfil IR 203 mm x 59.6 kg/m

En la figura 3.13 se describe el comportamiento del contraviento de perfil IR 203 mm x 59.6 kg/m, ubicado en el nivel 4, del modelo de 6 niveles en configuración V invertida para la señal RM48EW.

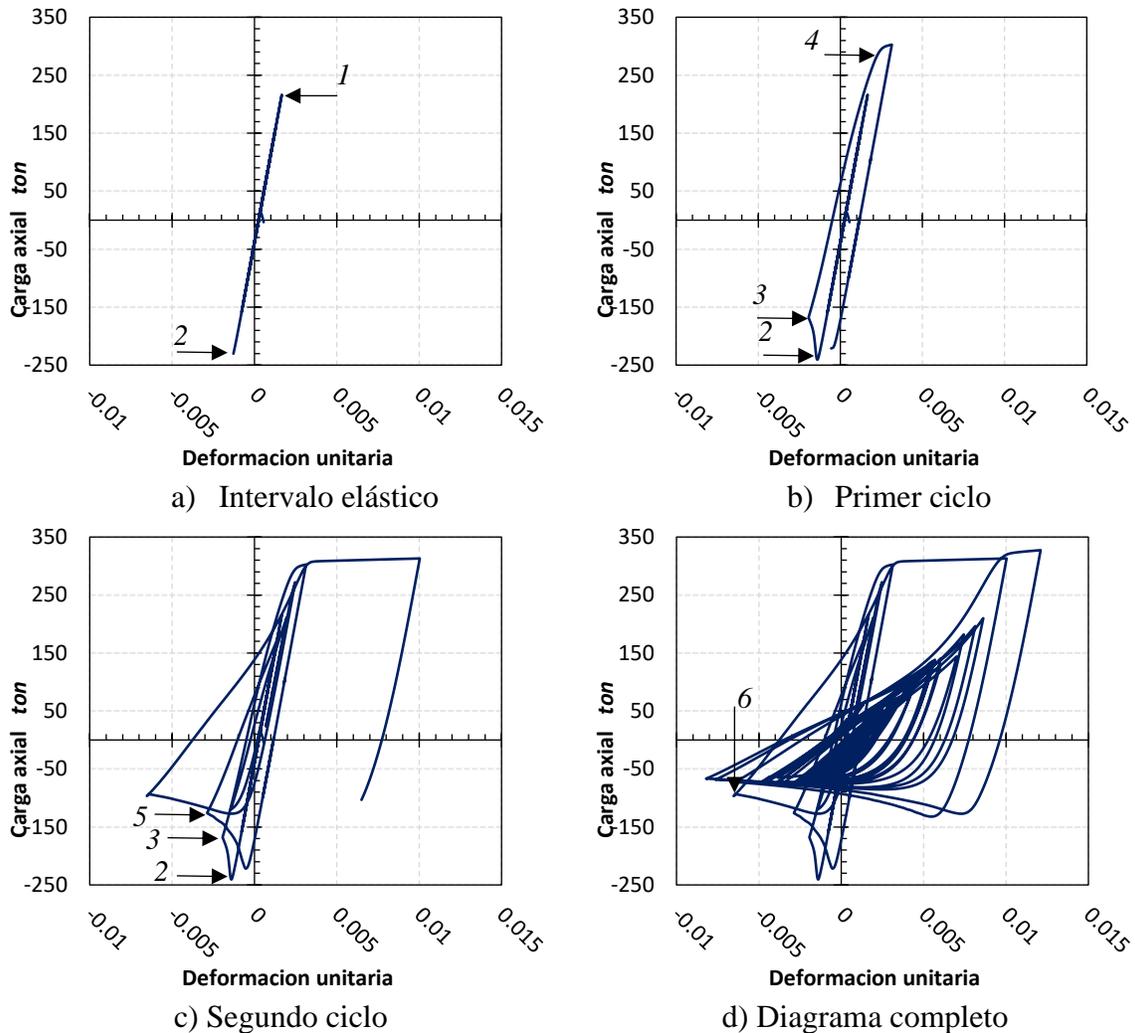


Figura 3.13. Grafica de histéresis para el perfil IR 203 mm x 59.6 kg/m

Tabla 3.4. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento IR 203 mm x 59.6 kg/m.

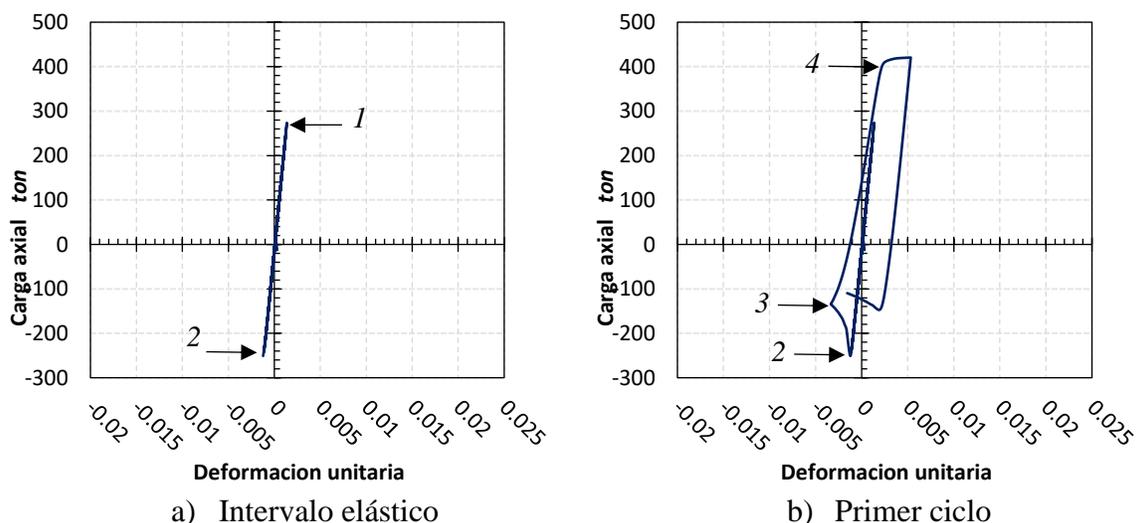
Punto	Descripción	Deformación (cm)*	Carga axial, P (t)*	Def. Unit (cm/cm) *	Carga normalizada $P/R_c; P/P_y$ *
1	Carga de tensión al inicio del pandeo global	0.742	202	0.0015	0.692
2	Carga de pandeo global R_c	-0.594	-221	-0.0012	-1.018
3	Carga post-pandeo en el primer ciclo R'_c	-0.940	-170	-0.0019	-0.783
4	Carga de fluencia P_y	1.237	295	0.0025	1.010
5	Carga post-pandeo en el segundo ciclo R''_c	-1.386	123	-0.0028	-0.567
6	Carga post-pandeo en el tercer ciclo R'''_c	-3.217	-97	-0.0065	-0.447

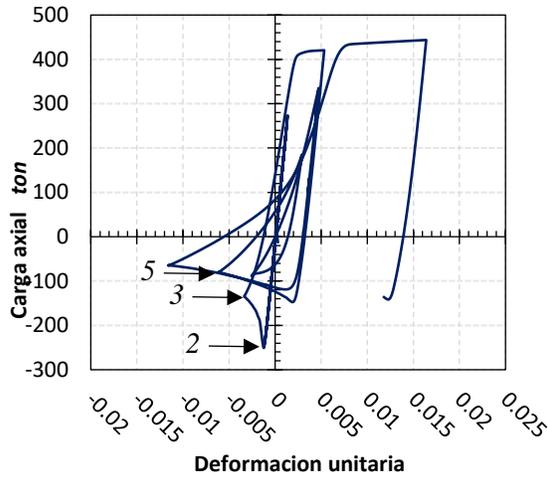
*Las magnitudes expresadas con signo negativo (-) corresponden a compresión y con signo (+) positivo en tensión.

El contraviento con perfil IR 203 mm x 71.5 kg/m, alcanzo la carga de pandeo global 2.8% antes de la carga máxima esperada y el perfil IR 203 mm x 59.6 kg/m un 1.8 % después y la carga de fluencia 1% antes y 1 % después respectivamente. Las relaciones de esbeltez entre estos dos perfiles son muy similares en los dos ejes, esto podría indicar la similitud en el desempeño del contraviento.

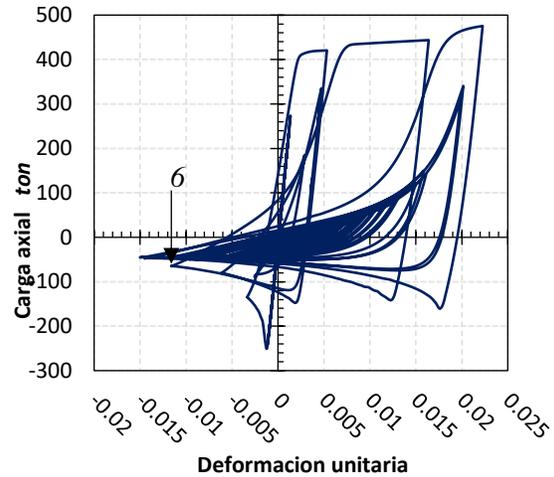
3.4.3 Perfil OR 178 mm x 15.9mm.

En la figura 3.14 se describe el comportamiento del contraviento de perfil OR 178 mm x 15.9mm, ubicado en el nivel 2, del modelo de 6 niveles en configuración V invertida para la señal RM48EW.





c) Segundo ciclo



d) Diagrama completo

Figura 3.14. Grafica de histéresis para el perfil OR 178 mm x 15.9mm.

Tabla 3.5. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento OR 178 mm x 15.9mm.

Punto	Descripción	Deformación (cm)*	Carga axial, P (t)*	Def. Unit (cm/cm) *	Carga normalizada P/R _c ; P/P _y *
1	Carga de tensión al inicio del pandeo global	0.594	257	0.0012	0.736
2	Carga de pandeo global R _c	-0.544	-242	-0.0011	-0.720
3	Carga post-pandeo en el primer ciclo R' _c	-1.534	-125	-0.0031	-0.372
4	Carga de fluencia P _y	1.237	409	0.0025	1.172
5	Carga post-pandeo en el segundo ciclo R'' _c	-3.118	-82	-0.0063	-0.244
6	Carga post-pandeo en el tercer ciclo R''' _c	-5.296	-66	-0.0107	-0.196

*Las magnitudes expresadas con signo negativo (-) corresponden a compresión y con signo (+) positivo en tensión.

El contraviento con perfil OR 178 mm x 15.9mm, alcanzo la carga de pandeo global 28% antes de la carga máxima esperada y el perfil OR 178 mm x 15.9mm un 20 % antes y la carga de fluencia 17 % después y 10 % después respectivamente. Las relaciones de esbeltez entre estos dos perfiles son muy similares para el primero es 54.4 y el segundo 53.35, esto podría indicar la similitud en el desempeño del contraviento.

3.4.4 Perfil OR 178 mm x 12.7mm.

En la figura 3.15 se describe el comportamiento del contraviento de perfil OR 178 mm x 12.7mm, ubicado en el nivel 4, del modelo de 6 niveles en configuración V invertida para la señal RM48EW.

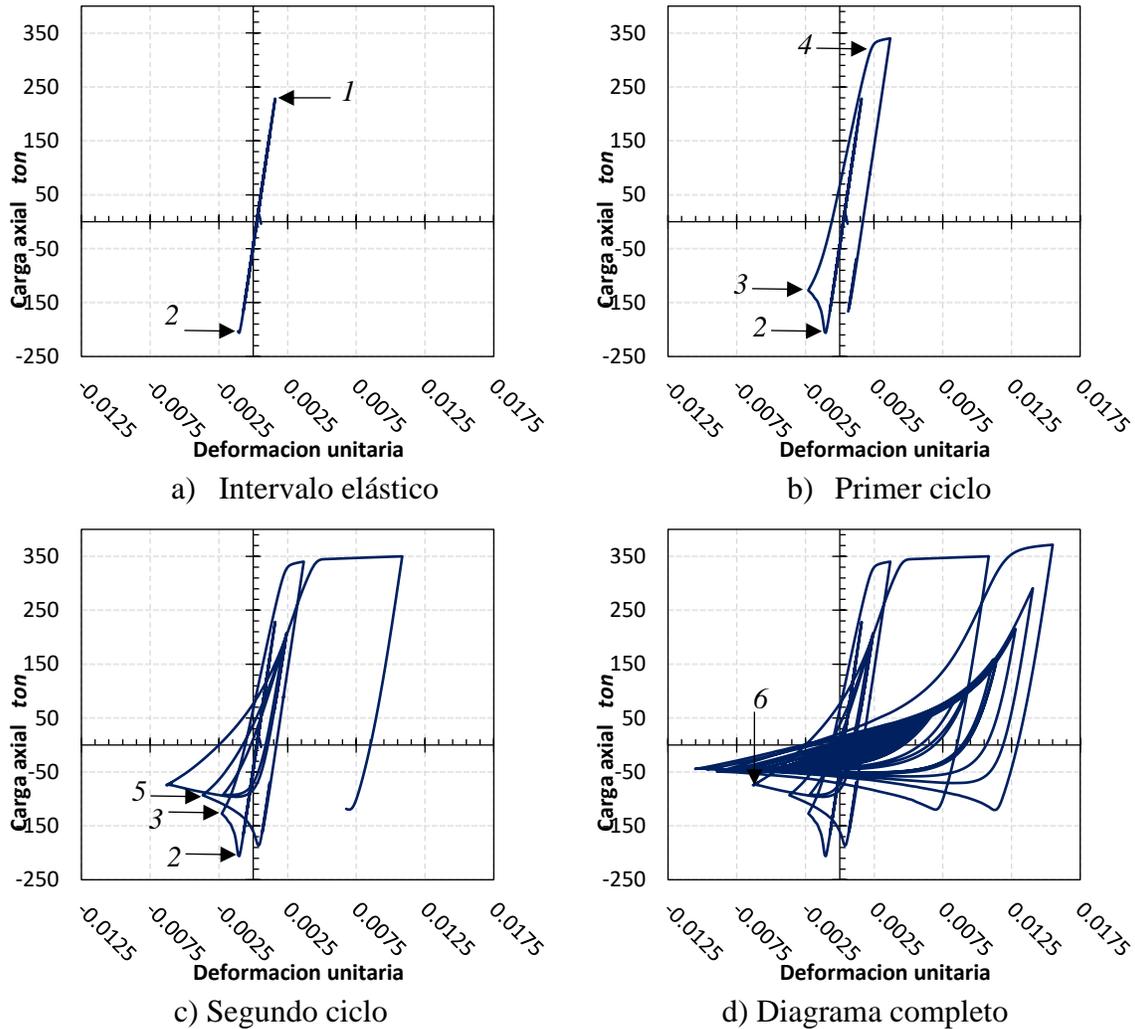


Figura 3.15. Grafica de histéresis para el perfil OR 178 mm x 12.7mm.

Tabla 3.6. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento OR 178 mm x 12.7 mm.

Punto	Descripción	Deformación (cm)*	Carga axial, $P(t)^*$	Def. Unit (cm/cm) *	Carga normalizada $P/R_c; P/P_y^*$
1	Carga de tensión al inicio del pandeo global	0.742	214	0.0015	0.740
2	Carga de pandeo global	-0.445	-192	-0.0009	-0.807

	R_c				
3	Carga post-pandeo en el primer ciclo R'_c	-0.990	-116	-0.002	-0.487
4	Carga de fluencia P_y	1.336	320	0.0027	1.107
5	Carga post-pandeo en el segundo ciclo R''_c	-1.633	-87	-0.0033	-0.366
6	Carga post-pandeo en el tercer ciclo R'''_c	-2.871	-75	-0.0058	-0.315

*Las magnitudes expresadas con signo negativo (-) corresponden a compresión y con signo (+) positivo en tensión.

3.4.5 Perfil L 203 mm x 25.4mm

En la figura 3.16 se describe el comportamiento del contraviento de L 203 mm x 25.4mm, ubicado en el nivel 2, del modelo de 6 niveles en configuración V invertida para la señal RM48EW.

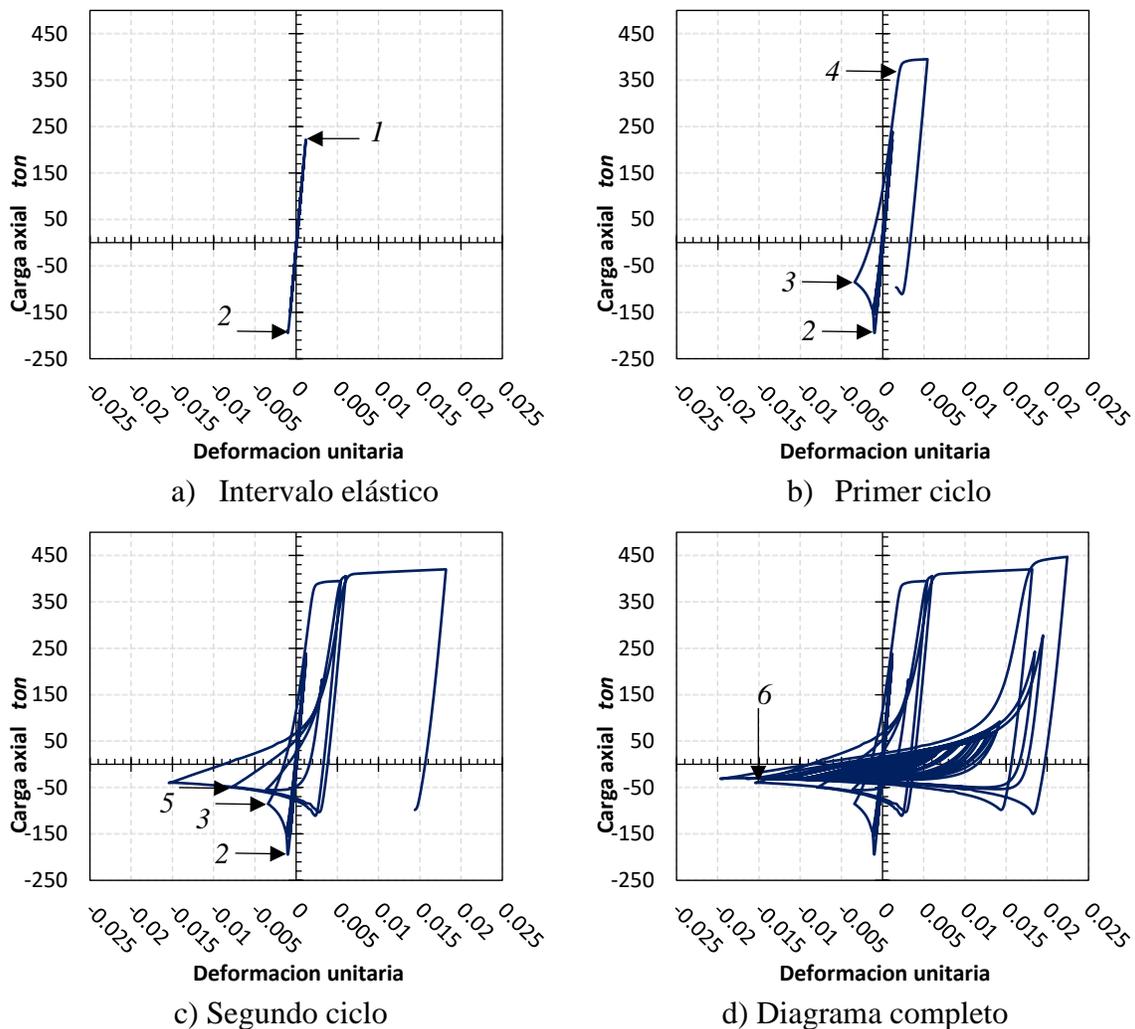


Figura 3.16. Grafica de histéresis para el perfil L 203 mm x 25.4mm.

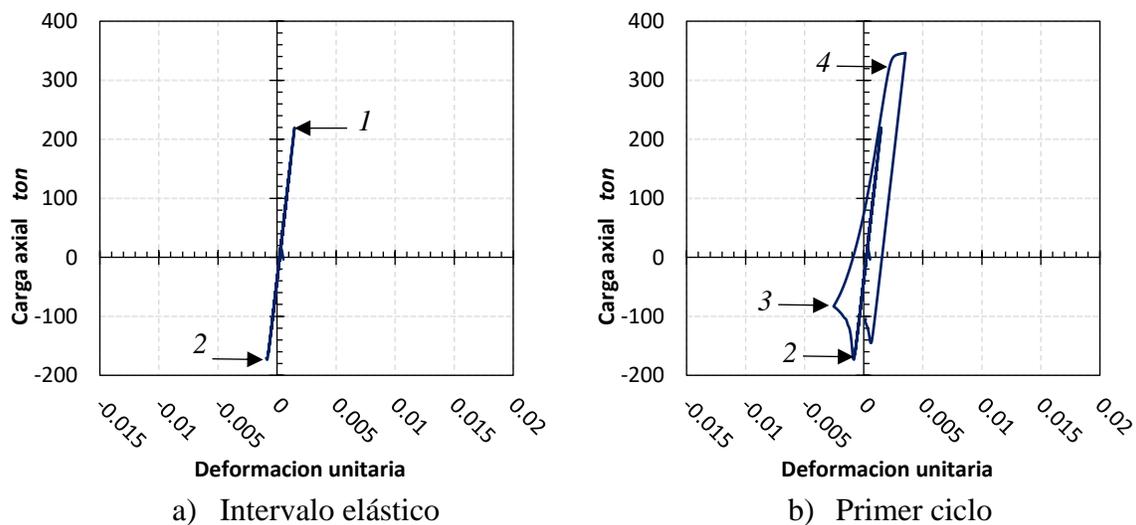
Tabla 3.7. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento L 203 mm x 25.4mm.

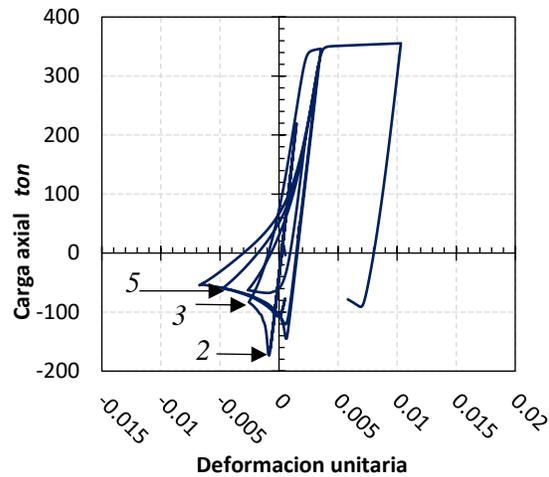
Punto	Descripción	Deformación (cm)*	Carga axial, P (t)*	Def. Unit (cm/cm) *	Carga normalizada P/R _c ; P/P _y *
1	Carga de tensión al inicio del pandeo global	0.544	207	0.0011	0.553
2	Carga de pandeo global R _c	-0.544	-205	-0.0011	-0.645
3	Carga post-pandeo en el primer ciclo R' _c	-1.584	-78	-0.0032	-0.245
4	Carga de fluencia P _y	1.386	391	0.0028	1.045
5	Carga post-pandeo en el segundo ciclo R'' _c	-3.613	-44	-0.0073	-0.138
6	Carga post-pandeo en el tercer ciclo R''' _c	-7.227	-39	-0.0146	-0.123

*Las magnitudes expresadas con signo negativo (-) corresponden a compresión y con signo (+) positivo en tensión.

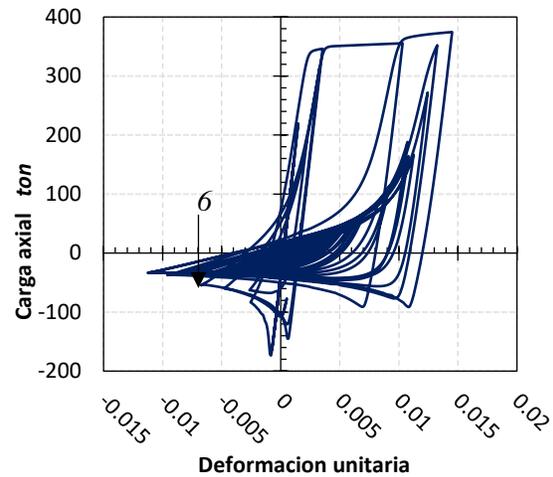
3.4.6 Perfil L 203 mm x 22mm

En la figura 3.17 se describe el comportamiento del contraviento de L 203 mm x 22mm, ubicado en el nivel 4, del modelo de 6 niveles en configuración V invertida para la señal RM48EW.





c) Segundo ciclo



d) Diagrama completo

Figura 3.17. Grafica de histéresis para el perfil L 203 mm x 22mm.

Tabla 3.8. Coordenadas para grafica de histéresis contraviento L 203 mm x 22mm.

Punto	Descripción	Deformación (cm)*	Carga axial, P (t)*	Def. Unit (cm/cm) *	Carga normalizada $P/R_c; P/P_y$ *
1	Carga de tensión al inicio del pandeo global	0.693	217	0.0014	0.761
2	Carga de pandeo global R_c	-0.346	-165	-0.0007	-0.724
3	Carga post-pandeo en el primer ciclo R'_c	-1.138	-75	-0.0023	-0.329
4	Carga de fluencia P_y	1.336	318	0.0027	1.116
5	Carga post-pandeo en el segundo ciclo R''_c	-2.079	-62	-0.0042	-0.272
6	Carga post-pandeo en el tercer ciclo R'''_c	-3.019	-52	-0.0061	-0.228

*Las magnitudes expresadas con signo negativo (-) corresponden a compresión y con signo (+) positivo en tensión.

El contraviento con perfil L 203 mm x 25.4mm, alcanzo la carga de pandeo global 35% antes de la carga máxima esperada y el perfil L 203 mm x 22 mm un 27 % antes y la carga de fluencia 4.5 % después y 11.6 % después respectivamente. Las relaciones de esbeltez entre estos dos perfiles son muy similares para el primero es 57.29 y el segundo 57.29, esto podría indicar la similitud en el desempeño del contraviento.

3.4.7 Carga post-pandeo

La carga post-pandeo R'_c en el proceso de diseño por capacidad es el 30% de la carga de pandeo global R_c (NTC-DCEA, 2023), en la tabla 3.9 se muestra el resumen de resultados para los perfiles involucrados, estos datos corresponden a los resultados del modelo matemático, se utilizaron para validar el mismo.

Tabla 3.9. Resumen de resultados para los contravientos en función de la relación de esbeltez.

Sección	Perfil	Rel. de esbeltez		P/P_y	P/R_c	P/R'_c	P/R''_c	P/R'''_c
		x	y					
IR	203 x 71.5	38.73	67.24	0.990	0.972	0.516	0.361	0.289
	203 x 59.6	39.59	68.53	1.010	1.018	0.783	0.567	0.447
OR	178 x 15.9	54.40	54.40	1.172	0.721	0.372	0.244	0.196
	178 x 12.7	53.35	53.35	1.107	0.807	0.487	0.366	0.315
L	203 x 25.4	57.76	57.76	1.045	0.645	0.245	0.138	0.123
	203 x 22.0	57.29	57.29	1.116	0.725	0.329	0.272	0.228

Para los contravientos con sección IR la carga post-pandeo R'_c es mayor al 50% de la carga de pandeo, en el primer caso es el 51.6% y en el segundo perfil es el 78.3 %, para el perfil OR es 37.2% y para el segundo perfil es 48.7%. Para el ultimo perfil en sección ángulo, la carga post-pandeo fue el 24.5% y 32.9% respectivamente de la carga de pandeo.

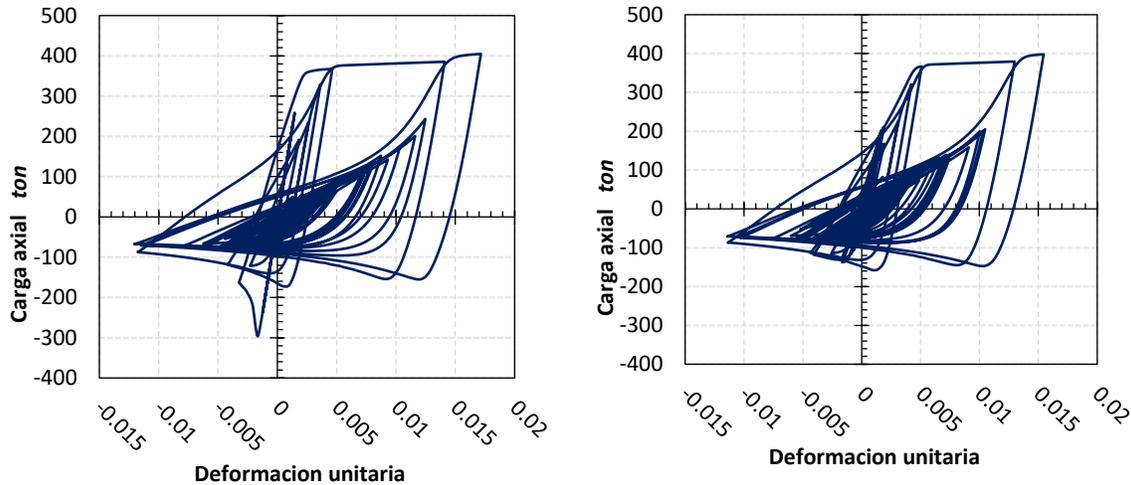
En estudios previos se demostró que la resistencia post-pandeo está en función de la relación de esbeltez (Tremblay, 2002), con los análisis realizados demostramos que dicha carga depende de la relación de esbeltes del perfil y así mismo del tipo de sección, además se demuestra que la carga post-pandeo está en función del número de ciclos.

3.4.8 Pandeo prematuro

Se realizaron análisis no lineales considerando diversos casos para el modelo de 6 niveles, a grandes rasgos fue suponer un pandeo prematuro en los niveles 2, 4 y 6 y evaluar el efecto que este tenía. En la figura 3.18 se muestra la comparación en las gráficas de histéresis para el contraviento IR 203 mm x 71.5 kg/m en el nivel 2 bajo la señal RM48EW.

En el inciso a) la gráfica de histéresis describe el comportamiento del contraviento sin pandeo prematuro y en el b) con pandeo prematuro, se puede observar que el comportamiento del contraviento en tensión es similar, la carga de fluencia es muy similar lo que varía es la deformación unitaria al momento de llegar a estar carga.

Es decir, un contraviento sin pandeo prematuro es más estable en el primer ciclo, en comparación con el que tiene pandeo prematuro.



a) Perfil sin pandeo prematuro

b) Perfil con pandeo prematuro

Figura 3.18. Graficas de histéresis para el perfil IR 203 mm x 71.5 kg/m con y sin pandeo prematuro.

El punto notable entre estas dos graficas es la carga de pandeo, para el perfil sin pandeo prematuro es de 300 toneladas y para el que tiene el pandeo prematuro es aproximadamente de 150 toneladas, la capacidad del contraviento disminuye 50%. De esta manera se demuestra que tener un pandeo prematuro en el contraviento disminuye su capacidad de carga en compresión y por lo tanto rigidez y en conjunto esto puede guiar a la formación de un piso débil en la estructura.

3.5 Conclusiones

Después de realizar el modelo en el *software OpenSees* y comprobar el mismo mediante el comportamiento y rendimiento de los contravientos, se llegó a la conclusión de que, los perfiles utilizados IR, OR y ángulo tienen un comportamiento similar, es decir, cuentan con una primera etapa elástica, alcanzan un pandeo global y después un post-pandeo global, llegando al final del primer ciclo con la carga de fluencia.

El punto 1 carga de tensión al inicio del pandeo depende de la carga de pandeo global R_c , el intervalo entre estos dos puntos es lineal. La carga de pandeo global y las cargas de post-pandeo posteriores dependen de la relación de esbeltes del perfil y del número de ciclos. Si la relación de esbeltez es muy pequeña la carga de pandeo es muy similar a R_c cuando crece la relación de esbeltez el elemento es más delgado.

La carga post- pandeo en el proceso de diseño por capacidad es el 30 % de la carga de pandeo global (NTC-DCEA, 2023) sin embargo se hace notar que esto no se cumple debido a que esta carga depende de la relación de esbeltez y del número de ciclos.

Cuando existe un pandeo prematuro en el contraviento, la resistencia en compresión se disminuye aproximadamente 50%, se demuestra que los entrepisos con contravientos con pandeo prematuro tienen menor resistencia y rigidez, verdaderamente se logra promover un piso débil en el edificio en los primeros ciclos del sismo.

Capítulo 4. Análisis de resultados

RESUMEN

En este capítulo se discuten los resultados de análisis dinámicos no lineales que se efectuaron para el modelo de 6 niveles en configuración V invertida y X, con un pandeo prematuro en los niveles 2, 4 y 6, que se describieron en el capítulo 3. Se seleccionaron 40 señales para cada análisis y se escalaron para ser utilizadas en este modelo con un periodo de $T_I=0.85$ seg. La discusión de los resultados se centra en la distorsión de entrepiso y distorsión global. La tendencia de los resultados se estudia mediante un análisis estadístico utilizando gráficas con una distribución log normal y densidad de probabilidad.

Se llegó a la conclusión de que, en general, es más crítico el escenario donde se modeló un pandeo prematuro en el sistema de contravientos de los niveles inferiores para la estabilidad global de los marcos. Asimismo, se notó poca dependencia de la configuración de los contravientos, donde el caso crítico es la configuración X o cruz cuando las diagonales no están unidas al centro, puesto que incrementan la longitud no arriestrada. Finalmente, respecto la discusión sobre la sección transversal considerada, el pandeo local es más crítico cuando se usa un perfil IR como contraviento, pero la fractura es muy poco probable cuando se siguen los criterios de las NTC, así que resulta una sección con una respuesta estable.

Capítulo 4. Análisis de resultados

4.1 Introducción

Se realizaron los análisis no lineales para el modelo de 6 niveles en configuración V invertida y X, con un pandeo prematuro en los niveles 2, 4 y 6, como se describió en el capítulo 3. Se seleccionaron 40 señales para cada análisis y se escalaron para ser utilizadas en este modelo con un periodo de $T= 0.85$ seg. La discusión de los resultados se centra en la distorsión de entrepiso y distorsión global. Con este propósito, se desarrolló un conjunto de hojas de cálculo en el *software Excel* para facilitar el proceso de la información obtenida de los análisis.

Las distorsiones en los análisis que se obtuvieron eran para cada instante de tiempo y cada entrepiso, de modo que la cantidad de información era demasiada. Con ayuda de las hojas de cálculo, se seleccionó la distorsión máxima por nivel para cada una de las 40 señales.

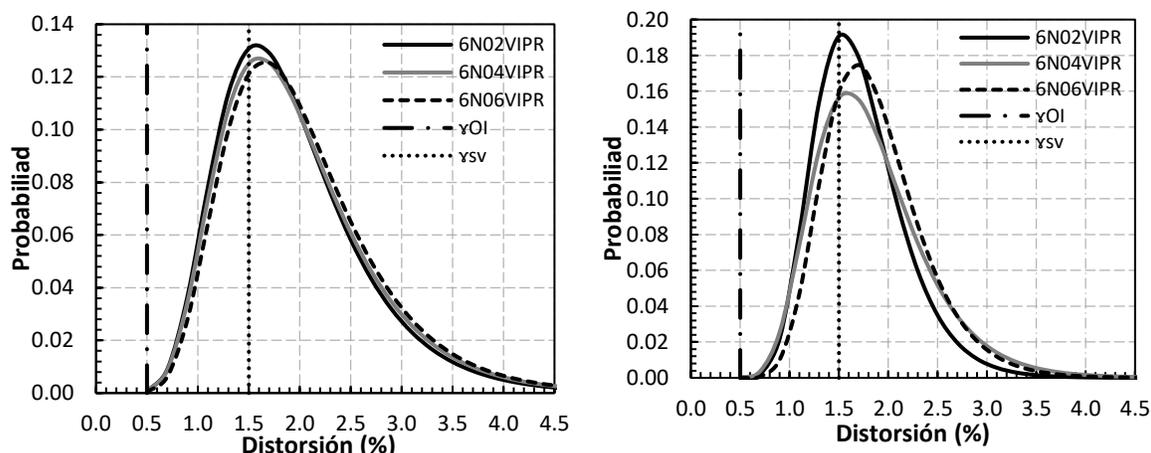
Por ejemplo, para el modelo de 6 niveles con configuración de contravientos en V invertida, se realizaron 40 análisis suponiendo pandeo global prematuro en los contravientos del nivel 2; luego se realizaron 40 análisis suponiendo el pandeo global en el sistema de contravientos del nivel 4 y, finalmente, 40 en el nivel 6. En total para el modelo de 6 niveles en configuración V invertida se realizaron 360 análisis; considerando los 3 cambios de sección del sistema de contravientos que se utilizaron.

Al realizar los análisis no lineales y procesando la información, se obtuvieron graficas de distribución log normal y de densidad de probabilidad. Teniendo en consideración que la variabilidad estadística podría desviar los resultados, en esta investigación se supusieron dos escenarios: un análisis sin error en los datos estudiados y un análisis considerando un error del 10% en la información recabada. En la figura 4.1 se muestra la tendencia de los resultados a partir de una distribución log-normal para escenarios donde se supuso el pandeo prematuro de los contravientos en el piso 2, piso 4 y piso 6 con una configuración de contravientos en chevrón usando una sección I.

La variabilidad es una característica muy importante en el procesamiento de datos, se refiere a que tan disperso esta un conjunto de datos (Mendenhall 1982). Al obtener el total de los datos, fue muy evidente que una pequeña fracción de estos se encontraba muy alejado del resto. Por esa razón, se determinó utilizar un error porcentual del 10%, puesto que esos datos que se localizaban lejanos a la media generaban que la campana de frecuencia tuviera una tendencia con una mayor dispersión. Uno de los motivos por los que se determinó seguir este procedimiento fue porque, estos datos generaban una concentración en el cuartil superior de la curva; sin embargo, no correspondían con el resto de los datos y ocasionaba que la campana de probabilidad fue asimétrica.

Para el procesamiento de datos existen diversas distribuciones de probabilidad, éstas se refieren a un grupo de todos los valores posibles de una variable aleatorio y sus

probabilidades relacionadas. Por ejemplo, la distribución de probabilidad normal es un tipo de distribución continua con forma de campana que es una función de los parámetros, la media y la desviación estándar (Triola y Pineda 2004). La distribución log-normal se utiliza para describir variables que tienen magnitudes que están distribuidas de manera asimétrica y que toman valores muy grandes, se caracteriza por el promedio y la desviación estándar de la variable original, se obtiene de aplicar la transformación logarítmica a una distribución normal (Luceño y Gonzáles 2015). De esta manera, se determina utilizar una distribución log-normal para procesar e ilustrar los resultados.



a) Escenario sin error porcentual (0%)

b) Análisis considerando un error porcentual del 10%

Figura 4.1. Comparación de resultados con una distribución log-normal

Cuando se utiliza un error del 0% la campana tiende a extenderse a la derecha, lo que implica una mayor variabilidad de distorsiones grandes. De hecho, se identificó que estos resultados están relacionados con cuatro señales en particular (BO39NS, MI15NS, RM48EW y TL55EW). En contraste, cuando se utiliza el 10% de error, las campanas tienden a ser simétricas. En ambos casos, se nota una relación de los resultados obtenidos con el entrepiso donde se supuso el pandeo prematuro de los contravientos.

Con base en estos resultados, se decidió considerar en la discusión los resultados considerando un error porcentual del 10%; aunque más adelante se incluyeron también los resultados sin error porcentual con fines de documentar detalladamente los resultados obtenidos.

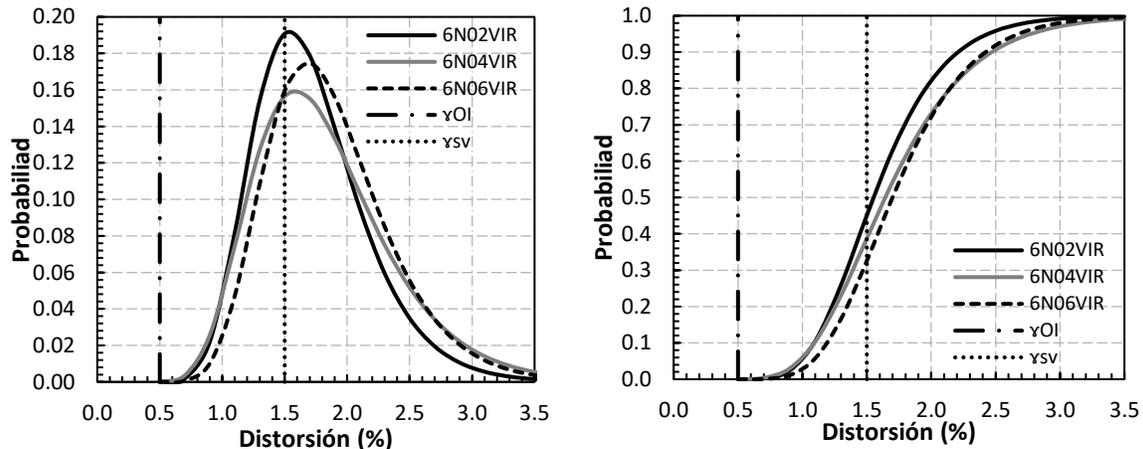
En las siguientes secciones se discutirán los resultados en función del entrepiso donde se supuso el pandeo global prematuro de los contravientos, mientras que el resto inicia el sismo sin daño. Luego, la discusión se realiza comparando los resultados en función de la sección transversal como solución del sistema de contravientos. Finalmente, los resultados se comparan en función de la configuración de los contravientos.

4.2 Influencia del entrepiso con pandeo global prematuro con el error del 10%

En esta sección se discute la influencia de la ubicación del pandeo global prematuro, en el nivel 2, 4 y 6 para el modelo de 6 niveles; mientras que en los contravientos de los otros entrepisos no tenían daño al inicio de los análisis. Se incluyen los tres perfiles utilizados para las dos configuraciones de contravientos en V invertida y en X.

4.2.1 Resultados de contravientos con sección I para cada piso (2, 4 y 6)

En la figura 4.2 se muestra la tendencia de las distorsiones de entrepiso máximas obtenidos de los análisis no lineales cuando se supone que los contravientos inician el sismo con un pandeo prematuro en el piso 2 mientras que el resto de los contravientos no tienen daño que se denominó 6N02VIR con una configuración en V invertida con sección IR. Luego, los resultados del modelo con el pandeo global prematuro en el piso 4 que se nombró 6N04VIR. Finalmente, en el piso 6 que se denominó 6N06VIR. Se incluyen los límites de distorsión propuestos en las NTC-D-Sismo (2023) para la revisión de Operación Inmediata (γ_{OI}) y Seguridad de Vida (γ_{SV}) considerando una estructura convencional.



a) Distribución log normal

b) Densidad de probabilidad

Figura 4.2. Comparación de resultados en configuración V invertida sección IR.

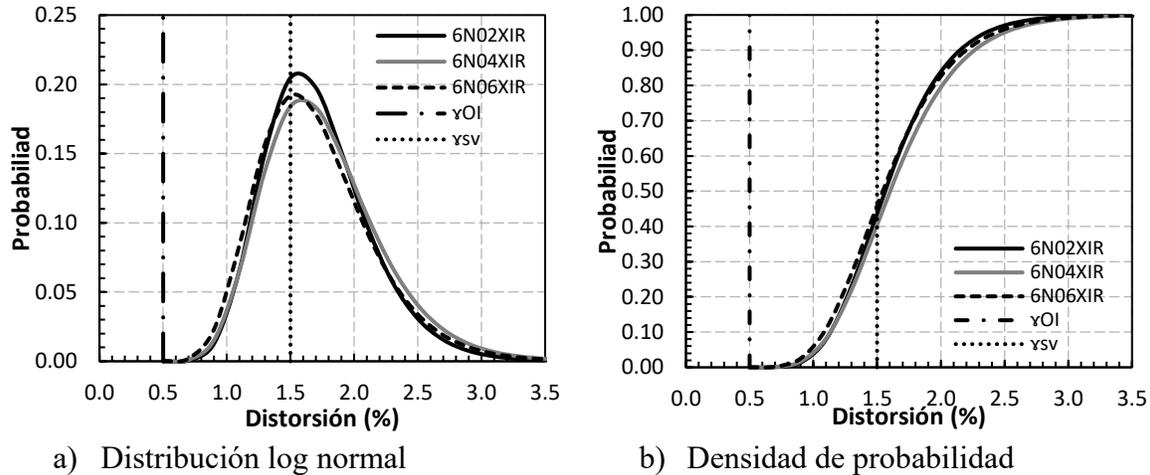


Figura 4.3. Comparación de resultados en configuración X sección IR.

En la figura 4.2a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota una ligera influencia de la localización de los pisos que se supusieron con pandeo global prematuro. Cuando el pandeo global se supone en el piso 2 parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.52%, que se aproxima al límite de las NTC-DS (2023) igual a 1.50%. Mientras que, si el pandeo se supone en los pisos superiores, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en pisos inferiores, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor. La probabilidad de que ocurra el pandeo local aumenta con el incremento de la distorsión de entrepiso reportada en los análisis.

En la figura 4.2b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 45%, en el nivel 4 de 40% y en el nivel 6 de 33%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%, siendo el criterio de las NTC-DS-2023

En la figura 4.3a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal cuando se consideró una configuración de contravientos en X. Se nota una ligera influencia de la localización de los pisos que se supusieron con pandeo global prematuro. Cuando el pandeo global se supone en el piso 2 parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.60%, que se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%). Mientras que, si el pandeo se supone en los pisos superiores, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5% pero menor que 1.7%. Entonces, se ratifica la tendencia identificada previamente, donde parecería más crítico que el pandeo global ocurra en pisos inferiores, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En la figura 4.3b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del

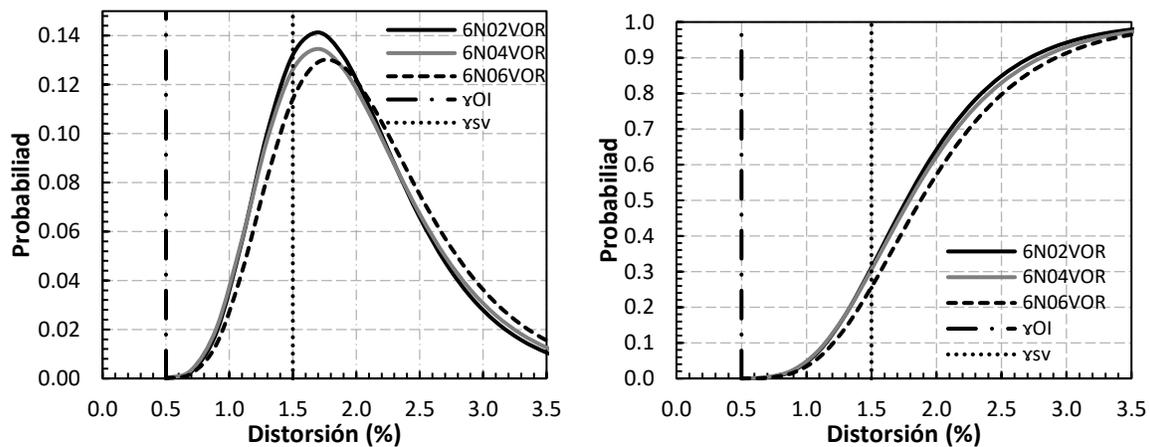
42%, en el nivel 4 de 40% y en el nivel 6 de 44%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

Si se compara el comportamiento de los contravientos en condiciones similares en configuración V invertida y X, cuando se utiliza contravientos en X y perfiles IR, la variabilidad en las curvas es menor con respecto a la configuración V invertida.

4.2.2 Resultados de contravientos con sección OR para cada piso (2, 4 y 6)

En la figura 4.4a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Cuando el pandeo global se supone en el piso 2 los resultados tienen una media de 1.70%, en el piso 4 la media es de 1.65% y en el nivel 6 es de 1.75%, en todos los casos se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%). Sin embargo, es más crítico que el pandeo global ocurra en pisos inferiores, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

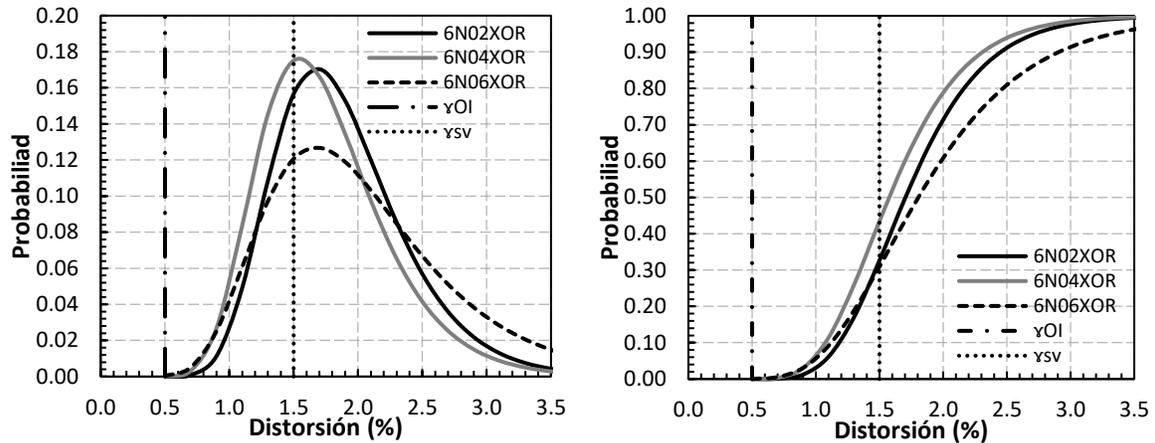
En la figura 4.4b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 30%, al igual que el nivel 4 y en el nivel 6 de 25%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%. Este resultado hace notar que si se diseña una estructura considerando un límite del 1.5%, la probabilidad de que la estructura desarrolle una distorsión en forma estable incluso más grande que 1.5% es muy alta cuando se usa una sección cajón para el sistema de contravientos.



a) Distribución log normal

b) Densidad de probabilidad

Figura 4.4. Comparación de resultados en configuración V invertida sección OR.



a) Distribución log normal

b) Densidad de probabilidad

Figura 4.5. Comparación de resultados en configuración X sección OR.

En la figura 4.5a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal cuando los contravientos tienen una configuración en X con sección transversal OR. Cuando el pandeo global se supone en el piso 2 y 4 los resultados tienen una media de 1.60% y 1.70% respectivamente. Sin embargo, en el piso 4 la probabilidad es mayor que en el piso 2, en el piso 6 la media es de 1.70% pero la probabilidad es menor que en los niveles antes descritos. En todos los casos se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%), donde es más crítico que el pandeo global ocurra en los pisos 2 y 4 pisos, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En la figura 4.5b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 30%, al igual que el nivel 6 y en el nivel 4 de 45%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

Cuando se utiliza el perfil OR en una configuración de contravientos en V invertida o chevrón, el comportamiento cuando el pandeo global prematuro se encuentra en un determinado nivel es similar, es decir en los tres casos de estudio la tendencia de las curvas tiende a los mismos resultados, esto cambia cuando se utiliza la configuración X, ya que, si el pandeo global se encuentra en el nivel 6, la probabilidad de ocurrencia es menor que en los niveles inferiores. También se nota que cuando se usa un perfil OR para el sistema de contravientos, las curvas se mueven ligeramente a la derecha, lo que implica que la restricción de las NTC-DS (2023) es más conservadora que cuando se usa una viga I.

4.2.3 Resultados de contravientos con sección ángulo para cada piso (2, 4 y 6)

En la figura 4.6a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota una ligera influencia de la localización de los pisos que se supusieron con pandeo global prematuro. Cuando el pandeo global se supone en el piso 4 parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.80%. Mientras que, si el pandeo global se supone en los pisos 2 y 6, se reporta un intervalo más amplio de resultados, para el nivel 2 la media es de 1.85% y para el nivel 6 de 1.75%. En todos los casos la tendencia es que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en pisos 4.

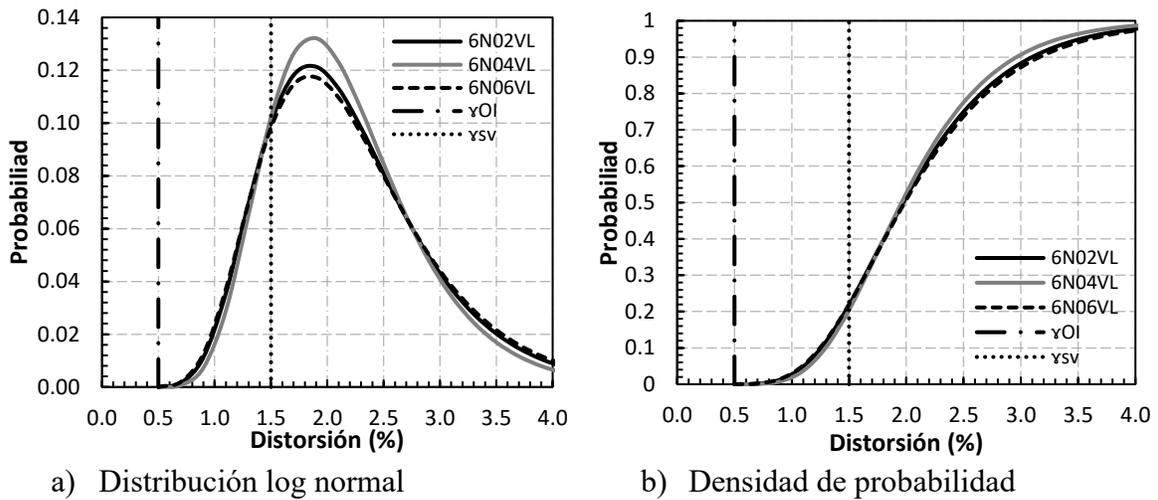


Figura 4.6. Comparación de resultados en configuración V invertida sección L.

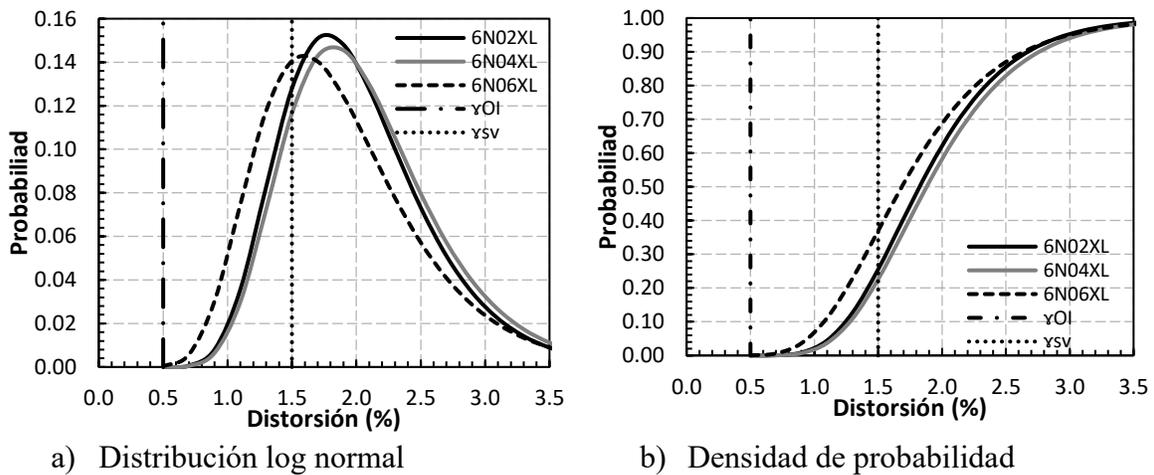


Figura 4.7. Comparación de resultados en configuración X sección L.

En la figura 4.6b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una cierta distorsión. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es

del 30%, al igual que el nivel 6 y en el nivel 4 de 45%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

En la figura 4.7a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Para los tres casos de estudio, la probabilidad de ocurrencia es similar, cuando el pandeo global se supone en el piso 2 y 4 y reportan resultados con una media de 1.70% y 1.80% respectivamente. Con base en los resultados, la media en el piso 6 es de 1.60%, por lo que la probabilidad es menor que cuando se supone un pandeo global prematuro en los niveles antes descritos. En todos los casos se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%). Sin embargo, es más crítico que el pandeo global ocurra en los pisos 2 y 4 pisos, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En la figura 4.7b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una distorsión de entrepiso. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 23%, al igual que el nivel 4 y en el nivel 6 de 38%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

4.3 Influencia de la configuración de los contravientos con el error del 10%

En las siguientes figuras se muestran las tendencias de las distorsiones de entrepiso máximas obtenidos de los análisis no lineales, en términos de la probabilidad y la curva de fragilidad de los 120 análisis que se realizaron para cada perfil y cada configuración.

Con el propósito de ofrecer una referencia física a estos resultados analíticos, se incluyen los resultados experimentales de contravientos reportados en Fell *et al.* (2006) En esta investigación se estudian los hallazgos experimentales y las implicaciones de diseño de diecinueve pruebas de contravientos concéntricos de acero. Se utilizaron secciones huecas rectangulares OR, sección redonda OC y sección IR, con diferentes relaciones de ancho-espesor y relaciones de esbeltez sujetas a varios historiales de carga.

En la siguiente tabla se resumen los perfiles utilizados, el tipo de pruebas y las propiedades geométricas de las secciones.

Tabla 4.1. Secciones de contravientos y variables de carga (Fell *et al.* 2006)

Test #	Sección	Historia de Carga	Intervalo de carga	Relación ancho-grueso	$\frac{KL_B}{r}$ $K = 1.0$
1	OR 114 mm x 6.4 mm	Sismo lejano	Lento	14.20	77
2	OR 114 mm x 6.4 mm	Sismo cercano	Lento	14.20	77
3	OR 114 mm x 6.4 mm	Sismo lejano	Rápido	14.20	77
4	OR 114 mm x 9.5 mm	Sismo lejano	Lento	8.46	83
5	OR 114 mm x 9.5 mm	Sismo lejano	Rápido	8.46	83
6	IR 305 mm x 23.9 kg/m	Sismo lejano	Lento	14.20	155

7	IR 305 mm x 23.9 kg/m	Sismo cercano	Lento	14.20	155
8	IR 305 mm x 23.9 kg/m	Sismo lejano	Lento	14.20	155

En la tabla 4.2. Se resumen los resultados de las pruebas experimentales para las secciones de OR e IR. Los términos F-F y N-F hacen referencia a Sismo lejano (*Far-Field*) y Sismo cercano (*Near-Field*), respectivamente.

Tabla 4.2. Resultados de pruebas experimentales Fell *et al.* (2006)

Test #	Sección	Historia de carga	Pandeo global Distorsión (%)	Pandeo local Distorsión (%)	Inicio de fractura Distorsión (%)	Perdida de fuerza Distorsión (%)
1	OR 114 mm x 6.4 mm	F-F	0.30	1.85	2.68	2.68
2	OR 114 mm x 6.4 mm	N-F	1.00	2.50	6.00	6.00
3	OR 114 mm x 6.4 mm	F-F	0.34	2.10	2.10	2.10
4	OR 114 mm x 9.5 mm	F-F	0.29	5.00	5.00	5.00
5	OR 114 mm x 9.5 mm	F-F	0.33	4.30	4.30	4.30
6	IR 305 mm x 23.9 kg/m	N-F	1.30	6.00	6.00	6.00
7	IR 305 mm x 23.9 kg/m	F-F	0.16	5.00	5.00	N/A
8	IR 305 mm x 23.9 kg/m	N-F	7.20	8.00	8.00	8.00

Para el caso de estudio de esta investigación el historial de carga F-F se apega al utilizado en los modelos analíticos.

Se encontró que la fractura dúctil durante el pandeo cíclico inelástico es impulsada por la amplificación de la deformación debido al pandeo local de la sección transversal. La forma de la sección transversal, la relación ancho-grueso y la relación de esbeltez, son los factores más importantes que controlan la ductilidad del contraviento.

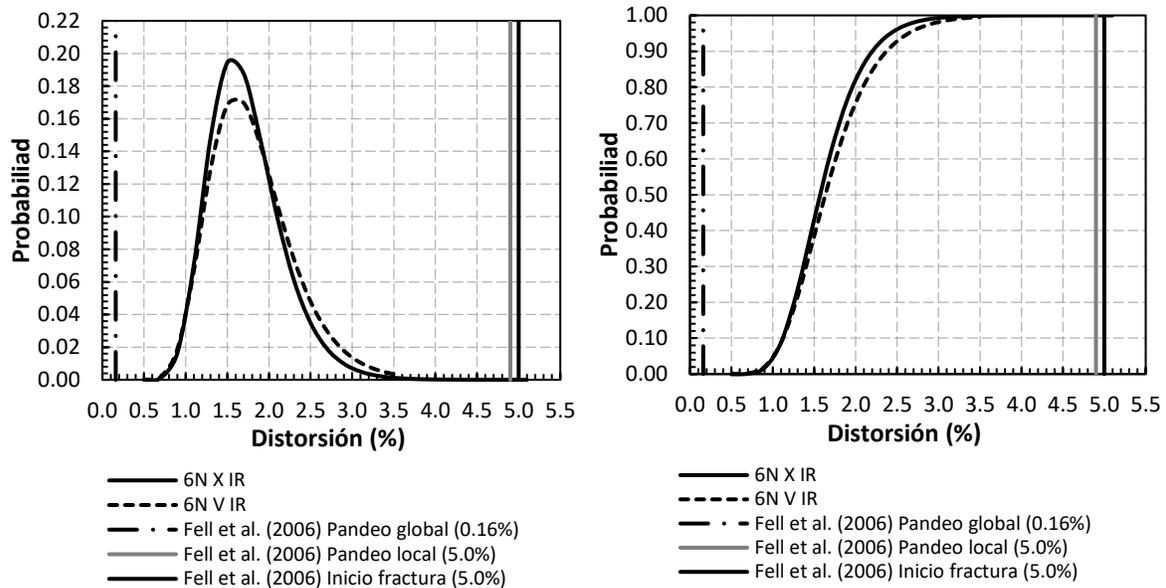
Se observa que los perfiles OC e IR son más resistentes a la fractura en comparación con miembros de perfil OR, y que desarrollan grandes deformaciones inducidas por pandeo local en las esquinas.

Además, en la discusión de resultados se comparan con las magnitudes obtenidas en Lignos & Karamanci (2013) para el pandeo global, pandeo local y fractura en cada una de las secciones propuestas y es necesario resaltar que en el estudio de Lignos & Karamanci (2013) los perfiles utilizados en las pruebas no cumplían en su mayoría con los límites ancho/grueso para calificarlos como una sección dúctil. En contraste, Fell *et al.* (2006) consideró perfiles OR e I que cumplen con algunas de las relaciones descritas, en NTC-DCEA-2023 (2023) para ser considerados perfiles de ductilidad media.

4.3.1 Sección I

En la figura 4.8 se comparan ambos sistemas de contravientos utilizando el perfil IR, donde se incluyen los resultados de pruebas experimentales. En la figura 4.8a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal, cuando se utiliza la configuración en cruz X los resultados tienen una media de 1.60% con una probabilidad de 0.194, y para la configuración en V invertida los resultados tienen una media de 1.70% con una probabilidad de 0.170, en ambos casos se supera el límite establecido de las NTC-DS (1.50%). Así, es más crítico que el pandeo ocurra en la configuración en X, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En las pruebas experimentales de Fell *et al.* (2006), el pandeo local y la consecuente fractura ocurre después de varios ciclos, por lo que las distorsiones de entrepiso asociadas tienen magnitudes superiores a 5.0%. Esto hace notar que si se diseña un edificio considerando una distorsión igual a 1.5% la probabilidad de que ocurra pandeo local es muy baja.



a) Distribución log normal

b) Densidad de probabilidad

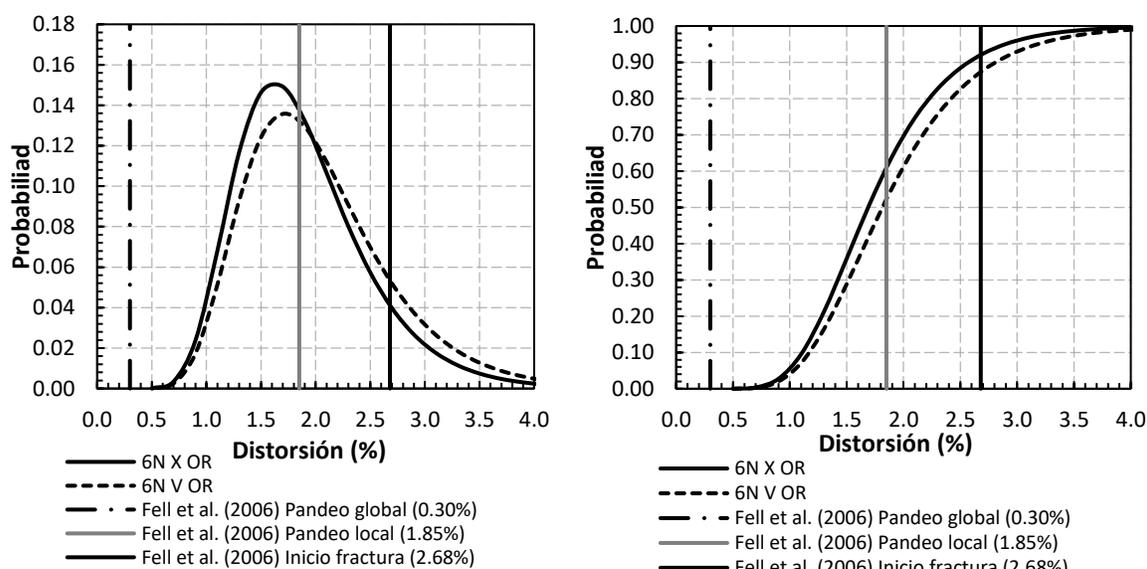
Figura 4.8. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección IR.

Conforme a Lignos y Karamanci (2013) para contravientos con sección IR el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.30%, lo que significa que los contravientos del edificio tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. Luego la distorsión por pandeo local ocurriría a 1.01% lo que implica que conforme a la figura 4.8b, la probabilidad de que los contravientos ante el sismo de diseño reporten pandeo global es bastante seguro (casi del 95%). Finalmente, la distorsión por fractura ocurre a 3.10% de tal manera que siguiendo el procedimiento de las NTC-DS, la probabilidad de que ocurra fractura es muy pequeña. Sin embargo, se hace notar que este estudio hace un conteo de resultados de pruebas experimentales que no consideran los requisitos de las NTC-DCE-Acero (2023) respecto a la relación ancho – grueso y la relación de esbeltez máxima para ser considerado como parte de una estructura dúctil.

Comparando con los resultados obtenidos de Fell *et al.* (2006) el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.16%, lo que significa que los contravientos del edificio tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. Luego la distorsión por pandeo local ocurriría al 5.0%, lo que implica que conforme a la figura 4.8b ninguno de los casos de estudio tendría pandeo local y, por consiguiente, tampoco fractura.

4.3.2 Sección OR

En la figura 4.9 se comparan ambos sistemas de contravientos utilizando el perfil OR y se incluyen los resultados de pruebas experimentales. En la figura 4.9a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal en función de la configuración de los contravientos en V invertida o en X. Cuando se utiliza la configuración en cruz X los resultados tienen una media de 1.60% con una probabilidad de 0.149, y para la configuración en V invertida los resultados tienen una media de 1.80% con una probabilidad de 0.135. En ambos casos se supera el límite establecido de las NTC-DS (1.50%); sin embargo, es más crítico que el pandeo ocurra en la configuración en X, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.



a) Distribución log normal

b) Densidad de probabilidad

Figura 4.9. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección OR.

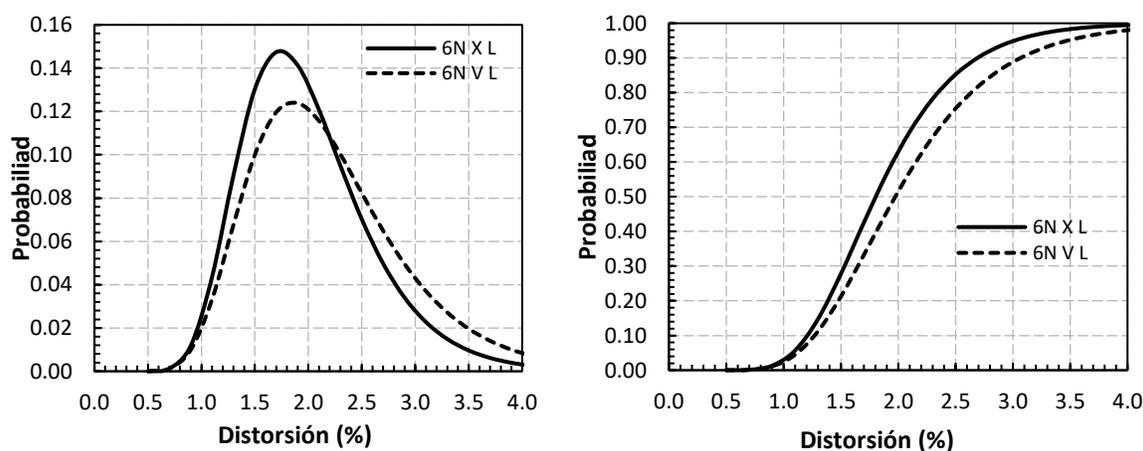
Conforme a Lignos y Karamanci (2013) para contravientos con perfil hueco cuadrado el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.40%, lo que significa que los contravientos del edificio tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. Luego la distorsión por pandeo local ocurriría a 1.02% lo que implica que conforme a la figura 4.9b, el 95% tendrían pandeo global y, por último, la distorsión por fractura ocurre a 1.60% de tal manera que el 35% de los casos estudiados en configuración V invertida y el 43% en cruz X, tendría fractura. Este resultado sería muy grave; sin embargo, se hace notar que Lignos y Karamanci (2013) consideran contravientos que no cumplen los requisitos de las NTC-DCE-Acero (2023) respecto a la

relación ancho – grueso y la relación de esbeltez máxima para ser considerado como parte de una estructura dúctil.

Comparando con los resultados obtenidos de Fell *et al.* (2006), el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.30%, lo que significa que los contravientos de los edificios diseñados tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. La distorsión por pandeo local ocurriría al 1.85%, lo que implica que conforme a la figura 4.8b, el 50% de los casos estudiados en configuración V invertida y el 40% en cruz X, tendrían pandeo local. Finalmente, la fractura ocurriría al 2.68% de tal manera que el 13% de los casos estudiados en configuración V invertida y el 7% en cruz X superarían ese límite, por lo que podrían reportar fractura.

4.3.3 Sección ángulo

En la figura 4.10 se comparan ambos sistemas de contravientos con una configuración en V invertida y una configuración en X utilizando el perfil ángulo L y se incluyen los resultados de pruebas experimentales. En la figura 4.10a se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Cuando se utiliza la configuración en cruz X, los resultados tienen una media de 1.70% con una probabilidad de 0.147, y para la configuración en V invertida los resultados tienen una media de 1.90% con una probabilidad de 0.125. En ambos casos se supera el límite establecido de las NTC-DS (1.50%); sin embargo, es más crítico que el pandeo ocurra en la configuración en X, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.



a) Distribución log normal

b) Densidad de probabilidad

Figura 4.10. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección L.

En la comparación con los reportes experimentales, conforme a Lignos y Karamanci (2013) para contravientos con sección ángulo, el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.27%, lo que significa que los contravientos del edificio tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. Luego, la distorsión por pandeo local ocurriría a 0.70% lo que implica que conforme a la figura 4.9b que menos del 95% superarían ese límite por lo que tendrían pandeo global. Por último, la distorsión por fractura ocurre a 1.43%, de tal manera que el 82% de los casos

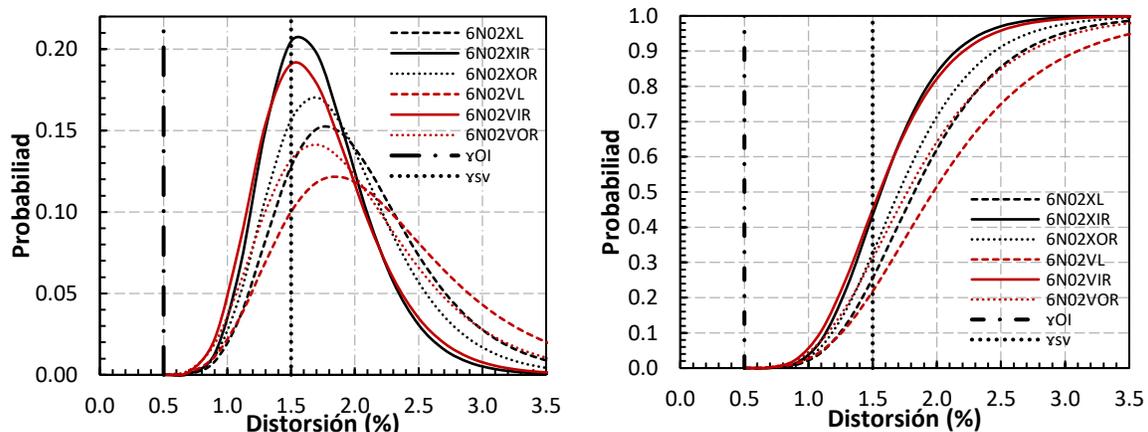
estudiados en configuración V invertida y el 75% en cruz X, tendría fractura, puesto que superan ese límite. Este resultado hace notar que la sección de ángulo tiene una mayor probabilidad a desarrollar pandeo local y, por consiguiente, fractura. Sin embargo, se hace notar que este estudio hace un conteo de resultados de pruebas experimentales que no consideran los requisitos de las NTC-DCE-Acero (2023) respecto a la relación ancho – grueso y la relación de esbeltez máxima para ser considerado como parte de una estructura dúctil.

4.4 Influencia del tipo de sección de los contravientos con el error del 10%

En las siguientes figuras 4.11 a 4.13 se muestra la tendencia de las distorsiones de entrepiso máximas obtenidos de los análisis no lineales cuando se supone que los contravientos en el piso 2, 4 y 6 tienen un pandeo global prematuro con una configuración en chevrón (V invertida) y en cruz X. Se incluyen los límites de distorsión propuestos en las NTC-D-Sismo (2023) para la revisión de Operación Inmediata (γ_{OI}) y Seguridad de Vida (γ_{SV}).

4.4.1 Pandeo prematuro en piso 2

En la figura 4.11 se comparan ambos sistemas de contravientos para cada uno de los perfiles utilizados con pandeo prematuro en el nivel 2. Las curvas que incluyen una X se refieren a la configuración en cruz; mientras que las curvas que incluyen una V se refieren a la configuración en V invertida. Asimismo, se hace una distinción en el uso de la sección transversal utilizada en los contravientos, donde L indica que se utilizó un ángulo, IR indica que se utilizó una sección IR y, finalmente, OR indica que se utilizó una sección cajón rectangular.



a) Distribución log normal

b) Densidad de probabilidad

Figura 4.11. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 2.

En la figura 4.11a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota la influencia de la configuración y de los perfiles del contraviento, cuando el pandeo global se supone en el piso 2 con perfil IR sin importar la configuración parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de

1.55%, que se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%). Mientras que, si se utilizan los perfiles OR y ángulo L, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en contravientos con perfil IR, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local. Esto es, la probabilidad de que ocurra pandeo local es más crítica cuando se utiliza un perfil IR.

En la figura 4.11b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco cuando se diseña para una distorsión de 1.5% con pandeo global prematuro en el nivel 2 utilizando un perfil IR en ambas configuraciones desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 45%, para el perfil OR de 32% y perfil L de 20%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

4.4.2 Pandeo prematuro en piso 4

En la figura 4.12 se comparan ambas configuraciones de contravientos para cada uno de los perfiles utilizados con pandeo prematuro en el nivel 4, en función del tipo de sección utilizada en el sistema de contravientos y su configuración.

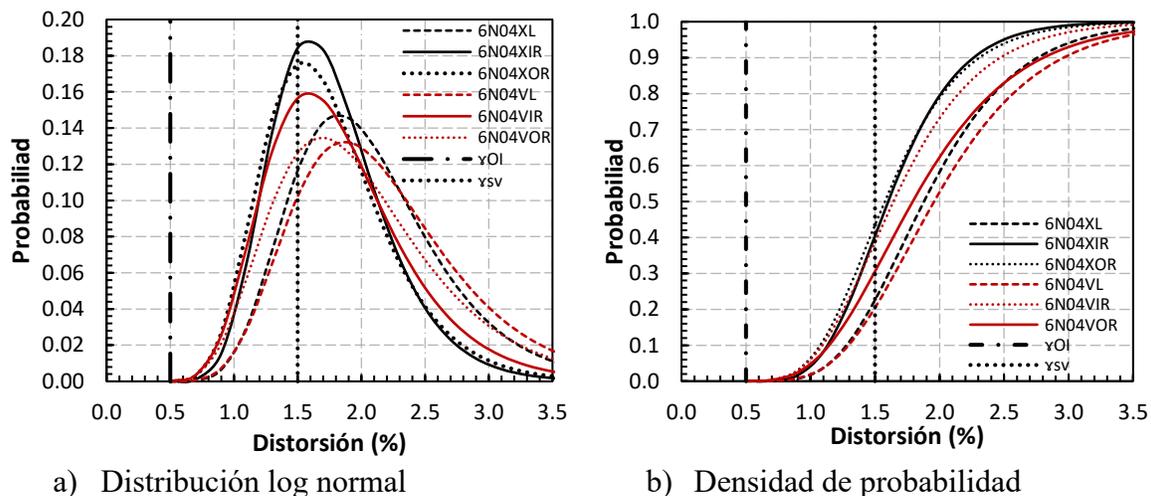


Figura 4.12. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 4.

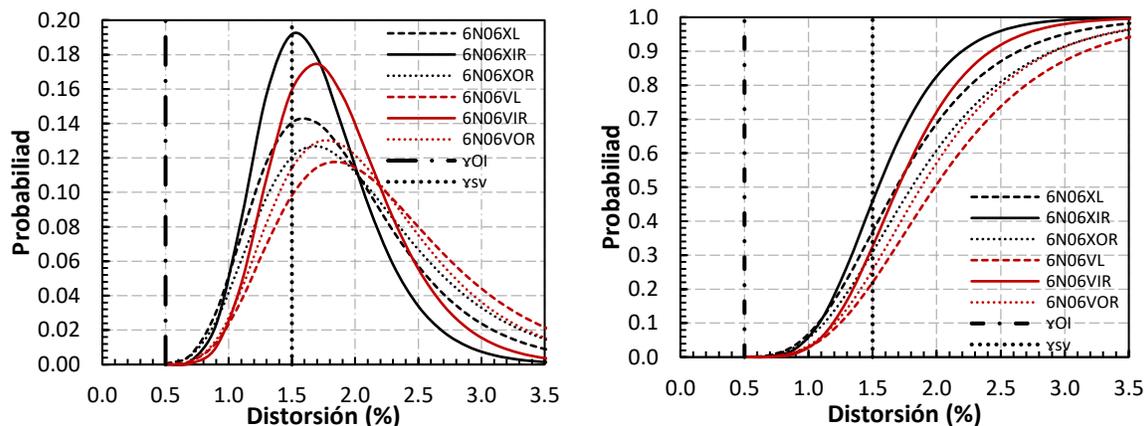
En la figura 4.12a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota la influencia de la configuración y de los perfiles del contraviento, cuando el pandeo global se supone en el piso 4 con perfil IR y OR en configuración cruz X. Con base en los resultados, parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.60% y 1.55%, respectivamente. Mientras que, si se utilizan los perfiles con ángulos, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en contravientos con perfil IR y OR en configuración X, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En la figura 4.12b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una cierta magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 4 utilizando un perfil IR y OR ambas configuraciones y OR en V invertida desarrolle una distorsión menor al 1.5% tiene una probabilidad del 60% de que se supere esa magnitud de distorsión de entrepiso. Para el perfil ángulo la probabilidad de que la distorsión de entrepiso es del 80% cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

4.4.3 Pandeo prematuro en piso 6

En la figura 4.13 se comparan ambas configuraciones de contravientos para cada uno de los perfiles utilizados con pandeo prematuro en el nivel 6 comparando la configuración con V invertida y en cruz.

En la figura 4.13a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota la influencia de la configuración y de los perfiles del contraviento, cuando el pandeo global se supone en el piso 6 con perfil IR en ambas configuraciones X y chevrón, parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.55% y 1.60% respectivamente. Mientras que, si se utilizan las secciones con ángulo y el perfil OR en los contravientos, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en el nivel 6 con contravientos con perfil IR en ambas configuraciones, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.



a) Distribución log normal

b) Densidad de probabilidad

Figura 4.13. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 6.

En la figura 4.13b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 6 utilizando un perfil IR en configuración cruz desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 45%, para los perfiles restantes se tiene un intervalo que va desde 23% a 35% en ambas configuraciones, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

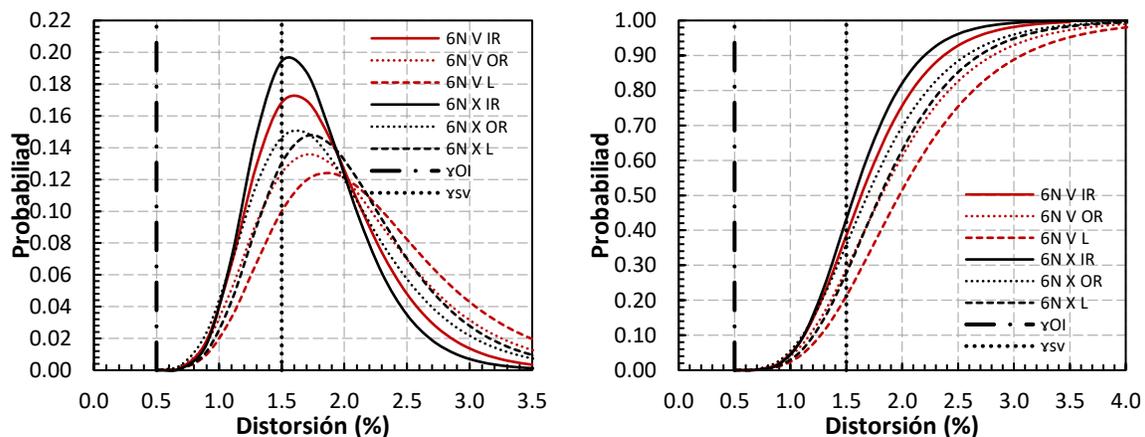
4.5 Comparación entre secciones y configuración de contravientos con el error del 10%.

En esta sección se discute la influencia del tipo de sección y configuración del contraviento. En la figura 4.14 se incluyen los resultados para cada perfil sin importar el nivel donde se supuso el pandeo prematuro en el sistema de contravientos. Se incluyen los límites de distorsión propuestos en las NTC-D-Sismo (2023) para la revisión de Operación Inmediata (γ_{OI}) y Seguridad de Vida (γ_{SV}) considerando una estructura convencional.

En la figura 4.14a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota una ligera influencia en primera instancia por el tipo de sección y la configuración del contraviento.

Cuando se utiliza el perfil IR, parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.55% para la configuración X y de 1.60% para la configuración V invertida. En segundo caso con una menor variabilidad es el perfil OR con una media de 1.65% y 1.70% para configuración X y V invertida, respectivamente. Por último, para el perfil ángulo se reporta una media de 1.73% y 1.88% para la configuración X y V invertida respectivamente con una mayor variabilidad de datos. En todos los casos, la media de las distorsiones se aproxima al límite de las NTC-DS (2023) igual a 1.50% para seguridad de vida.

Los marcos con contravientos de sección IR parecen estar relacionados con una distorsión de entrepiso más pequeño y en una primera impresión se podrían señalar como la sección menos estable. Sin embargo, pese a que el pandeo local ocurre a una distorsión menor al 1.50%, la fractura está asociada a distorsiones de entrepiso del 3.0%, por lo que difícilmente tendría una respuesta deficiente.



a) Distribución log normal

b) Densidad de probabilidad

Figura 4.14. Comparación de resultados, para todos los perfiles en configuración X y V invertida.

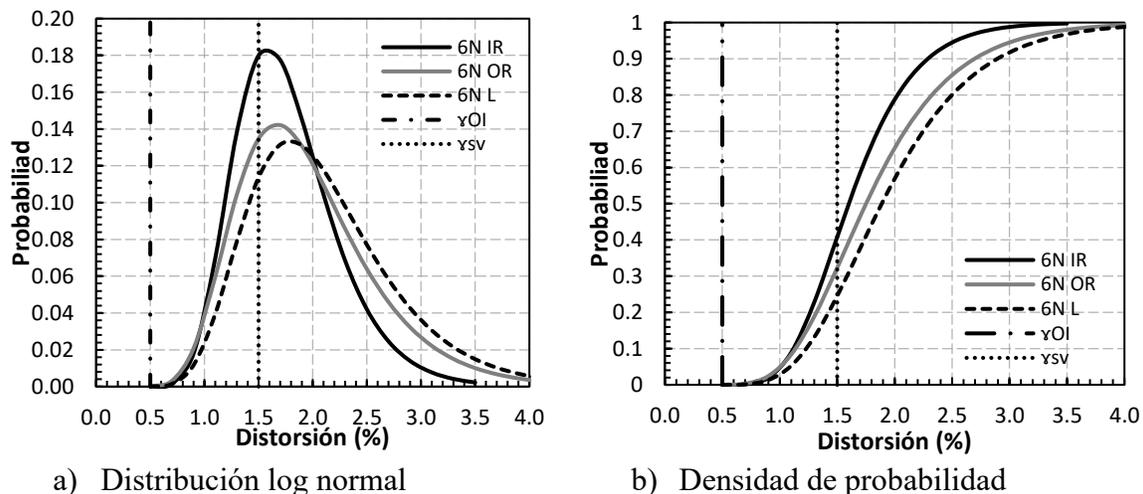
En la figura 4.14b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con perfil IR desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 45% y 38% para la configuración X y V invertida respectivamente, que es el caso donde la probabilidad de ocurrencia es mayor

entre los casos analizados. La probabilidad de que un marco con perfil OR desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 37% y 28% para la configuración X y V invertida respectivamente. Finalmente, la probabilidad de que un marco con perfil ángulo desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 27% y 22% para la configuración X y V invertida respectivamente, Estos casos evalúan la respuesta de estructuras cuando se diseñan con un límite de 1.5%, siguiendo el criterio de las NTC-DS-2023.

4.6 Comparación entre sección de contravientos con el error del 10%

En esta sección se discute la influencia del tipo de sección sin importar el tipo de configuración del contraviento, en la figura 4.15 se incluyen los resultados para cada perfil sin importar el nivel donde se supuso el pandeo prematuro y configuración del sistema. En la sección anterior, se demostraba que la sección en cruz donde no se unen los contravientos al centro es el escenario más desfavorable, puesto que tiene la mayor longitud no arriostrada. Esa tendencia es desfavorable, pero en la comparación es viable, puesto que se repite en todas las secciones evaluadas. En los resultados, se incluyen los límites de distorsión propuestos en las NTC-D-Sismo (2023) para la revisión de Operación Inmediata (γ_{OI}) y Seguridad de Vida (γ_{SV}) considerando una estructura convencional.

En la figura 4.15a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota una ligera influencia por el tipo de sección del contraviento. Cuando se utiliza el perfil IR hay una menor variabilidad de los resultados con una probabilidad más grande de que la media de 1.60%. La sección que tiene una menor variabilidad es el perfil OR con una media de 1.70%. Por último, para el perfil ángulo se reporta una media de 1.80%. En todos los casos se aproxima al límite de las NTC-DS (2023) igual a 1.50%.



a) Distribución log normal
b) Densidad de probabilidad
Figura 4.15. Comparación de resultados, para todos los perfiles en configuración X y V invertida.

El escenario que reporta una mayor probabilidad de que el entrepiso desarrolle una distorsión de entrepiso máxima menor a 1.5% es cuando se usa una sección IR. Sin embargo, como se

discutió anteriormente, esta sección está protegida para desarrollar una fractura. Por otra parte, los marcos con contravientos con una sección cajón tiene una probabilidad de desarrollar una distorsión de entrepiso más grande que el límite que establecen las NTC-DS. Lo que implicaría que los marcos son estables, aunque alcancen esa magnitud. Finalmente, los marcos con contravientos de sección ángulo reportan una probabilidad de desarrollar distorsiones máximas un poco mayores al 1.5%

En la figura 4.15b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con perfil IR desarrolle una distorsión menor al 1.5% es de 41%, la probabilidad de que un marco con perfil OR desarrolle una distorsión menor al 1.5% es de 32 y, por último, la probabilidad de que un marco con perfil ángulo desarrolle una distorsión menor al 1.5% es de 23%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%, siendo el criterio de las NTC-DS-2023.

La menor distorsión de entrepiso se desarrolla en un marco con contravientos con una sección IR, la mayor distorsión ocurre con una sección de ángulo. Sin embargo, la sección IR está bien protegida contra la fractura, mientras que el ángulo está relacionado con una fractura inminente como se muestra en la tabla 4.3. Dada la poca diferencia en las distorsiones entre ambas secciones, los resultados de la figura 4.15b sugieren que los contravientos con sección ángulo no deberían permitirse como marcos con contravientos concéntrico de ductilidad media ($Q=3$).

Tabla 4.3. Promedio de distorsiones de entrepiso (adaptada de Lignos y Karamanci 2013)

Sección	Estado de daño		
	DS1	DS2	DS3
OR	0.40	1.02	1.60
OC	0.41	0.96	2.75
IR	0.30	1.01	3.10
Ángulo L	0.27	0.70	1.43

4.7 Conclusiones

Después de realizar los análisis no lineales para los modelos descritos en ambas configuraciones del sistema de contravientos (V invertida y X) con los perfiles seleccionados (IR, OR y ángulo) y con el pandeo prematuro en los niveles propuestos (pisos 2, 4 y 6), se concluye lo siguiente.

En general para ambas configuraciones, los resultados tienden a mostrar que es más crítico que el pandeo global prematuro se sitúe en los niveles inferiores, ya que las distorsiones de entrepiso suelen ser más grandes cuando se supone un pandeo global prematuro en el piso 2.

Comparando los resultados de los análisis realizados con cada perfil y cada configuración, sin importar el nivel donde se sitúa el pandeo global prematuro, cuando se analiza el comportamiento entre las dos configuraciones, si se utiliza la configuración en X se obtiene una menor variabilidad en los resultados. La distorsión es ligeramente menor al caso cuando se utiliza la configuración V invertida, esta tendencia se identificó en los tres perfiles estudiados. Sin embargo, esto se debe a que los contravientos tienen una longitud no arriostrada mayor en la configuración en X, puesto que no están unidos al centro de los contravientos. Esto hace notar la conveniencia de unir los contravientos al centro del claro cuando se usa esta configuración para mejorar su respuesta.

Posteriormente, se estudió la influencia del tipo de perfil y la configuración de contraviento con pandeo prematuro en los niveles 2, 4 y 6. Los resultados demuestran que cuando se modela un pandeo global prematuro en el piso 2, las distorsiones de entrepiso con contravientos de perfil IR sin importar la configuración, tiene una mayor probabilidad de desarrollar pandeo global a una menor distorsión.

Si el pandeo global prematuro se sitúa en el nivel 4 y en el nivel 6, nuevamente, el perfil IR tiende a generar una mayor probabilidad de alcanzar las distorsiones máximas.

La menor distorsión de entrepiso que se desarrolla en un marco con contravientos con una sección IR, la mayor distorsión ocurre con una sección de ángulo. Sin embargo, la sección IR está bien protegida contra la fractura, mientras que el ángulo está relacionado con una fractura inminente conforme a estudios experimentales recientes. Dada la poca diferencia en las distorsiones entre ambas secciones, los resultados de este capítulo sugieren que los contravientos con sección ángulo no deberían permitirse como marcos con contravientos concéntrico de ductilidad media ($Q=3$). Esta restricción no se encuentra en la versión actual de las NTC-DCEA.

Capítulo 5. Conclusiones

RESUMEN

En este capítulo, se incluye la justificación, el contenido del documento, conclusiones derivadas de esta investigación y propuestas para investigaciones futuras.

Capítulo 5. Conclusiones

5.1 Justificación de la investigación

El comportamiento de los marcos con contravientos concéntricos depende altamente de la respuesta en compresión de las diagonales y, a su vez, la diagonal depende de la relación de esbeltez kL/r , que define la resistencia, a partir de las dimensiones y del tipo de sección.

En las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS-2023) en la tabla 4.3.2 se establecen las condiciones y los límites para utilizar un sistema de contravientos concéntricos con ductilidad alta y media; sin embargo, no se hace mención del tipo de perfil y configuración a utilizar. Por este motivo, en esta investigación se realizaron diversos análisis no lineales que pretenden evaluar el comportamiento de marcos estructurados con tres tipos de perfiles IR, OR y ángulo como contravientos concéntricos, y así comparar los resultados con lo estipulado en las NTC-DS-2023.

5.2 Contenido de la tesis capítulo por capítulo

La tesis está organizada como se discute en esta sección.

En el primer capítulo se estudió el estado del arte de los edificios estructurados con marcos con contravientos concéntricos. En esta sección se incluyeron las pruebas experimentales y las normativas vigentes, ambas enfocadas en la información relacionada con los contravientos concéntricos. Una de las principales pruebas experimentales fue la realizada en Lignos y Karamanci (2013) donde se concluye que, el estado de falla de un contraviento concéntrico está en función del tipo de sección del perfil. Es necesario resaltar que en este estudio los perfiles utilizados en las pruebas no cumplían en su mayoría con los límites ancho/grueso para calificarlos como una sección dúctil.

En Fell *et al.* (2006) se realizan pruebas a perfiles IR, OR y OC que cumplen con los límites de ancho/grueso para ser calificados como secciones dúctiles, en esta investigación se utilizaron perfiles IR y OR. La conclusión es similar a la encontrada en Lignos y Karamanci (2013); sin embargo, los límites en los estados de falla de los contravientos son distintos, ocasionado por las relaciones de ancho/grueso de los perfiles.

En la normativa vigente tenemos las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo (NTC-DS-2023), donde se especifican los límites para el diseño de este sistema, pero sin especificar el tipo de sección. Las Normas Técnicas Complementarias para Diseño de Estructuras de Acero (NTC-DCEA-2023) se menciona las especificaciones que debe de cumplir el sistema en función de la configuración y también en función del tipo de sección. Otros reglamentos especializados como el AISC 341-16 (2016) de Estados Unidos hace la distinción entre contravientos ordinarios y especiales, y se limita a prohibir el uso de contravientos con sección de ángulo para sistemas especiales.

En el segundo capítulo se hace el diseño de los marcos de esta investigación, considerando una estructura en tres dimensiones. Se realizó el análisis estructural y posterior diseño considerando la filosofía de diseño por capacidad. Para estructuras de 6 niveles con un sistema de contravientos en V invertida o chevrón y en X o cruz, para cada uno de los perfiles estudiados (IR, OR y ángulo)

En el tercer capítulo se realizaron los análisis no lineales, en una primera etapa se seleccionaron 40 de 130 registros que fueron obtenidos en distintos puntos de la Ciudad de México durante el sismo del 19 de septiembre de 2017. Las señales seleccionadas fueron escaladas al periodo de los modelos, para 6 niveles $T=0.85$ seg. Se realizaron modelos detallados para hacer análisis no lineales en el programa *OpenSees*. Con este propósito, se describieron los criterios para la elaboración de los modelos y, por último, la validación entre los resultados analíticos y los experimentales.

En cuanto a la respuesta de los contravientos considerando una deformación inicial al centro de los contravientos, se realizaron los análisis del modelo de 6 niveles, para ambas configuraciones V invertida o chevrón y X o cruz, para cada uno de los perfiles estudiados (IR, OR y ángulo). En cada caso, se consideraron 40 señales que se seleccionaron y escalaron para excitar los marcos estudiados. Además, con el propósito de evaluar la posible formación de un piso débil se propuso un pandeo prematuro en los niveles 2, 4 y 6. El pandeo prematuro se refiere a un modelo donde los contravientos de un entrepiso tienen una deformación inicial más grande que se aproxima al pandeo global que se ha reportado en pruebas experimentales. Este escenario promueve la formación de un piso débil asociado al pandeo global del sistema de contravientos en ese entrepiso. De tal manera que se realizaron un total de 240 análisis para cada perfil, y en total se realizaron 720 análisis no lineales para todos los modelos.

En el cuarto capítulo se discutieron los resultados de los análisis no lineales mediante un modelo detallado en *OpenSees*. Dada la cantidad de información, la tendencia de los resultados se estudia mediante un análisis estadístico utilizando gráficas con una distribución log normal y densidad de probabilidad. Con base en los resultados, se concluye que en general es más crítico que el pandeo prematuro ocurra en niveles inferiores para la estabilidad global de los marcos. Asimismo, se notó poca dependencia de la configuración de los contravientos, donde el caso crítico es la configuración X o cruz cuando las diagonales no están unidas al centro, puesto que incrementan la longitud no arriostrada. El pandeo local es más crítico cuando se usa un perfil IR como contraviento, pero la fractura es muy poco probable cuando se siguen los criterios de las NTC. En contraste, el uso de ángulos en el sistema de contravientos debido a que está dominado por una distorsión de entrepiso menor, en el contexto de los criterios normativos podrían ocasionar una fractura en sistemas dúctiles.

5.3 Principales contribuciones

Las principales contribuciones de esta investigación son:

- Se comprueban las hipótesis de esta investigación, donde el desempeño de un marco con contravientos concéntricos depende de las dimensiones y tipo del perfil del contraviento, lo que no está explícitamente considerado en la normatividad especializada vigente.
- Se modeló un pandeo global en los contravientos de un mismo entrepiso, lo que demostró que podría guiar a la formación de un piso débil. Sin embargo, esa condición no guía al colapso; sino que pese al piso débil el sistema es lo suficientemente estable cuando se siguen los criterios de las NTC-DS-2023.
- Los resultados tienden a mostrar que es más crítico que el pandeo global ocurra en pisos inferiores, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor.
- Entre las configuraciones de contravientos comparadas, la configuración en X está relacionada con una menor distorsión de entrepiso en los tres perfiles estudiados. Esto hace notar la conveniencia de unir los contravientos al centro del claro cuando se usa esta configuración para mejorar su respuesta.
- Cuando se diseñan marcos con contravientos concéntricos siguiendo estrictamente los requisitos de las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo (NTC-DS-2023) y para el Diseño y Construcción de Estructuras de Acero (NTC-DCEA-2023), la distorsión de entrepiso que desarrolla el marco cuando se usa una sección IR en el sistema de contravientos tiende a ser 1.60, si se usa una sección OR es 1.70 Y si se usa un ángulo tiende a ser 1.80.
- La estabilidad de la sección se estableció con base en pruebas experimentales reportadas en artículos especializados. Así, cuando se usa un perfil OR para el sistema de contravientos, las curvas reportan una mayor capacidad para desarrollar distorsiones en forma estable.
- La menor distorsión de entrepiso que se desarrolla en un marco con contravientos con una sección IR, la mayor distorsión ocurre con una sección de ángulo. Sin embargo, la sección IR está bien protegida contra la fractura, mientras que el ángulo está relacionado con una fractura. Los resultados sugieren que los contravientos con sección ángulo no deberían permitirse como marcos con contravientos concéntrico de ductilidad media ($Q=3$). Esta restricción no se encuentra en la versión actual de las NTC-DCEA-2023.

5.4 Investigaciones futuras

Se recomienda estimar la influencia de la altura en estos resultados. Esto es, incrementar la cantidad de pisos del modelo para observar la influencia del tipo de sección y la configuración

de los contravientos. En particular se propone una estructura de 10 niveles, con pandeo prematuro en los niveles 2, 4, 6, 8 y 10.

Además, se recomienda realizar pruebas experimentales de contravientos con sección IR, cajón y ángulo para ambas configuraciones de contravientos, que coadyuven a la calibración del modelo matemático.

Capitulo 6.- Referencias

Capítulo 6.- Referencias

- [1] AISC 341-16 (2016). *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*. American Institute of Steel Construction. Chicago, Illinois 60601.
- [2] De Buen, O. (1993). *Estructuras de Acero Comportamiento y Diseño*. (9ª Edición). México: Editorial Limusa.
- [3] De la Macorra, A. y Tapia, E. (2018). Cortante lateral resistente y relación de esbeltez en marcos dúctiles con contravientos. *Sociedad Mexicana de ingeniería Estructural*, XXI Congreso Nacional de ingeniería Estructural. Campeche, México.
- [4] Benjamin V. Fell, Amit M. Kanvinde, Gregory G. Deierlein, Andrew T. Myers, Xiangyang Fu. (2006), Buckling and fracture of concentric braces under inelastic cyclic loading. *Structural steel educational council*, agosto.
- [5] Instituto Mexicano de la construcción en Acero (2020). *Manual de construcción en acero / Instituto Mexicano de la construcción en Acero*. (6ª Edición). México. Limusa.
- [6] Lignos, D. G., & Karamanci, E. (2013). Drift-based and dual-parameter fragility curves for concentrically braced frames in seismic regions. *Journal of Constructional Steel Research*, 90.
- [7] López T. C.; Tapia H. E. y Terán G. A. (2020), “Respuesta sísmica del sistema estructural de acero Diagrid”, *Memorias, XXII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, Aguascalientes.
- [8] López T. Roberto C. (2021), *Respuesta inelástica con fines de diseño del sistema estructural de acero Diagrid*, Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco, marzo.
- [9] Luceño V. Alberto y González F. Javier. (2015). *Métodos estadísticos para medir, describir y controlar la variabilidad*. España: Editorial Universidad de Cantabria.
- [10] Triola M. y Pineda L. (2004). *Probabilidad y estadística*. (9ª Edición). Pearson Educación.
- [11] Mazzoni, S., McKenna, F., Scott, M. and Fenves, G. (2006), “Open system for earthquake engineering simulation, user command-language manual”, Report NEES

- grid-TR 2004- 21. *Pacific Earthquake Engineering Research, University of California, Berkeley, CA. <http://opensees.berkeley.edu>*
- [12] Mendenhall W. (1982). *Introducción a la probabilidad y la estadística*. (5ª Edición). EE. UU., Wadsworth Internacional / Iberoamerica.
- [13] Nader N., Ali A. (2018). Probabilistic damage assessment of concentrically braced frames with built up braces. *Journal of Constructional Steel Research* 147.
- [14] NTC-DCEA-2023 (2023), “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Acero”, *Gaceta Oficial de la Ciudad de México, Vigésima época, No. 220 Bis, diciembre*.
- [15] NTC-DS-2023 (2023), “Normas Técnicas Complementarias para el Diseño por Sismo, Gaceta Oficial de la Ciudad de México”, *Vigésima época, No. 220 Bis, diciembre*.
- [16] Onur S. (2021). Seismic response of dual concentrically braced steel frames with various bracing configurations. *Journal of Constructional Steel Research* 188.
- [17] Tapia E, S. García y A. Del Rincón (2016), "Estudio paramétrico del modelado inelástico de contravientos de acero", *Revista de Ingeniería Sísmica*, SMIS. No. 94.
- [18] Tapia E. y Guerrero H. (2021), “Design demands on columns of Inverted-V Braced Steel Frames”, *International Journal of Civil Engineering* 19(1).
- [19] Tapia-Hernández E. y Martínez Cid R. P. (2017). Carga axial de diseño de columnas de marcos con contraviento concéntrico. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil. Vol 17(1)* 5.
- [20] Tauranac J. (1995). *The Empire State Building: The Making of a Landmark*. EE. UU., Cornell University Press.
- [21] Tremblay (2002), Inelastic seismic response of Steel bracing members, *Journal of Constructional Steel Research*, 58, 665-701
- [22] Velasco L. y Guerrero H. (2020) “Introducción al análisis estructural con *OpenSees*” Instituto de Ingeniería, UNAM. Ciudad de México.
- [23] Yoo J-H, Roeder C.W., y Lehman D.E. (2008). “Analytical Performance Simulation of Special Concentrically Braced Frames” *Journal Of Structural Engineering ASCE* / Junio.

- [24] Zhen Tan Z., Wei-hui Z., Bao M., Yu-hui Z., Shi-chao D., Ze-yu Q. (2022). Numerical evaluation on collapse-resistant performance of Steel-braced concentric frames, *Journal of Constructional Steel Research* 193.

Apéndice A. Análisis de resultados

Apéndice A. Análisis de resultados

A.1 Introducción

Se realizaron los análisis no lineales para el modelo de 6 niveles en configuración V invertida y X, con un pandeo prematuro en los niveles 2, 4 y 6, como se describió en el capítulo 3. Se seleccionaron 40 señales para cada análisis y se escalaron para ser utilizadas en este modelo con un periodo de $T= 0.85$ seg. La discusión de los resultados se centra en la distorsión de entrepiso y distorsión global. Con este propósito, se desarrolló un conjunto de hojas de cálculo en el *software Excel* para facilitar el proceso de la información obtenida de los análisis.

Las distorsiones en los análisis que se obtuvieron eran para cada instante de tiempo y cada entrepiso, de modo que la cantidad de información era demasiada. Con ayuda de las hojas de cálculo, se seleccionó la distorsión máxima por nivel para cada una de las 40 señales.

Por ejemplo, para el modelo de 6 niveles con configuración de contravientos en V invertida, se realizaron 40 análisis suponiendo pandeo global prematuro en los contravientos del nivel 2; luego se realizaron 40 análisis suponiendo el pandeo global en el sistema de contravientos del nivel 4 y, finalmente, 40 en el nivel 6. En total para el modelo de 6 niveles en configuración V invertida se realizaron 360 análisis; considerando los 3 cambios de sección del sistema de contravientos que se utilizaron.

Al realizar los análisis no lineales y procesando la información, se obtuvieron graficas de distribución log normal y de densidad de probabilidad. Teniendo en consideración que la variabilidad estadística podría desviar los resultados, en esta investigación se supusieron dos escenarios: un análisis sin error en los datos estudiados y un análisis considerando un error del 10% en la información recabada.

La variabilidad es una característica muy importante en el procesamiento de datos, se refiere a que tan disperso esta un conjunto de datos (Mendenhall 1982). Al obtener el total de los datos, fue muy evidente que una pequeña fracción de estos se encontraba muy alejado del resto. Por esa razón, se determinó utilizar un error porcentual del 10%, puesto que esos datos que se localizaban lejanos a la media generaban que la campana de frecuencia tuviera una tendencia con una mayor dispersión. Uno de los motivos por los que se determinó seguir este procedimiento fue porque, estos datos generaban una concentración en el cuartil superior de la curva; sin embargo, no correspondían con el resto de los datos y ocasionaba que la campana de probabilidad fue asimétrica.

Para el procesamiento de datos existen diversas distribuciones de probabilidad, éstas se refieren a un grupo de todas las magnitudes posibles de una variable aleatorio y sus probabilidades relacionadas. Por ejemplo, la distribución de probabilidad normal es un tipo de distribución continua con forma de campana que es una función de los parámetros, la media y la desviación estándar (Triola y Pineda 2004). La distribución log-normal se utiliza para describir variables que tienen magnitudes que están distribuidas de manera asimétrica y

que toman valores muy grandes, se caracteriza por el promedio y la desviación estándar de la variable original, se obtiene de aplicar la transformación logarítmica a una distribución normal (Luceño y Gonzáles 2015). De esta manera, se determina utilizar una distribución log-normal para procesar e ilustrar los resultados.

Cuando se utiliza un error del 0% la campana tiende a extenderse a la derecha, lo que implica una mayor variabilidad de distorsiones grandes. De hecho, se identificó que estos resultados están relacionados con cuatro señales en particular (BO39NS, MI15NS, RM48EW y TL55EW). En contraste, cuando se utiliza el 10% de error, las campanas tienden a ser simétricas. En ambos casos, se nota una relación de los resultados obtenidos con el entrepiso donde se supuso el pandeo prematuro de los contravientos.

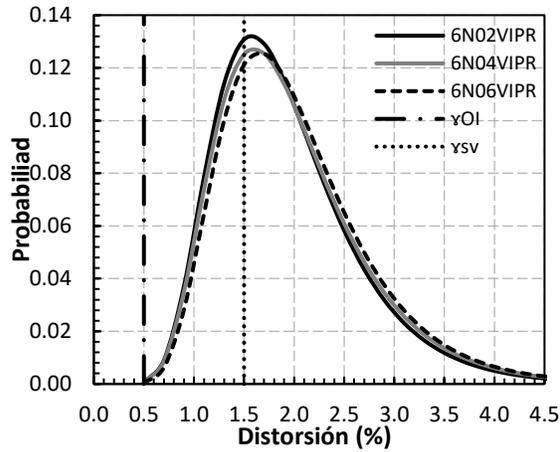
En las siguientes secciones se discutirán los resultados en función del entrepiso donde se supuso el pandeo global prematuro de los contravientos, mientras que el resto inicia el sismo sin daño. Luego, la discusión se realiza comparando los resultados en función de la sección transversal como solución del sistema de contravientos. Finalmente, los resultados se comparan en función de la configuración de los contravientos.

A.2 Influencia del entrepiso con pandeo global prematuro con el error del 0%

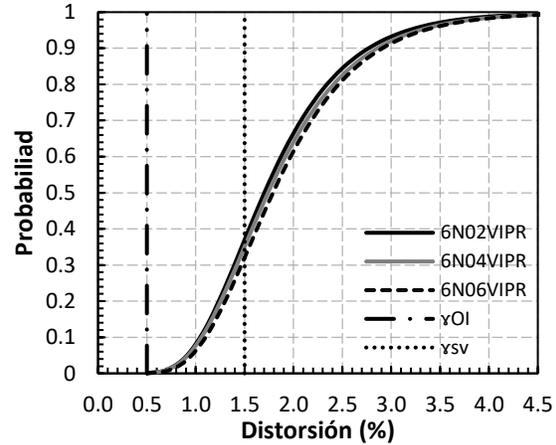
En esta sección se discute la influencia de la ubicación del pandeo global prematuro, en el nivel 2, 4 y 6 para el modelo de 6 niveles; mientras que en los contravientos de los otros entrepisos no tenían daño al inicio de los análisis. Se incluyen los tres perfiles utilizados para las dos configuraciones de contravientos en V invertida y en X.

A.2.1 Resultados de contravientos con sección I para cada piso (2, 4 y 6)

En la figura A.1 se muestra la tendencia de las distorsiones de entrepiso máximas obtenidos de los análisis no lineales cuando se supone que los contravientos inician el sismo con un pandeo prematuro en el piso 2 mientras que el resto de los contravientos no tienen daño que se denominó 6N02VIPR con una configuración en V invertida con sección IPR. Luego, los resultados del modelo con el pandeo global prematuro en el piso 4 que se nombró 6N04VIPR. Finalmente, en el piso 6 que se denominó 6N06VIPR. Se incluyen los límites de distorsión propuestos en las NTC-D-Sismo (2023) para la revisión de Operación Inmediata (γ_{OI}) y Seguridad de Vida (γ_{SV}) considerando una estructura convencional.

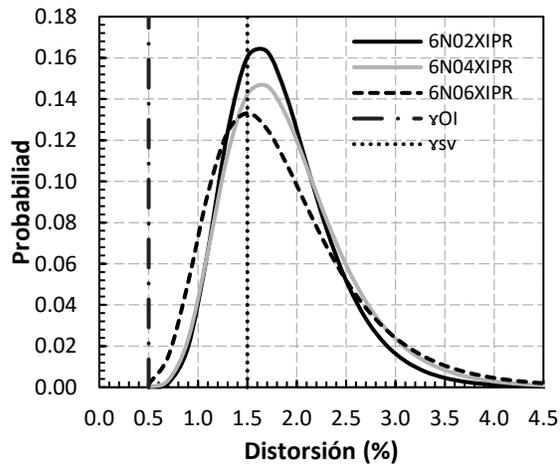


c) Distribución log normal

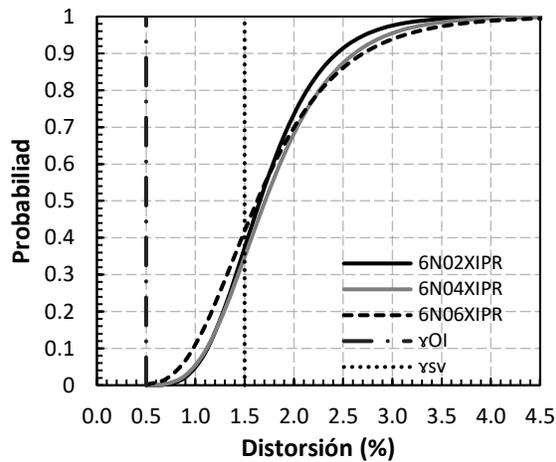


d) Densidad de probabilidad

Figura A.1. Comparación de resultados en configuración V invertida sección IR.



c) Distribución log normal



d) Densidad de probabilidad

Figura A.2. Comparación de resultados en configuración X sección IR.

En la figura A.1a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota una ligera influencia de la localización de los pisos que se supusieron con pandeo global prematuro. Cuando el pandeo global se supone en el piso 2 parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.60%, que se aproxima al límite de las NTC-DS (2023) igual a 1.50%. Mientras que, si el pandeo se supone en los pisos superiores, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en pisos inferiores, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor. La probabilidad de que ocurra el pandeo local aumenta con el incremento de la distorsión de entrepiso reportada en los análisis.

En la figura A.1b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del

37%, en el nivel 4 de 34% y en el nivel 6 de 40%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%, siendo el criterio de las NTC-DS-2023

En la figura A.2a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal cuando se consideró una configuración de contravientos en X. Se nota una ligera influencia de la localización de los pisos que se supusieron con pandeo global prematuro. Cuando el pandeo global se supone en el piso 2 parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.60%, que se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%). Mientras que, si el pandeo se supone en los pisos superiores, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5% pero menor que 1.7%. Entonces, se ratifica la tendencia identificada previamente, donde parecería más crítico que el pandeo global ocurra en pisos inferiores, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

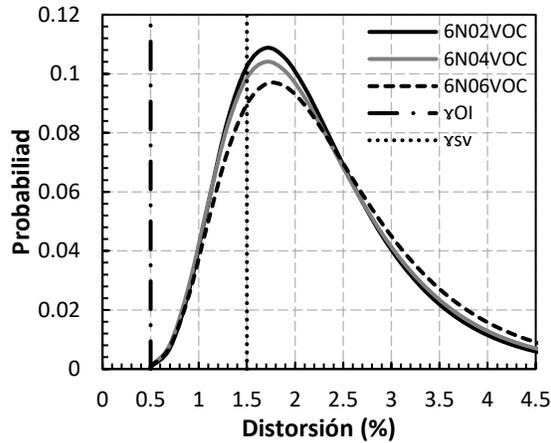
En la figura A.2b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 35%, en el nivel 4 de 32% y en el nivel 6 de 40%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

Si se compara el comportamiento de los contravientos en condiciones similares en configuración V invertida y X, cuando se utiliza contravientos en X y perfiles IPR, la variabilidad en las curvas es menor con respecto a la configuración V invertida.

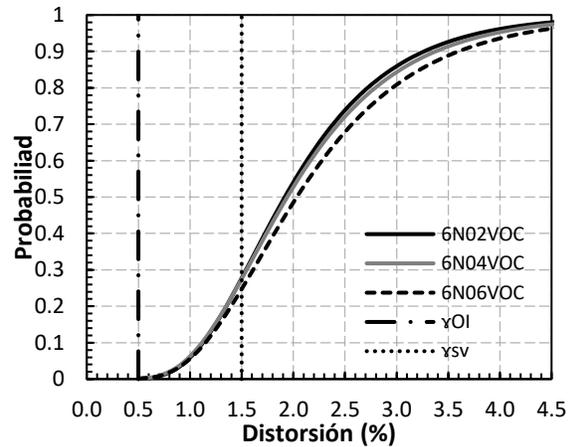
A.1.2 Resultados de contravientos con sección OR para cada piso (2, 4 y 6)

En la figura A.3a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Cuando el pandeo global se supone en el piso 2 los resultados tienen una media de 1.75%, en el piso 4 la media es de 1.70% y en el nivel 6 es de 1.65%, en todos los casos se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%). Sin embargo, es más crítico que el pandeo global ocurra en pisos inferiores, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En la figura A.3b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 28%, al igual que el nivel 4 y en el nivel 6 de 24%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%. Este resultado hace notar que si se diseña una estructura considerando un límite del 1.5%, la probabilidad de que la estructura desarrolle una distorsión en forma estable incluso más grande que 1.5% es muy alta cuando se usa una sección cajón para el sistema de contravientos.

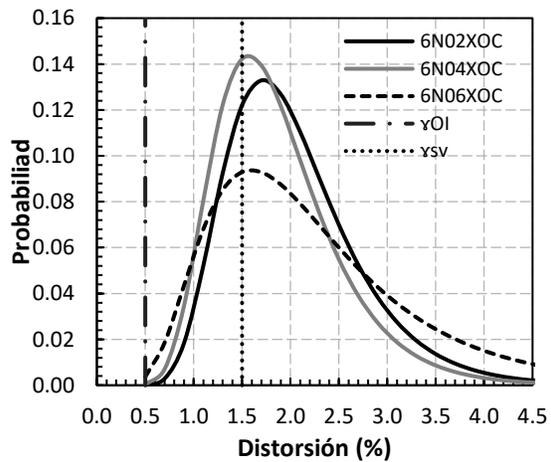


c) Distribución log normal

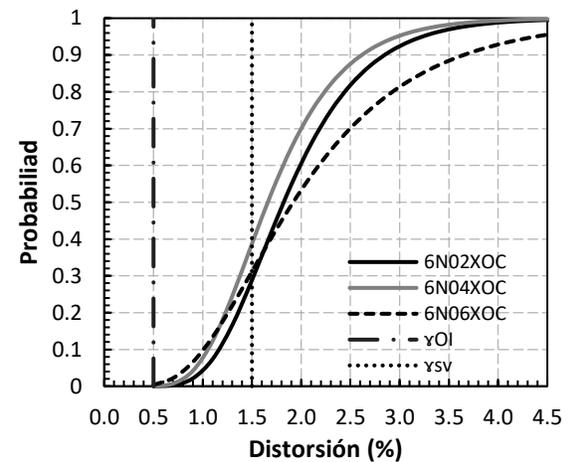


d) Densidad de probabilidad

Figura A.3. Comparación de resultados en configuración V invertida sección OR.



c) Distribución log normal



d) Densidad de probabilidad

Figura A.4. Comparación de resultados en configuración X sección OR.

En la figura A.4a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal cuando los contravientos tienen una configuración en X con sección transversal OR. Cuando el pandeo global se supone en el piso 2 y 4 los resultados tienen una media de 1.55% y 1.70% respectivamente. Sin embargo, en el piso 4 la probabilidad es mayor que en el piso 2, en el piso 6 la media es de 1.60% pero la probabilidad es menor que en los niveles antes descritos. En todos los casos se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%), donde es más crítico que el pandeo global ocurra en los pisos 2 y 4 pisos, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

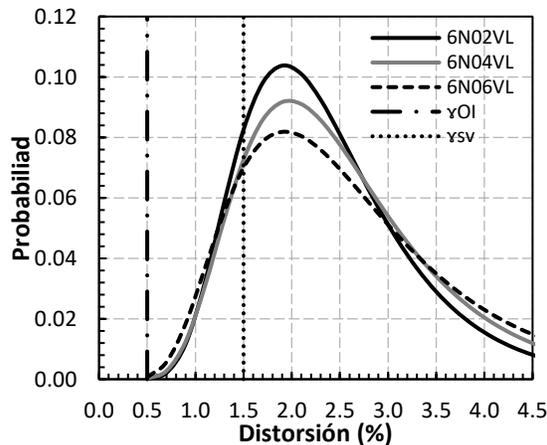
En la figura A.4b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 30%, al igual que el nivel 6 y en el nivel 4 de 40%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

Cuando se utiliza el perfil OR en una configuración de contravientos en V invertida o chevrón, el comportamiento cuando el pandeo global prematuro se encuentra en un determinado nivel es similar, es decir en los tres casos de estudio la tendencia de las curvas tiende a los mismos resultados, esto cambia cuando se utiliza la configuración X, ya que, si el pandeo global se encuentra en el nivel 6, la probabilidad de ocurrencia es menor que en los niveles inferiores. También se nota que cuando se usa un perfil OR para el sistema de contravientos, las curvas se mueven ligeramente a la derecha, lo que implica que la restricción de las NTC-DS (2023) es más conservadora que cuando se usa una viga IPR.

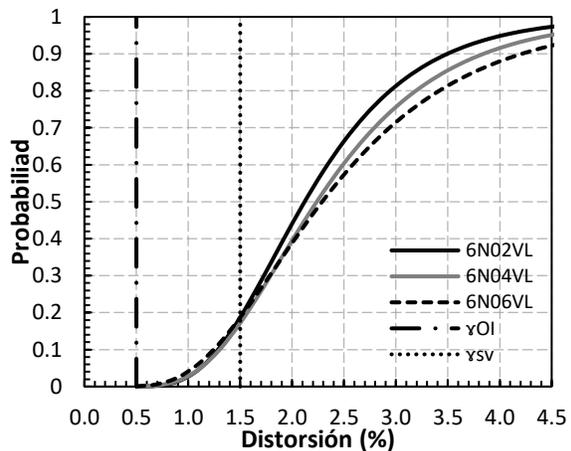
A.2.3 Resultados de contravientos con sección ángulo para cada piso (2, 4 y 6)

En la figura A.5a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota una ligera influencia de la localización de los pisos que se supusieron con pandeo global prematuro. Cuando el pandeo global se supone en el piso 4 parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.90%. Mientras que, si el pandeo se supone en los pisos 2 y 6, se reporta un intervalo más amplio de resultados, para el nivel 2 la media es de 1.95% y para el nivel 6 de 1.90%. En todos los casos la tendencia es que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en pisos 4.

En la figura A.5b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una cierta distorsión. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 19%, al igual que el nivel 6 y en el nivel 4 de 17%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

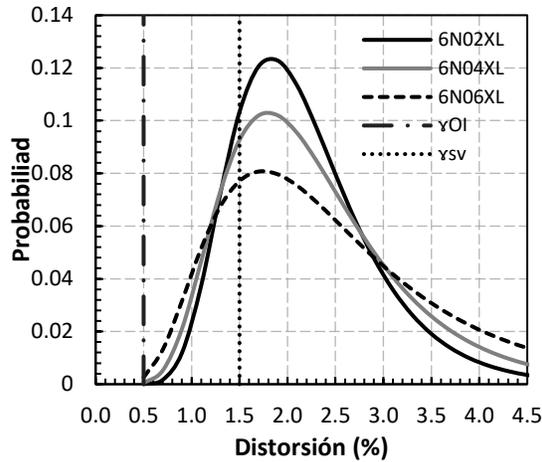


c) Distribución log normal

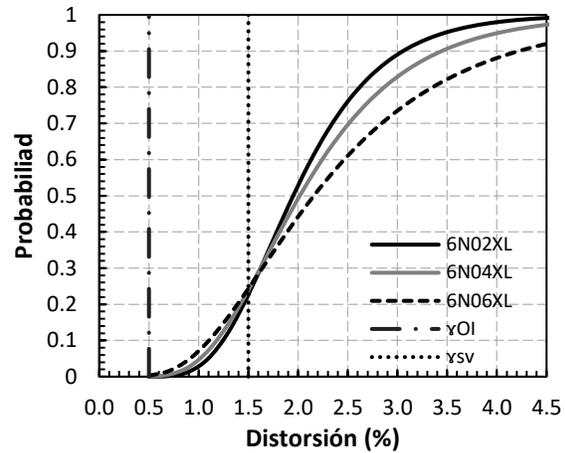


d) Densidad de probabilidad

Figura A.5. Comparación de resultados en configuración V invertida sección L.



c) Distribución log normal



d) Densidad de probabilidad

Figura A.6. Comparación de resultados en configuración X sección L.

En la figura A.6a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Para los tres casos de estudio, la probabilidad de ocurrencia es similar, cuando el pandeo global se supone en el piso 2 y 4 y reportan resultados con una media de 1.90% y 1.95% respectivamente. Con base en los resultados, la media en el piso 6 es de 1.90%, por lo que la probabilidad es menor que cuando se supone un pandeo global prematuro en los niveles antes descritos. En todos los casos se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%). Sin embargo, es más crítico que el pandeo global ocurra en los pisos 2 y 4 pisos, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En la figura A.6b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una distorsión de entrepiso. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 2 desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 20%, al igual que el nivel 4 y en el nivel 6 de 17%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

A.3 Influencia de la configuración de los contravientos con el error del 0%

En las siguientes figuras se muestran las tendencias de las distorsiones de entrepiso máximas obtenidos de los análisis no lineales, en términos de la probabilidad y la curva de fragilidad de los 120 análisis que se realizaron para cada perfil y cada configuración.

Se encontró que la fractura dúctil durante el pandeo cíclico inelástico es impulsada por la amplificación de la deformación debido al pandeo local de la sección transversal.

La forma de la sección transversal, la relación ancho-grueso y la relación de esbeltez, son los factores más importantes que controlan la ductilidad del contraviento.

Con el propósito de ofrecer una referencia física a estos resultados analíticos, se incluyen los resultados experimentales de contravientos reportados en Fell *et al.* (2006) En esta

investigación se estudian los hallazgos experimentales y las implicaciones de diseño de diecinueve pruebas de contravientos concéntricos de acero. Se utilizaron secciones huecas rectangulares OR, sección redonda OC y sección IR, con diferentes relaciones de ancho-espesor y relaciones de esbeltez sujetas a varios historiales de carga.

En la siguiente tabla se resumen los perfiles utilizados, el tipo de pruebas y las propiedades geométricas de las secciones.

Tabla A.1. Secciones de contravientos y variables de carga (Fell *et al.* 2006)

Test #	Sección	Historia de Carga	Intervalo de carga	Relación ancho-grueso	$\frac{KL_B}{r}$ $K = 1.0$
1	OR 114 mm x 6.4 mm	Sismo lejano	Lento	14.20	77
2	OR 114 mm x 6.4 mm	Sismo cercano	Lento	14.20	77
3	OR 114 mm x 6.4 mm	Sismo lejano	Rápido	14.20	77
4	OR 114 mm x 9.5 mm	Sismo lejano	Lento	8.46	83
5	OR 114 mm x 9.5 mm	Sismo lejano	Rápido	8.46	83
6	IR 305 mm x 23.9 kg/m	Sismo lejano	Lento	14.20	155
7	IR 305 mm x 23.9 kg/m	Sismo cercano	Lento	14.20	155
8	IR 305 mm x 23.9 kg/m	Sismo lejano	Lento	14.20	155

En la tabla 4.2. Se resumen los resultados de las pruebas experimentales para las secciones de OR e IR. Los términos F-F y N-F hacen referencia a Sismo lejano (*Far-Field*) y Sismo cercano (*Near-Field*), respectivamente.

Tabla A.2. Resultados de pruebas experimentales Fell *et al.* (2006)

Test #	Sección	Historia de carga	Pandeo global Distorsión (%)	Pandeo local Distorsión (%)	Inicio de fractura Distorsión (%)	Pérdida de fuerza Distorsión (%)
1	OR 114 mm x 6.4 mm	F-F	0.30	1.85	2.68	2.68
2	OR 114 mm x 6.4 mm	N-F	1.00	2.50	6.00	6.00
3	OR 114 mm x 6.4 mm	F-F	0.34	2.10	2.10	2.10
4	OR 114 mm x 9.5 mm	F-F	0.29	5.00	5.00	5.00
5	OR 114 mm x 9.5 mm	F-F	0.33	4.30	4.30	4.30
6	IR 305 mm x 23.9 kg/m	N-F	1.30	6.00	6.00	6.00
7	IR 305 mm x 23.9 kg/m	F-F	0.16	5.00	5.00	N/A
8	IR 305 mm x 23.9 kg/m	N-F	7.20	8.00	8.00	8.00

Para el caso de estudio de esta investigación el historial de carga F-F se apega al utilizado en los modelos analíticos.

Se encontró que la fractura dúctil durante el pandeo cíclico inelástico es impulsada por la amplificación de la deformación debido al pandeo local de la sección transversal. La forma

de la sección transversal, la relación ancho-grueso y la relación de esbeltez, son los factores más importantes que controlan la ductilidad del contraviento.

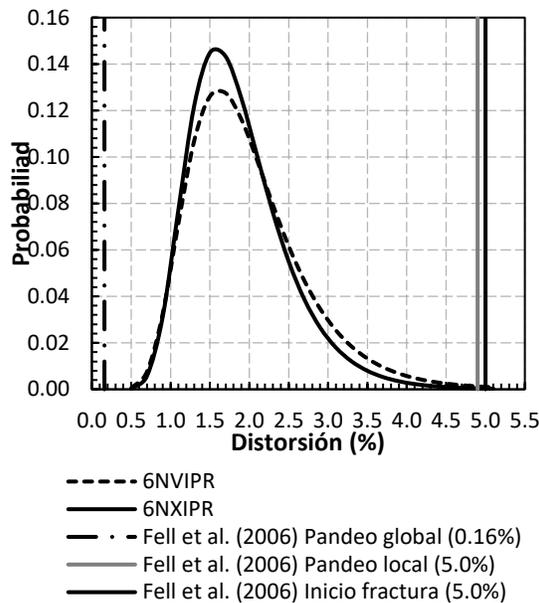
Se observa que los perfiles OC e IR son más resistentes a la fractura en comparación con miembros de perfil OR, y que desarrollan grandes deformaciones inducidas por pandeo local en las esquinas.

Además, en la discusión de resultados se comparan con las magnitudes obtenidas en Lignos & Karamanci (2013) para el pandeo global, pandeo local y fractura en cada una de las secciones propuestas y es necesario resaltar que en el estudio de Lignos & Karamanci (2013) los perfiles utilizados en las pruebas no cumplían en su mayoría con los límites ancho/grueso para calificarlos como una sección dúctil. En contraste, Fell *et al.* (2006) consideró perfiles OR e I que cumplen con algunas de las relaciones descritas, en NTC-DCEA-2023 (2023) para ser considerados perfiles de ductilidad media.

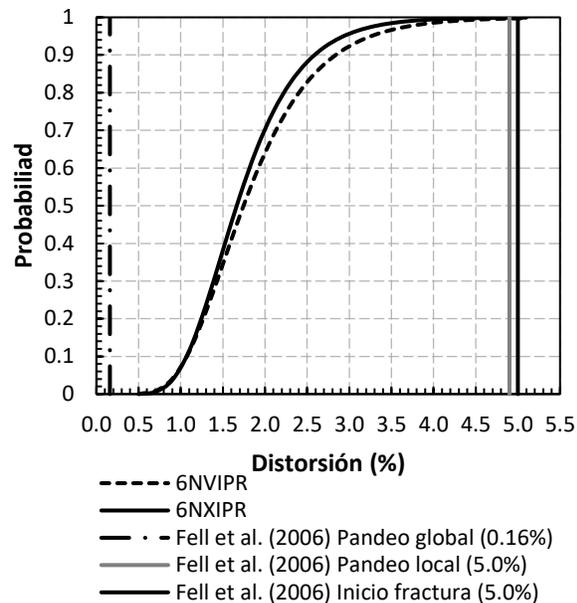
A.3.1 Sección I

En la figura A.7 se comparan ambos sistemas de contravientos utilizando el perfil IPR, donde se incluyen los resultados de pruebas experimentales. En la figura A.7a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal, cuando se utiliza la configuración en cruz X los resultados tienen una media de 1.70% con una probabilidad de 0.144, y para la configuración en V invertida los resultados tienen una media de 1.70% con una probabilidad de 0.127, en ambos casos se supera el límite establecido de las NTC-DS (1.50%). Así, es más crítico que el pandeo ocurra en la configuración en X, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En las pruebas experimentales de Fell *et al.* (2006), el pandeo local y la consecuente fractura ocurre después de varios ciclos, por lo que las distorsiones de entrepiso asociadas tienen magnitudes superiores a 5.0%. Esto hace notar que si se diseña un edificio considerando una distorsión igual a 1.5% la probabilidad de que ocurra pandeo local es muy baja.



c) Distribución log normal



d) Densidad de probabilidad

Figura A.7. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección IR.

Conforme a Lignos y Karamanci (2013) para contravientos con sección IR el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.30%, lo que significa que los contravientos del edificio tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. Luego la distorsión por pandeo local ocurriría a 1.01% lo que implica que conforme a la figura A.7b, la probabilidad de que los contravientos ante el sismo de diseño reporten pandeo global es bastante seguro (casi del 95%). Finalmente, la distorsión por fractura ocurre a 3.10% de tal manera que siguiendo el procedimiento de las NTC-DS, la probabilidad de que ocurra fractura es muy pequeña. Sin embargo, se hace notar que este estudio hace un conteo de resultados de pruebas experimentales que no consideran los requisitos de las NTC-DCE-Acero (2023) respecto a la relación ancho – grueso y la relación de esbeltez máxima para ser considerado como parte de una estructura dúctil.

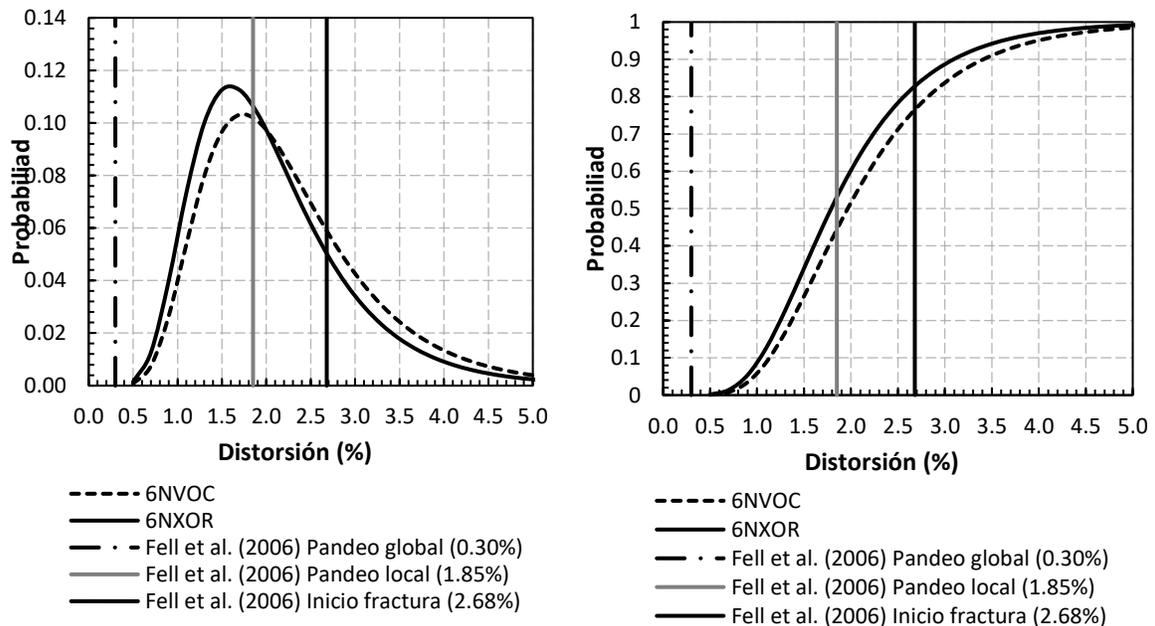
Comparando con los resultados obtenidos de Fell *et al.* (2006) el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.16%, lo que significa que los contravientos del edificio tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. Luego la distorsión por pandeo local ocurriría al 5.0%, lo que implica que conforme a la figura 4.8b ninguno de los casos de estudio tendría pandeo local y, por consiguiente, tampoco fractura.

A.3.2 Sección OR

En la figura A.8 se comparan ambos sistemas de contravientos utilizando el perfil OR y se incluyen los resultados de pruebas experimentales. En la figura A.8a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal en función de la configuración de los contravientos en V invertida o en X. Cuando se utiliza la configuración en cruz X los resultados tienen una media de 1.60% con una probabilidad de 0.112, y para la configuración en V invertida los resultados tienen una media de 1.70% con una probabilidad

de 0.103. En ambos casos se supera el límite establecido de las NTC-DS (1.50%); sin embargo, es más crítico que el pandeo ocurra en la configuración en X, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

Conforme a Lignos y Karamanci (2013) para contravientos con perfil hueco cuadrado el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.40%, lo que significa que los contravientos del edificio tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. Luego la distorsión por pandeo local ocurriría a 1.02% lo que implica que conforme a la figura A.8b, el 95% tendrían pandeo global y, por último, la distorsión por fractura ocurre a 1.60% de tal manera que el 33% de los casos estudiados en configuración V invertida y el 43% en cruz X, tendría fractura. Este resultado sería muy grave; sin embargo, se hace notar que Lignos y Karamanci (2013) consideran contravientos que no cumplen los requisitos de las NTC-DCE-Acero (2023) respecto a la relación ancho – grueso y la relación de esbeltez máxima para ser considerado como parte de una estructura dúctil.



c) Distribución log normal

d) Densidad de probabilidad

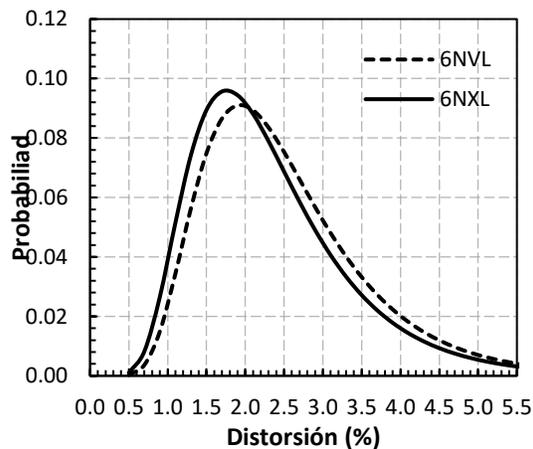
Figura A.8. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección OR.

Comparando con los resultados obtenidos de Fell *et al.* (2006), el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.30%, lo que significa que los contravientos de los edificios diseñados tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. La distorsión por pandeo local ocurriría al 1.85%, lo que implica que conforme a la figura A.8b, el 45% de los casos estudiados en configuración V invertida y el 55% en cruz X, tendrían pandeo local. Finalmente, la fractura ocurriría al 2.68% de tal manera que el 75% de los casos estudiados en configuración V invertida y el 85% en cruz X superarían ese límite, por lo que podrían reportar fractura

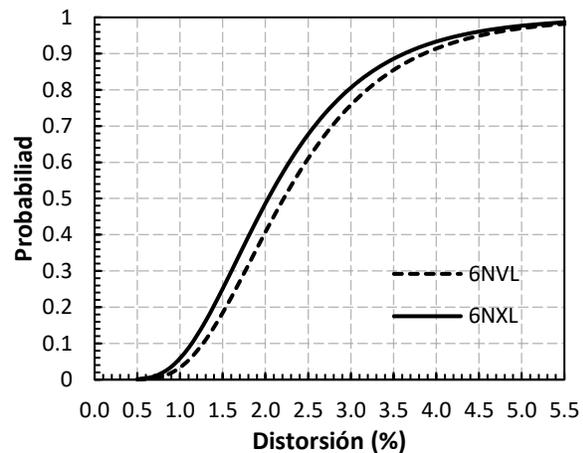
A.2.3 Sección ángulo

En la figura A.9 se comparan ambos sistemas de contravientos con una configuración en V invertida y una configuración en X utilizando el perfil ángulo L y se incluyen los resultados de pruebas experimentales. En la figura A.9a se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Cuando se utiliza la configuración en cruz X, los resultados tienen una media de 1.70% con una probabilidad de 0.095, y para la configuración en V invertida los resultados tienen una media de 1.90% con una probabilidad de 0.090. En ambos casos se supera el límite establecido de las NTC-DS (1.50%); sin embargo, es más crítico que el pandeo ocurra en la configuración en X, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En la comparación con los reportes experimentales, conforme a Lignos y Karamanci (2013) para contravientos con sección ángulo, el pandeo global iniciaría a una distorsión de 0.27%, lo que significa que los contravientos del edificio tendrían pandeo global ante el sismo de diseño. Luego, la distorsión por pandeo local ocurriría a 0.70% lo que implica que conforme a la figura A.4b que menos del 85% superarían ese límite por lo que tendrían pandeo global. Por último, la distorsión por fractura ocurre a 1.43%, de tal manera que el 95% de los casos estudiados en configuración V invertida y el 80% en cruz X, tendría fractura, puesto que superan ese límite. Este resultado hace notar que la sección de ángulo tiene una mayor probabilidad a desarrollar pandeo local y, por consiguiente, fractura. Sin embargo, se hace notar que este estudio hace un conteo de resultados de pruebas experimentales que no consideran los requisitos de las NTC-DCE-Acero (2023) respecto a la relación ancho – grueso y la relación de esbeltez máxima para ser considerado como parte de una estructura dúctil.



c) Distribución log normal



d) Densidad de probabilidad

Figura A.9. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, sección L.

A.4 Influencia del tipo de sección de los contravientos con el error del 0%

En las siguientes figuras A.10 - A.12 se muestra la tendencia de las distorsiones de entrepiso máximas obtenidos de los análisis no lineales cuando se supone que los contravientos en el piso 2, 4 y 6 tienen un pandeo global prematuro con una configuración en chevrón (V invertida) y en cruz X. Se incluyen los límites de distorsión propuestos en las NTC-D-Sismo (2023) para la revisión de Operación Inmediata (γ_{OI}) y Seguridad de Vida (γ_{SV}).

A.4.1 Pandeo prematuro en piso 2

En la figura A.10 se comparan ambos sistemas de contravientos para cada uno de los perfiles utilizados con pandeo prematuro en el nivel 2. Las curvas que incluyen una X se refieren a la configuración en cruz; mientras que las curvas que incluyen una V se refieren a la configuración en V invertida. Asimismo, se hace una distinción en el uso de la sección transversal utilizada en los contravientos, donde L indica que se utilizó un ángulo, IR indica que se utilizó una sección IR y, finalmente, OR indica que se utilizó una sección cajón rectangular.

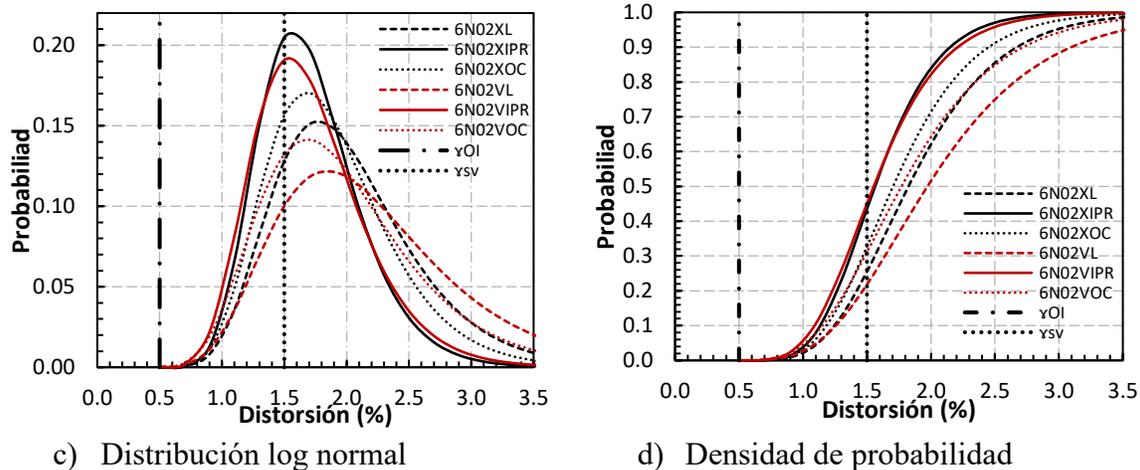


Figura A.10. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 2.

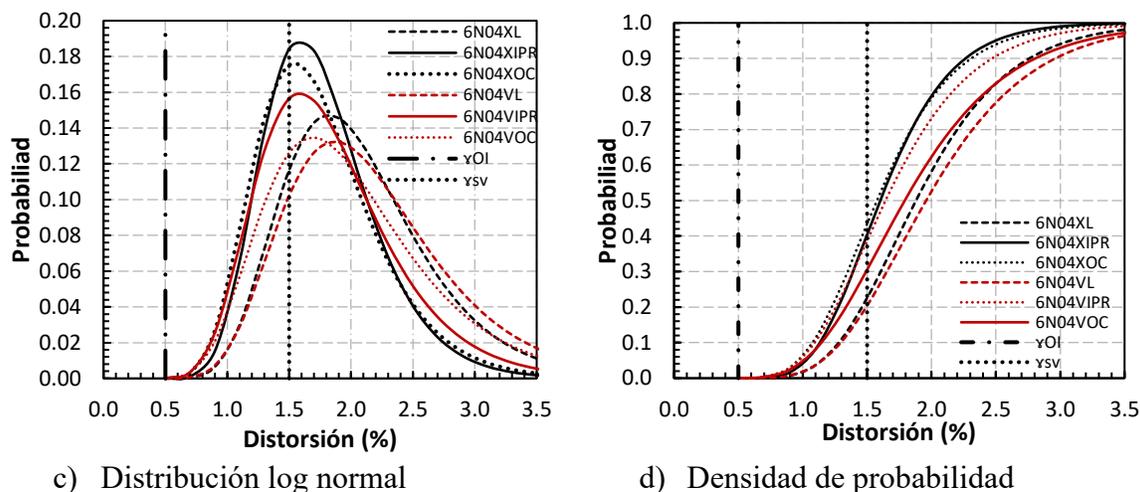
En la figura A.10a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota la influencia de la configuración y de los perfiles del contraviento, cuando el pandeo global se supone en el piso 2 con perfil IR sin importar la configuración parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.55%, que se aproxima al límite de las NTC-DS (1.50%). Mientras que, si se utilizan los perfiles OR y ángulo L, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en contravientos con perfil IR, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local. Esto es, la probabilidad de que ocurra pandeo local es más crítica cuando se utiliza un perfil IR.

En la figura A.10b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco cuando se diseña para una distorsión de 1.5% con pandeo global prematuro en el nivel 2

utilizando un perfil IR en ambas configuraciones desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 45%, para el perfil OR de 32% y perfil L de 20%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

A.4.2 Pandeo prematuro en piso 4

En la figura A.11 se comparan ambas configuraciones de contravientos para cada uno de los perfiles utilizados con pandeo prematuro en el nivel 4, en función del tipo de sección utilizada en el sistema de contravientos y su configuración.



c) Distribución log normal

d) Densidad de probabilidad

Figura A.11. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 4.

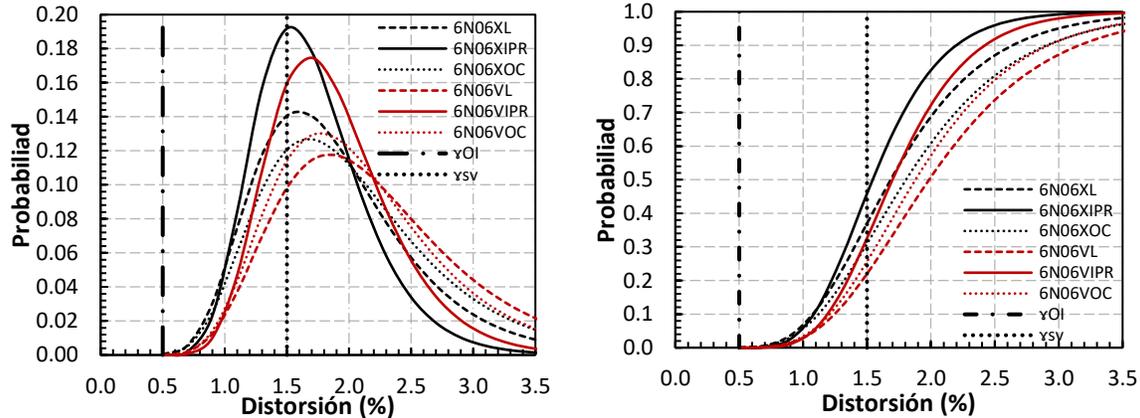
En la figura A.11a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota la influencia de la configuración y de los perfiles del contraviento, cuando el pandeo global se supone en el piso 4 con perfil IR y OR en configuración cruz X. Con base en los resultados, parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.60% y 1.55%, respectivamente. Mientras que, si se utilizan los perfiles con ángulos, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en contravientos con perfil IR y OR en configuración X, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.

En la figura A.11b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una cierta magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 4 utilizando un perfil IR y OR ambas configuraciones y OR en V invertida desarrolle una distorsión menor al 1.5% tiene una probabilidad del 60% de que se supere esa magnitud de distorsión de entrepiso. Para el perfil ángulo la probabilidad de que la distorsión de entrepiso es del 80% cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

A.4.3 Pandeo prematuro en piso 6

En la figura A.12 se comparan ambas configuraciones de contravientos para cada uno de los perfiles utilizados con pandeo prematuro en el nivel 6 comparando la configuración con V invertida y en cruz.

En la figura A.12a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota la influencia de la configuración y de los perfiles del contraviento, cuando el pandeo global se supone en el piso 6 con perfil IR en ambas configuraciones X y chevrón, parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.55% y 1.60% respectivamente. Mientras que, si se utilizan las secciones con ángulo y el perfil OR en los contravientos, se reporta un intervalo más amplio de resultados con una tendencia de que la media sea mayor que 1.5%. Entonces, parecería más crítico que el pandeo global ocurra en el nivel 6 con contravientos con perfil IR en ambas configuraciones, puesto que la distorsión máxima tiende a ser menor y podría guiar a pandeo local.



c) Distribución log normal

d) Densidad de probabilidad

Figura A.12. Comparación de resultados, configuración X y V invertida, nivel 6.

En la figura A.12b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con pandeo global prematuro en el nivel 6 utilizando un perfil IR en configuración cruz desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 45%, para los perfiles restantes se tiene un intervalo que va desde 23% a 35% en ambas configuraciones, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%.

A.5 Comparación entre secciones y configuración de contravientos con el error del 10%.

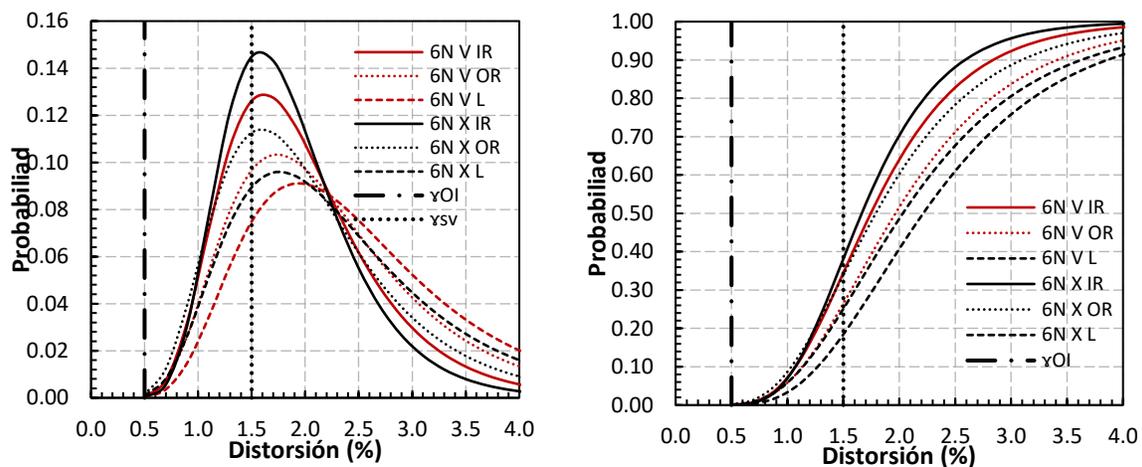
En esta sección se discute la influencia del tipo de sección y configuración del contraviento. En la figura A.13 se incluyen los resultados para cada perfil sin importar el nivel donde se supuso el pandeo prematuro en el sistema de contravientos. Se incluyen los límites de

distorsión propuestos en las NTC-D-Sismo (2023) para la revisión de Operación Inmediata (γ_{OI}) y Seguridad de Vida (γ_{SV}) considerando una estructura convencional.

En la figura A.13a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota una ligera influencia en primera instancia por el tipo de sección y la configuración del contraviento.

Cuando se utiliza el perfil IR, parece haber una menor variabilidad de los resultados con una media de 1.55% para la configuración X y de 1.60% para la configuración V invertida. En segundo caso con una menor variabilidad es el perfil OR con una media de 1.65% y 1.70% para configuración X y V invertida, respectivamente. Por último, para el perfil ángulo se reporta una media de 1.73% y 1.88% para la configuración X y V invertida respectivamente con una mayor variabilidad de datos. En todos los casos, la media de las distorsiones se aproxima al límite de las NTC-DS (2023) igual a 1.50% para seguridad de vida.

Los marcos con contravientos de sección IR parecen estar relacionados con una distorsión de entrepiso más pequeño y en una primera impresión se podrían señalar como la sección menos estable. Sin embargo, pese a que el pandeo local ocurre a una distorsión menor al 1.50%, la fractura está asociada a distorsiones de entrepiso del 3.0%, por lo que difícilmente tendría una respuesta deficiente.



c) Distribución log normal

d) Densidad de probabilidad

Figura A.13. Comparación de resultados, para todos los perfiles en configuración X y V invertida.

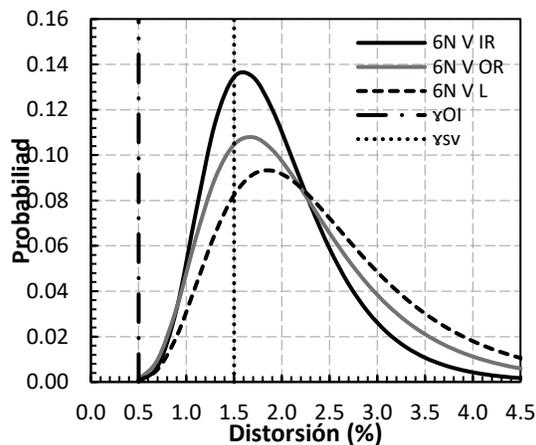
En la figura A.13b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con perfil IR desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 45% y 38% para la configuración X y V invertida respectivamente, que es el caso donde la probabilidad de ocurrencia es mayor entre los casos analizados. La probabilidad de que un marco con perfil OR desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 37% y 28% para la configuración X y V invertida respectivamente. Finalmente, la probabilidad de que un marco con perfil ángulo desarrolle una distorsión menor al 1.5% es del 27% y 22% para la configuración X y V invertida

respectivamente, Estos casos evalúan la respuesta de estructuras cuando se diseñan con un límite de 1.5%, siguiendo el criterio de las NTC-DS-2023.

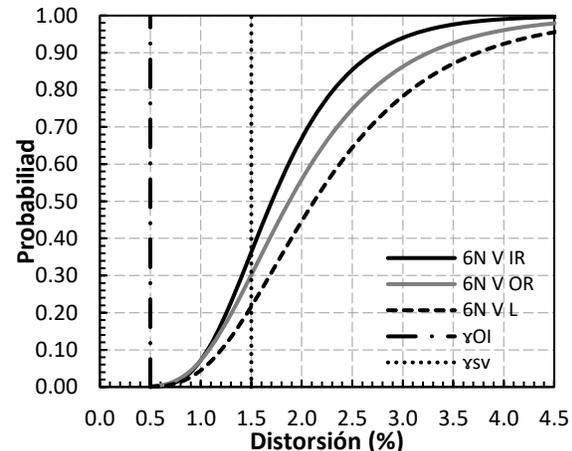
A.6 Comparación entre sección de contravientos con el error del 10%

En esta sección se discute la influencia del tipo de sección sin importar el tipo de configuración del contraviento, en la figura A.14 se incluyen los resultados para cada perfil sin importar el nivel donde se supuso el pandeo prematuro y configuración del sistema. En la sección anterior, se demostraba que la sección en cruz donde no se unen los contravientos al centro es el escenario más desfavorable, puesto que tiene la mayor longitud no arriostrada. Esa tendencia es desfavorable, pero en la comparación es viable, puesto que se repite en todas las secciones evaluadas. En los resultados, se incluyen los límites de distorsión propuestos en las NTC-D-Sismo (2023) para la revisión de Operación Inmediata (γ_{OI}) y Seguridad de Vida (γ_{SV}) considerando una estructura convencional.

En la figura A.14a, se muestra la distribución de las distorsiones máximas con una distribución log-normal. Se nota una ligera influencia por el tipo de sección del contraviento. Cuando se utiliza el perfil IR hay una menor variabilidad de los resultados con una probabilidad más grande de que la media de 1.60%. La sección que tiene una menor variabilidad es el perfil OR con una media de 1.70%. Por último, para el perfil ángulo se reporta una media de 1.80%. En todos los casos se aproxima al límite de las NTC-DS (2023) igual a 1.50%.



c) Distribución log normal



d) Densidad de probabilidad

Figura A.14. Comparación de resultados, para todos los perfiles en configuración X y V invertida.

El escenario que reporta una mayor probabilidad de que el entrepiso desarrolle una distorsión de entrepiso máxima menor a 1.5% es cuando se usa una sección IR. Sin embargo, como se discutió anteriormente, esta sección está protegida para desarrollar una fractura. Por otra parte, los marcos con contravientos con una sección cajón tiene una probabilidad de desarrollar una distorsión de entrepiso más grande que el límite que establecen las NTC-DS. Lo que implicaría que los marcos son estables, aunque alcancen esa magnitud. Finalmente,

los marcos con contravientos de sección ángulo reportan una probabilidad de desarrollar distorsiones máximas un poco mayores al 1.5%

En la figura A.14b se muestra la curva de fragilidad que establece la probabilidad de que la distorsión supere una magnitud. Con base en los resultados, la probabilidad de que un marco con perfil IR desarrolle una distorsión menor al 1.5% es de 41%, la probabilidad de que un marco con perfil OR desarrolle una distorsión menor al 1.5% es de 32 y, por último, la probabilidad de que un marco con perfil ángulo desarrolle una distorsión menor al 1.5% es de 23%, cuando las estructuras se diseñan con un límite de 1.5%, siendo el criterio de las NTC-DS-2023.

La menor distorsión de entrepiso se desarrolla en un marco con contravientos con una sección IR, la mayor distorsión ocurre con una sección de ángulo. Sin embargo, la sección IR está bien protegida contra la fractura, mientras que el ángulo está relacionado con una fractura inminente como se muestra en la tabla 4.3. Dada la poca diferencia en las distorsiones entre ambas secciones, los resultados de la figura 4.15b sugieren que los contravientos con sección ángulo no deberían permitirse como marcos con contravientos concéntrico de ductilidad media ($Q=3$).

Tabla A.3. Promedio de distorsiones de entrepiso (adaptada de Lignos y Karamanci 2013)

Sección	Estado de daño		
	DS1	DS2	DS3
OR	0.40	1.02	1.60
OC	0.41	0.96	2.75
IR	0.30	1.01	3.10
Ángulo L	0.27	0.70	1.43

A.7 Conclusiones

Después de realizar los análisis no lineales para los modelos descritos en ambas configuraciones del sistema de contravientos (V invertida y X) con los perfiles seleccionados (IR, OR y ángulo) y con el pandeo prematuro en los niveles propuestos (pisos 2, 4 y 6), se concluye lo siguiente.

En general para ambas configuraciones, los resultados tienden a mostrar que es más crítico que el pandeo global prematuro se sitúe en los niveles inferiores, ya que las distorsiones de entrepiso suelen ser más grandes cuando se supone un pandeo global prematuro en el piso 2.

Comparando los resultados de los análisis realizados con cada perfil y cada configuración, sin importar el nivel donde se sitúa el pandeo global prematuro, cuando se analiza el comportamiento entre las dos configuraciones, si se utiliza la configuración en X se obtiene una menor variabilidad en los resultados. La distorsión es ligeramente menor al caso cuando se utiliza la configuración V invertida, esta tendencia se identificó en los tres perfiles estudiados. Sin embargo, esto se debe a que los contravientos tienen una longitud no arriostrada mayor en la configuración en X, puesto que no están unidos al centro de los

contravientos. Esto hace notar la conveniencia de unir los contravientos al centro del claro cuando se usa esta configuración para mejorar su respuesta.

Posteriormente, se estudió la influencia del tipo de perfil y la configuración de contraviento con pandeo prematuro en los niveles 2, 4 y 6. Los resultados demuestran que cuando se modela un pandeo global prematuro en el piso 2, las distorsiones de entrepiso con contravientos de perfil IR sin importar la configuración, tiene una mayor probabilidad de desarrollar pandeo global a una menor distorsión.

Si el pandeo global prematuro se sitúa en el nivel 4 y en el nivel 6, nuevamente, el perfil IR tiende a generar una mayor probabilidad de alcanzar las distorsiones máximas.

La menor distorsión de entrepiso que se desarrolla en un marco con contravientos con una sección IR, la mayor distorsión ocurre con una sección de ángulo. Sin embargo, la sección IR está bien protegida contra la fractura, mientras que el ángulo está relacionado con una fractura inminente conforme a estudios experimentales recientes. Dada la poca diferencia en las distorsiones entre ambas secciones, los resultados de este capítulo sugieren que los contravientos con sección ángulo no deberían permitirse como marcos con contravientos concéntrico de ductilidad media ($Q=3$). Esta restricción no se encuentra en la versión actual de las NTC-DCEA.