



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de disipadores de energía sísmica del tipo
contraventeos restringidos al pandeo (CRP)**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Víctor Rodríguez Corona

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Héctor Guerrero Bobadilla



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019



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.

*Quiero saber cómo Dios creó este mundo,
No me interesa este o aquel fenómeno,
el espectro de este o aquel elemento,
Quiero conocer sus pensamientos;
el resto son detalles*
Albert Einstein

DEDICATORIA

A **Dios** por permitirme llegar hasta este momento, brindándome salud, un hogar, alimento y una invaluable familia.

A **mis hermanas y mi ángel guardián;** Lizet, Jennifer y Lizbeth por todo el amor y apoyo incondicional, por siempre sacarme una sonrisa con sus ocurrencias, tienen una gran personalidad. Me enorgullecen y son mi fortaleza.

A **mis padres;** Yolanda Ma. Bernardina y Víctor Manuel, por siempre ser mis pilares y ejemplo a seguir. Gracias por darme la oportunidad de estudiar la Universidad y permitirme desarrollar las actividades que más amo.

A **mi familia,** por siempre apoyarme y tener momentos de calidad, en especial a mis primos y tías, son únicos y extravagantes.

A **mi novia** Liliana por ser una gran luz y fuente de amor en mí vida. A su increíble familia por el apoyo moral, los admiro y estimo mucho.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente a la Facultad de Ingeniería por brindarme una formación íntegra.

Al Instituto de Ingeniería de la UNAM, por todos los conocimientos y avances tecnológicos que brinda a nuestra nación. En especial al **Dr. José Alberto Escobar Sánchez** por el apoyo económico y por darme la oportunidad de realizar mi servicio social.

Al **Dr. Héctor Guerrero Bobadilla** por siempre impulsar mi desarrollo, académico, profesional y personal. Gracias por toda la paciencia brindada en este proyecto, es un gran ser humano y lo admiro demasiado como investigador.

A Dios, a mis padres, a mi novia y a mis amigos por siempre estar ahí cuando más los necesito, todos los momentos y experiencias brindadas fueron clave para mi crecimiento personal y profesional. Especialmente al grupo MJC; a mi escuadra Aqueos y a mi conquista Deneb.

RESUMEN

Se presenta una metodología práctica de diseño de disipadores de energía sísmica del tipo Contraventeos Restringidos al Pandeo (CRP). Esta metodología puede ser útil para ingenieros y arquitectos de la práctica de tal suerte que puedan implementar sistemas de protección sísmica en estructuras existentes o nuevas, con configuración estructural a base de marcos rígidos de concreto o acero.

El objetivo es impulsar el uso de sistemas de protección sísmica, para salvaguardar la vida de los usuarios y mejorar el desempeño de las estructuras ante eventos sísmicos. Sin duda alguna, el uso de sistemas de protección ayudará a construir una sociedad resiliente pues, en la actualidad, nuestras sociedades modernas no están dispuestas a perder su patrimonio a causa de un fenómeno natural.

En la segunda parte de este trabajo se muestra la aplicación de la metodología propuesta en diversas zonas de la Ciudad de México, obteniéndose las propiedades de diseño que deben tener los CRPs. Así mismo, se presentan las conclusiones derivadas de esta tesis.

ABSTRACT

A practical methodology of design seismic energy dissipaters of the Buckling Restrained Braces (BRB) type is presented. The proposed methodology may be useful to engineers and architects so that they can implement seismic protection systems in existing structures or new structures with structural configuration based on rigid concrete or steel frames.

The objective is to promote the use of seismic protection systems, to safeguard the lives of users and improve the performance of structures during intensive seismic events. This would help to construct a more resilient society since current modern society is not disposed to lose their patrimony because of a natural phenomenon.

In the second part of this study, the application of the methodology is shown for structures in different areas of Mexico City, obtaining the design properties that BRB's should have. Likewise, the conclusions derived from this thesis are presented.

CONTENIDO

DEDICATORIA	II
AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	III
ÍNDICE DE FIGURAS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI
DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO	VII
1.INTRODUCCIÓN	1
1.1.SISMICIDAD EN MÉXICO.....	2
1.1.1.CONTEXTO ACTUAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO	5
1.2.NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS	9
1.2.1.NTC-DISEÑO POR SISMO.....	9
1.2.2. NTC-DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE ACERO	10
1.3.FILOSOFÍA DEL DISEÑO	13
1.3.1.DISEÑO BASADO EN FUERZAS	14
1.3.2.DISEÑO BASADO EN DESEMPEÑO.....	16
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
2.1. JUSTIFICACIÓN	20
2.2.ALCANCES	21
2.3.OBJETIVOS.....	22
3.DISIPADORES DE ENERGÍA SÍSMICA DEL TIPO CRP	23
3.1.ANTECEDENTES	28
3.1.1.BREVE HISTORIA DE LOS CRPS	28
3.1.2.COMPONENTES DE UN CRP	29
3.1.3.ESTUDIOS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS	30
3.1.4.VENTAJAS PRINCIPALES.....	31
3.2.RESILIENCIA SÍSMICA	33
4.PROPUUESTA DE METODOLOGÍA DE DISEÑO	37
4.1. MÉTODO PROPUESTO.....	38
4.2. CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA DEL NÚCLEO	42
4.3. RIGIDEZ Y RESISTENCIA DEL CRP	46
4.4. TAMAÑO DE FUNDA	46
5. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA	48
5.1. EDIFICIOS UBICADOS EN LA ZONA I.....	50
5.1.1. EJEMPLO 1. EDIFICIO DE 5 NIVELES (Z-I-5).....	50
5.1.2. EJEMPLO 2. EDIFICIO DE 10 NIVELES (Z-I-10)	56
5.1.3. EJEMPLO 3. EDIFICIO DE 15 NIVELES (Z-I-15)	59
5.2. EDIFICIOS UBICADOS EN LA ZONA II	63

5.2.1. EJEMPLO 4. EDIFICIO DE 5 NIVELES (Z-II-5)	63
5.2.2. EJEMPLO 5. EDIFICIO DE 10 NIVELES (Z-II-10).....	66
5.2.3. EJEMPLO 6. EDIFICIO DE 15 NIVELES (Z-II-15).....	69
5.3. EDIFICIOS UBICADOS EN LA ZONA III.....	72
5.3.1. EJEMPLO 7. EDIFICIO DE 5 NIVELES (Z-III-5).....	72
5.3.2. EJEMPLO 8. EDIFICIO DE 10 NIVELES (Z-III-10)	75
5.3.3. EJEMPLO 9. EDIFICIO DE 15 NIVELES (Z-III-15)	79
6. CONCLUSIONES	83
6.1.CONCLUSIONES.....	84
6.2.RECOMENDACIONES PARA EL USO DE LA METODOLOGÍA.....	84
6.3.RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS	84
REFERENCIAS.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Cinturón de fuego del Pacífico (Daza, 2017)	2
Figura 1. 2. Falla inversa (Toro, 2014).....	3
Figura 1. 3. Regionalización sísmica de la República Mexicana. (CFE,2008).....	4
Figura 1. 4. Porcentaje de edificios afectados, distribuido en alcaldías (Berrón, 2018)	6
Figura 1. 5.Componentes de un CRP. (NTC-DCEA, 2017).....	10
Figura 1. 6. Configuraciones permitidas de CRP a) en V; b) en V; c) en v invertida; d) en diagonal sencilla; e) en X en dos niveles. (NTC-DCEA, 2017).....	11
Figura 1. 7. Longitud efectiva de fluencia de los CRP (Lyx) (NTC-DCEA, 2017)	11
Figura 1. 8. Deformación axial de los CRPs (NTC-DCEA, 2017).....	12
Figura 1. 9. Curva idealizada; fuerza-desplazamiento de los CRPs (NTC-DCEA, 2017).....	12
Figura 1. 10. Método Pushover	16
Figura 1. 11. Curva de capacidad de una estructura	18
Figura.3. 2.Clasificación de los sistemas de control estructural (Bonilla, 2012).....	25
Figura.3. 3.Representación de un sistema de control pasivo (Bonilla, 2012).....	25
Figura.3. 4.Configuración de una estructura (Bonilla, 2012)	26
Figura.3. 5.Principio de compatibilidad de deformación en un marco (Ibáñez, 2012).....	28
Figura.3. 6.Ejemplo de un contraventeo convencional 2D (Ibáñez, 2012).....	28
Figura.3. 7. Tipo de secciones de los Contraventeos Convencionales (Gerdau Corsa, 2013).....	28
Figura.3. 8.Configuración de un CRP (Terán G. A., 2009).....	29
Figura.3. 9.Configuración de un contraventeo restringido al pandeo (Tremblay et al, 2006)	30
Figura.3. 10.Daños en los marcos convencional y reforzado con un CRP; marcados con X (Guerrero, 2017)	30
Figura.3. 11.Curva de capacidad de una estructura dual (Guerrero, 2017)	31
Figura.3. 12.Comparativa de los diferentes estados de diseño de la normativa.....	32
Figura.3. 13.Marco Rígido de Concreto con un CRP.....	32
Figura.3. 14.Ciclo de histéresis CC vs CRP (Cortesía de Guerrero.)	33
Figura.3. 15.Ciclo de flujo de la resiliencia.....	34
Figura.4. 1. Algoritmo para el diseño del CRP.....	39
Figura.4. 2.Ejemplo de arreglos (simétricos) de CC en un modelo.	40
Figura.4. 3.Desplazamiento de un edificio a 2D y la historia de distorsiones de entrepiso	41
Figura.4. 4.Algoritmo para las propiedades del núcleo	43
Figura.4. 5.Dimensiones del núcleo del CRP	44
Figura.4. 6. Ejemplo de la restricción del γ_L	45

Figura.4. 7. Dimensiones del CRP	46
Figura.4. 8. Encamisado del CRP (Vista longitudinal).....	47
Figura 5. 1. Ubicación de las edificaciones y espectros de diseño (NTC-DS,2017-SASID).....	49
Figura 5. 2. Modelo en SAP2000 (Vista 3-D).....	50
Figura 5. 3. Distorsiones de entrepiso dirección “X” y “Y” del edificio de 5 niveles.....	51
Figura 5. 4. Arreglos de CC para el modelo de cinco niveles y sus distorsiones correspondientes.....	52
Figura 5. 5.Dimensiones del núcleo del CRP-1(Vista en corte y transversal).....	53
Figura 5. 6.Encamisado del CRP-1 (Vista longitudinal y transversal).....	53
Figura 5. 7.Dimensiones del núcleo del CRP-2 (Vista en corte y transversal).....	54
Figura 5. 8.Encamisado del CRP-2 (Vista longitudinal y transversal).....	55
Figura 5. 9. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (5 niveles).....	55
Figura 5. 10. Curva de capacidad de la estructura en dirección “x” y “y”	56
Figura 5. 11. Arreglos de CC para el modelo de 10 niveles y sus distorsiones correspondientes	57
Figura 5. 12. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (10 niveles).....	59
Figura 5. 13. Arreglos de CC para el modelo de 15 niveles y sus distorsiones correspondientes	60
Figura 5. 14. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (15 niveles).....	63
Figura 5. 15. Arreglos de CC para el modelo de cinco niveles y sus distorsiones correspondientes.....	64
Figura 5. 16. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (5 niveles).....	66
Figura 5. 17. Arreglos de CC para el modelo de 10 niveles y sus distorsiones correspondientes	67
Figura 5. 18. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (10 niveles).....	69
Figura 5. 19. Arreglos de CC para el modelo de 15 niveles y sus distorsiones correspondientes	69
Figura 5. 20. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (15 niveles).....	72
Figura 5. 21. Arreglos de CC para el modelo de 5 niveles y sus distorsiones correspondientes	73
Figura 5. 22. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (5 niveles).....	75
Figura 5. 23. Arreglos de CC para el modelo de 10 niveles y sus distorsiones correspondientes	76
Figura 5. 24. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (10 niveles).....	78
Figura 5. 25. Arreglos de CC para el modelo de 15 niveles y sus distorsiones correspondientes	79
Figura 5. 26. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (15 niveles).....	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. 1. Edificios colapsados en la Ciudad de México por el terremoto de Puebla 2017.	6
Tabla 1. 2. Estados de daño y niveles de desempeño (SEAOC, 1995).....	17
Tabla 3. 1.Tabla de comparación de los sistemas pasivos de control estructural (Oviedo & Duque, 2009)	27
Tabla 5. 1. Geometrías de las estructuras estudiadas.....	49
Tabla 5. 2. Resultados del espectro de sitio (SASID).....	50
Tabla 5. 3. Análisis estático en direcciones “x” y “y”.....	50
Tabla 5. 4. Análisis estático en direcciones “x” y “y”.....	56
Tabla 5. 5. Propiedades y geometría del CRP-1	57
Tabla 5. 6. Propiedades y geometría del CRP-2.....	58
Tabla 5. 7. Propiedades y geometría del CRP-1	60
Tabla 5. 8. Propiedades y geometría del CRP-2.....	61
Tabla 5. 9. Propiedades y geometría del CRP-3.....	62
Tabla 5. 10. Análisis estático en direcciones “x” y “y”	63
Tabla 5. 11. Propiedades y geometría del CRP-1	64
Tabla 5. 12. Propiedades y geometría del CRP-2.....	65
Tabla 5. 13. Análisis estático en direcciones “x” y “y”	66
Tabla 5. 14. Propiedades y geometría del CRP-1	67
Tabla 5. 15. Propiedades y geometría del CRP-2.....	68
Tabla 5. 16. Propiedades y geometría del CRP-1.....	70
Tabla 5. 17. Propiedades y geometría del CRP-2.....	71
Tabla 5. 18. Análisis estático en direcciones “x” y “y”.....	72
Tabla 5. 19. Propiedades y geometría del CRP-1.....	73
Tabla 5. 20. Propiedades y geometría del CRP-2.....	74
Tabla 5. 21. Análisis estático en direcciones “x” y “y”	75

Tabla 5. 22. Propiedades y geometría del CRP-1	76
Tabla 5. 23. Propiedades y geometría del CRP-2	77
Tabla 5. 24. Propiedades y geometría del CRP-1	79
Tabla 5. 25. Propiedades y geometría del CRP-2	80
Tabla 5. 26. Propiedades y geometría del CRP-3	81
Tabla 5. 27. Periodos iniciales y finales de las estructuras	82

DESCRIPCIÓN DEL CONTENIDO

Esta tesis propone ser una guía práctica de diseño de disipadores de energía sísmica del tipo Contraventeos Restringidos al Pandeo (CRP), para que las futuras generaciones puedan desarrollar estructuras con sistemas de protección sísmica.

- El capítulo 1 se tiene una breve introducción, sobre el contexto actual de México y la sismicidad. Se explica la vulnerabilidad que se tiene ante los fenómenos sísmicos y, a su vez, resultados de algunas investigaciones que proponen para mitigar los daños en estructuras, contribuciones y postpuestas de diseño, y diversas maneras de emplear sistemas de protección sísmica.
- En el capítulo 2 se justifica el planteamiento del problema del presente trabajo, así como los alcances y objetivos.
- En el capítulo 3 se describen los disipadores de energía sísmica (CRPs), su funcionamiento, la clasificación, componentes y temas de resiliencia sísmica.
- En el capítulo 4 se propone una metodología de diseño para obtener las propiedades de un CRP, esto es: núcleo, funda, rigidez, resistencia, etc. Se explica a detalle el procedimiento para diseñar un CRP partiendo de un Contraventeo Convencional (CC).
- En el capítulo 5 se aplica la metodología propuesta, proponiendo varios ejemplos sencillos en diversas zonas de la Ciudad de México. Se describen paso a paso los procesos para desarrollar los CRPs de dicha estructura.
- Finalmente, en el capítulo 6 se presentan las conclusiones derivadas de esta tesis.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

Desde sus orígenes y a la fecha, México es un país con vulnerabilidad sísmica elevada. Esto se debe a que está situado en una zona geográfica donde los movimientos de las placas tectónicas causan grandes liberaciones de energía. Esto hace a la ciudad sumamente susceptible a los terremotos. A pesar de la experiencia adquirida y la normativa vigente, se tiende a cometer los mismos errores del pasado (continúan cayéndose edificios en eventos sísmicos de gran intensidad). Se debe modificar nuestra filosofía de diseño en las estructuras y optimizar los recursos que uno tiene para garantizar la seguridad en las estructuras actuales y futuras.

La ingeniería estructural se encuentra en un proceso de desarrollo, ya que constantemente investiga las técnicas que son empleadas en el campo laboral, aportando resultados y sugerencias a los casos estudiados. Desafortunadamente, a menudo se olvidan algunos eventos importantes que marcaron nuestra historia y se tiene la ideología de que a nosotros nunca nos sucederá un escenario desfavorable. Un claro ejemplo de ello fue el sismo que sacudió al Distrito Federal en septiembre del 1985, llevándose consigo muchas vidas.

Por si fuera poco, años más tarde ocurrió otro evento de gran intensidad en el año 2017, cuando se redujeron significativamente los daños, pero dejando una vez más cientos de víctimas y algo muy importante, edificaciones muy dañadas o inservibles que, a pesar de no haber colapsado, tuvieron pérdida total de la edificación.

1.1. SISMICIDAD EN MÉXICO

México es un país proclive a sufrir temblores fuertes. Esto es sabido desde épocas pasadas. Por su ubicación, México se encuentra en el cinturón de fuego del Pacífico (ver figura 1.1), en donde interactúan cinco placas tectónicas; Pacífico, Cocos, Rivera, Caribe y Norteamérica.

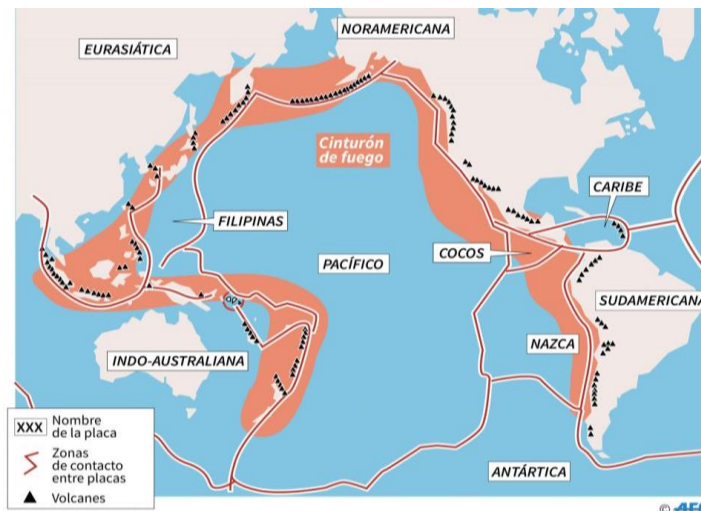


Figura 1. 1. Cinturón de fuego del Pacífico (Daza, 2017)

Las placas tectónicas son porciones de la litósfera que se ubican debajo de la superficie o corteza terrestre del planeta; son consideradas planchas o placas rígidas de roca, las cuales se encuentran flotando sobre una capa semifluida. Esto hace que siempre estén en constante movimiento.

Los diversos movimientos tectónicos son fuerzas que provienen del interior de la Tierra y, a pesar de la tecnología y los diversos estudios que se tienen, nos es posible poder predecir dichos fenómenos naturales.

El movimiento de las placas tectónicas no siempre es en la misma dirección y esto provoca que choquen y rocen entre sí unas con otras, liberando una gran cantidad de energía. Existen diversos tipos de fallas geológicas; falla normal, inversa, de rumbo, oblicua y rotacional. La más relevante en nuestra nación es la falla inversa o de subducción que se genera por compresión horizontal. El movimiento es preferentemente horizontal y el plano de falla tiene típicamente un ángulo de 30° respecto a la horizontal. El bloque de techo se encuentra sobre el bloque de piso (ver figura 1.2).

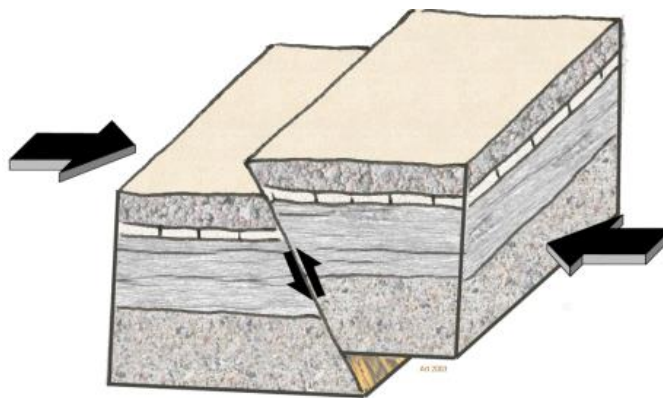


Figura 1. 2. Falla inversa (Toro, 2014)

En el caso de México, los eventos sísmicos son provocados principalmente por la falla de subducción de la placa de Cocos con la placa de Norteamérica. De acuerdo con (Lagos, 2014) el movimiento de subducción se genera principalmente frente a las costas de los estados de Chiapas, Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco.

Por lo anterior, se concluye que México es una nación con alta sismicidad, principalmente en las partes del sur y centro de la república. Gracias al estudio de la topografía, se ha realizado una clasificación de tres regiones principales en México (CFE, 2008):

1. Zona Sísmica: Es donde los sismos son muy frecuentes y con alta magnitud. Se encuentran los estados de Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Colima, Jalisco, Estado de México, Puebla y Ciudad de México.
2. Zona Pensísmica: Ocurren sismos con poca frecuencia. Región de los estados de San Luis Potosí y Guanajuato.
3. Zona Asísmica: Donde raramente o nunca ocurre un movimiento telúrico, como la península de Yucatán.

En la figura 1.3 se puede observar una zonificación propuesta por la Comisión Federal de Electricidad (CFE).

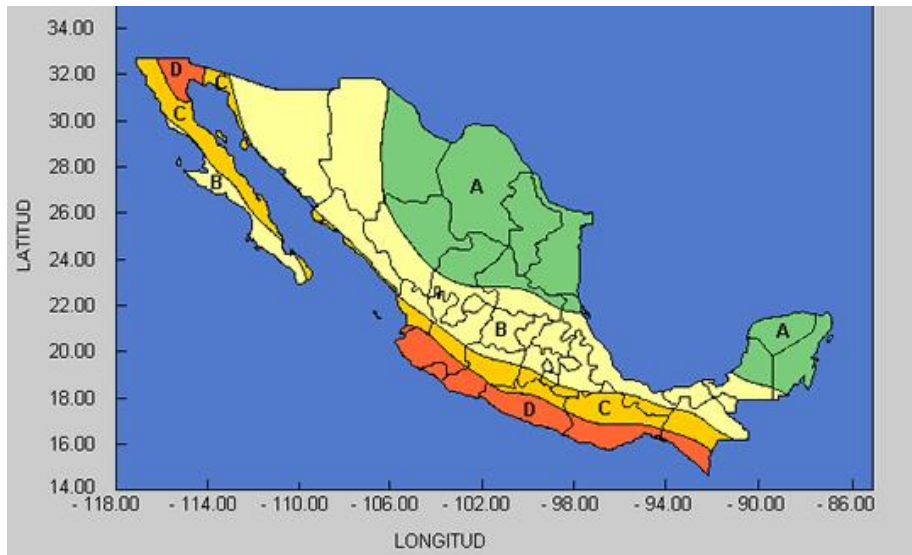


Figura 1. 3. Regionalización sísmica de la República Mexicana. (CFE,2008)

La República Mexicana se dividió en cuatro zonas sísmicas, utilizándose los catálogos de sismos del país desde inicios de siglo (Montaño, 2013):

- ✓ En la **zona A**, no se tienen registros históricos de sismos y no se esperan aceleraciones del suelo mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad a causa de temblores.
- ✓ En las **zonas B y C**, se registran sismos que no son tan frecuentes o son zonas afectadas por altas aceleraciones pero que no sobrepasan el 70% de la aceleración del suelo.
- ✓ En la **zona D**, se reportan grandes sismos históricos, donde la ocurrencia de sismos es muy frecuente y las aceleraciones, del suelo pueden sobrepasar el 70% de la aceleración de la gravedad.

Con todos los estudios no cabe la menor duda de la alta sismicidad en ciertas regiones de la República Mexicana. Así mismo, se han tenido diversos reportes históricos (Arriaga, 2018) y (Meza, 2015) sobre las ocurrencias sísmicas, algunos eventos destacados son:

1. **El gran tsunami:** ocurrió el 28 de marzo de 1787 a las 11:00 horas, se registró con una magnitud de 8.6 grados, el epicentro fue en las costas de Oaxaca.
2. **El sismo del Ángel:** fue el 27 de julio de 1957 a las 02:43 horas, se registró de 7.8 grados, siendo Guerrero el epicentro, en este evento se tuvo una pérdida de 700 víctimas y 2,500 heridos.
3. **Sismo de 1985:** fue el 19 de septiembre de 1985 a las 07:17 horas, se registró de 8.1 grados, siendo las costas de Michoacán el epicentro. Se tiene un estimado de 7,500 bajas,

cerca de 50,000 heridos y 250,000 personas sin hogar. Se cuenta que fueron 770 edificios o más que colapsaron.

4. **Sismo El Mayor-Cucapah:** fue el 04 de abril de 2010 a las 15:40 horas, se registró de 7.2 grados, siendo Mexicali, Baja California el más afectado, de hecho, desde 1915, se registraron dos pérdidas y cerca de 100 lesionados, sin mencionar los daños en la infraestructura.
5. **Los sismos de 1999:** fueron en Puebla y Oaxaca el 15 de junio y 30 de septiembre de 1999. Se registraron de 7.5 grados, causando 52 decesos. Mientras que a nivel estructural se causaron miles de caídas en viviendas de adobe y daños en monumentos históricos.
6. **Terremoto de Puebla:** ocurrió el 19 de septiembre del 2017 a las 13:14 horas. Se registró de 7.1 grados, dejando 369 muertos y a su vez causando el desplome de 16 edificios, entre ellos con planta baja flexible o débil y dejando más de 3, 000 estructuras dañadas.

Estos son sólo algunos de los eventos más relevantes, y gracias a ellos se ha logrado comprender más a detalle la ingeniería sísmica y estructural, y con base en estos registros y datos históricos es posible mejorar el desempeño de las estructuras de acuerdo a la experiencia de las generaciones anteriores.

1.1.1. CONTEXTO ACTUAL DE LA CIUDAD DE MÉXICO

El suelo de la Ciudad de México es uno de los más complejos que hay en el mundo, debido a que esta ciudad se encuentra cimentada en un lago, no hay duda alguna de que es una nación vulnerable por la construcción vertical (demanda poblacional). Por lo tanto, se deben tomar las medidas necesarias de prevención (sistemas de protección sísmica). Esto es una de las razones por la cual se requiere estructuras capaces de tolerar daños sísmicos.

Se mencionó anteriormente que los sismos tienen diversas ubicaciones y epicentros y, a pesar de que la Cd. de México no es uno de ellos, la energía sísmica que desenvuelve un sismo puede llegar a causar grandes estragos.

Debido a la gran población, y la gran demanda poblacional que tiene la Ciudad de México, su crecimiento se seguirá desarrollando en edificaciones. De acuerdo a la investigación del Instituto para la Seguridad de las Construcciones (ISC), y a diversas investigaciones de Berrón (2018), se sabe que:

Los edificios más afectados por el sismo fueron en la delegación Cuauhtémoc, que tuvo el mayor número de casos con el 37 % del total, seguida de la Benito Juárez con el 16%, Coyoacán con 9%, Gustavo A. Madero 10%, Iztapalapa con 8%, Venustiano Carranza con 7%, Tláhuac con 5%, y Tlalpan con 3% al igual que Xochimilco (ver figura 1.4).

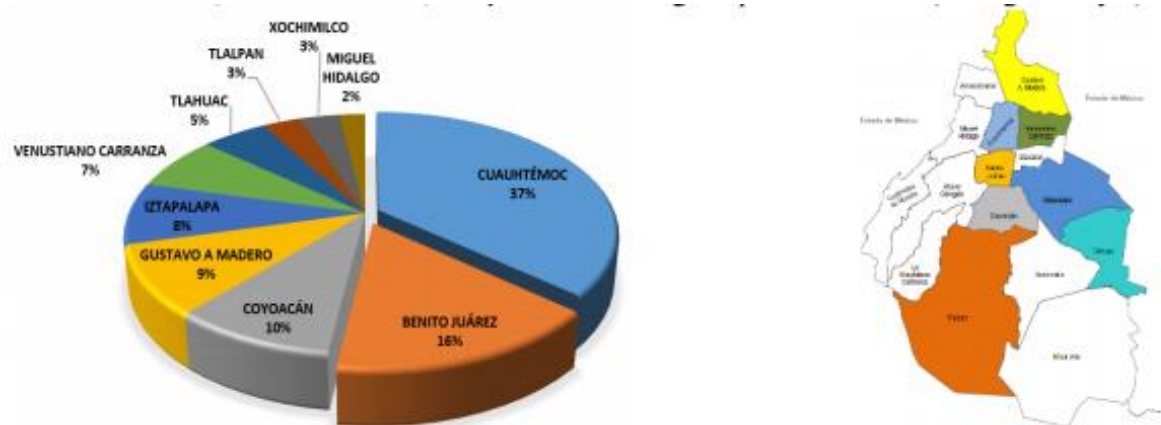


Figura 1. 4. Porcentaje de edificios afectados, distribuido en alcaldías (Berrón, 2018)

En la tabla 1.1. se muestran algunas imágenes de edificaciones que colapsaron después del terremoto de Puebla-Morelos en 2017:

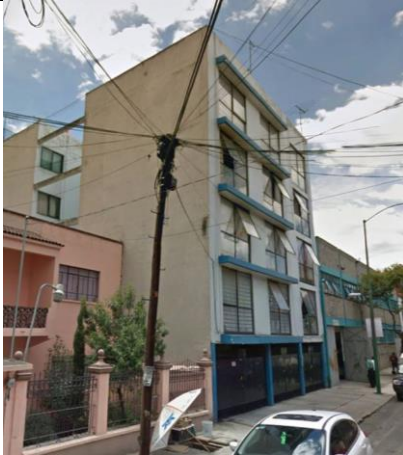
Tabla 1. 1. Edificios colapsados en la Ciudad de México por el terremoto de Puebla 2017.

<i>Antes</i>	<i>Después</i>
Calzada de Tlalpan	
	
Eje 2 Poniente y Escocia	
	

Edimburgo 4, esquina Escocia, Colonia del Valle



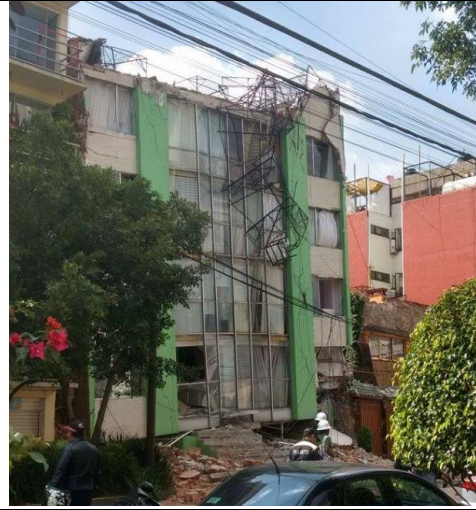
Saratoga 714, Portales Sur



Bolívar 168, Colonia Obrera



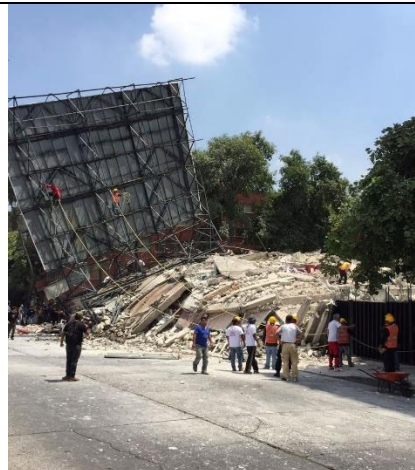
Rebsamen 241, Colonia Narvarte poniente



Patricio Sanz 37, Colonia Del Valle Norte



Viaducto Miguel Alemán 106



En la tabla 1.1 se vio una serie de edificaciones (Ruiz, 2017), todas ellas con configuración en común: “plata baja flexible o débil”. Cabe mencionar que hubo muchos otros edificios que tuvieron daños severos y que pueden ser riesgosos para la sociedad si no se reparan a la brevedad. Se destaca que el 40% de los edificios que cayeron estaban en esquinas y su falla fue ocasionada por cambios súbitos de rigidez.

1.2. NORMAS TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS

En el reglamento de la Ciudad de México, Normas Técnicas Complementarias (NTC) en su versión 2017, para diseño por sismo y diseño y construcción de estructuras de acero, se puede observar que ya se están considerando los sistemas de control pasivo; como disipadores histeréticos de energía sísmica. Esto representa un gran avance, aunque aún hace falta más información e investigaciones que permitan emplear este tipo de tecnologías de manera más recurrente.

1.2.1. NTC-DISEÑO POR SISMO

En las NTC de diseño por sismo, en el capítulo 4, se tienen los límites permisibles de las distorsiones de entrepiso para estructuras de concreto. Es importante mencionar que dentro de esta normativa sólo se permite emplear CRPs con un factor de comportamiento sísmico de $Q=4$ máximo (NTC-DS, 2017).

El factor de comportamiento sísmico es un coeficiente que tienen involucrada la ductilidad de la estructura de manera indirecta, entre mayor sea Q , quiere decir que la estructura será más dúctil. Lo que hace este factor es reducir las fuerzas sísmicas de diseño. Por otro lado, si Q es menor, los requisitos de ductilidad se relajan, llevando a estructuras con comportamiento frágil ante eventos sísmicos.

Por otro lado, el apéndice B de las normas impulsa a emplear los dispositivos de protección para acciones sísmicas, siempre y cuando estos dispositivos permanezcan en un rango elástico, a menos que se demuestre que el disipador trabaja en el rango inelástico, cumpliendo con las demandas sísmicas y demostrando que no ponen en riesgo a la estructura.

La normativa nos da la sugerencia de emplearlos de manera simétrica para evitar efectos de torsión en las estructuras. En el caso de que se presente un sismo, se deben revisar los dispositivos, para estructuras del grupo A, en un lapso menor de tres años y, para aquellas del grupo B en un lapso menor de 5 años. También, se deben realizar pruebas de calidad y algunas pruebas del laboratorio, la cuales deben ser supervisadas por un experto en el tema, sin mencionar que deben tener un control de calidad en la obra y en los experimentos.

Se debe emplear por lo menos dos dispositivos de prueba en cada disipador que se usa en la estructura; obteniendo un ciclo de histéresis para el caso de los CRPs. Los CRPs deben soportar 15 ciclos completos si es terreno blando ($T_s \geq 1$ s), de lo contrario 5 ciclos completos.

Dicho lo anterior se tienen un parámetro para revisar la rigidez efectiva, la cual se obtienen de la siguiente ecuación:

$$K_{efectiva} = \frac{|F_{EDE}^+| + |F_{EDE}^-|}{|D_{EDE}^+| + |D_{EDE}^-|} \quad ec. 1. 1$$

Donde:

- $K_{efectiva}$: Rigidez efectiva de un disipador hysterético
- F_{EDE} : Fuerzas máximas, positiva y negativa
- D_{EDE} : Desplazamientos máximos, positivo y negativo

La rigidez efectiva no debe diferir más del 15% de la rigidez efectiva promedio. Después de la prueba, se verificará que no haya daño o fricción excesiva en el sistema que constituye el disipador.

Para finalizar, la norma sugiere que los dispositivos se coloquen en un sitio con facilidades de inspección y el cual permita dar mantenimiento o remplazo (muy útil), ya que sí se pretenden emplear como un fusible estructural, se debe tener esas facilidades.

1.2.2. NTC-DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE ACERO

En esta sección de la normativa, específicamente en el capítulo 12, habla sobre las estructuras dúctiles, las cuales son consideradas para disipar parte de la energía sísmica, y resaltando que deben cumplir con las distorsiones de entrepiso que se mencionó anteriormente.

En el subcapítulo 12.3.2 “Marcos contraventeados”, se mencionan las bases de un diseño con ductilidad alta (de $Q=4$), con una distorsión de entrepiso máxima de 2% (NTC-DS, 2017).

La figura 1.5 muestra las partes que componen un CRP típico.

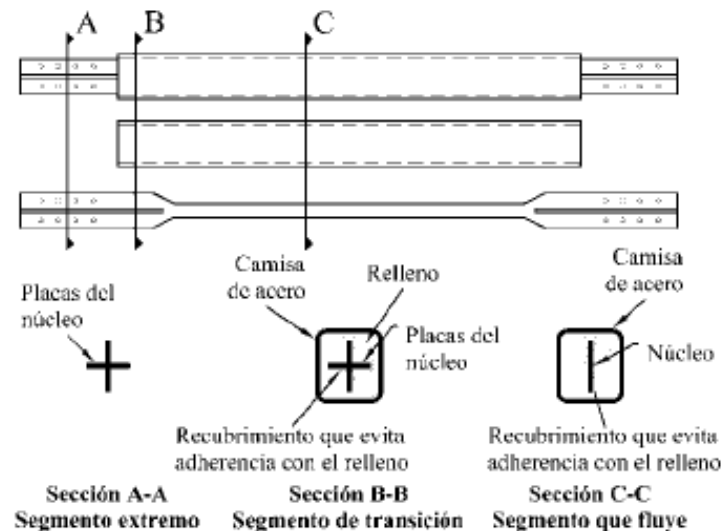


Figura 1.5. Componentes de un CRP. (NTC-DCEA, 2017)

Además, la norma sugiere que el ángulo que forma el CRP con la horizontal sea de $\theta=30^\circ$ a $\theta=60^\circ$. Cabe mencionar que existen diversas configuraciones de colocarlos (siempre y cuando se conserve la simetría), como se aprecia en la figura 1.6:

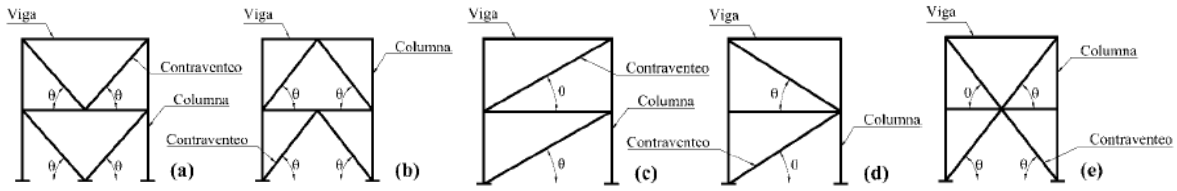


Figura 1. 6. Configuraciones permitidas de CRP a) en V; b) en V invertida; c) en v invertida; d) en diagonal sencilla; e) en X en dos niveles. (NTC-DCEA, 2017)

Así mismo dentro de la normativa existe una metodología preliminar para diseñar CRPs en función de su deformación y luego de su resistencia, aunque nunca se menciona como obtener las geometrías o propiedades que deben tener.

La deformación de los CRPs se obtiene con un análisis estructural que considere las combinaciones de carga adecuadas. La deformación axial de un contraventeo, asociada a la distorsión elástica de entrepiso (Δ_x), se obtiene de la ecuación 1.2:

$$\delta_{bx} = \frac{P_{bx} L_{ysc}}{EA_n} \quad \text{ec. 1. 2}$$

Donde:

- δ_{bx} : deformación axial elástica de la longitud efectiva de las diagonales
- P_{bx} : fuerza axial en la diagonal asociada con la distorsión elástica de entrepiso
- L_{ysc} : longitud efectiva de fluencia del núcleo de la diagonal (ver figura 1.7)
- A_n : área total de la sección transversal del núcleo de la diagonal

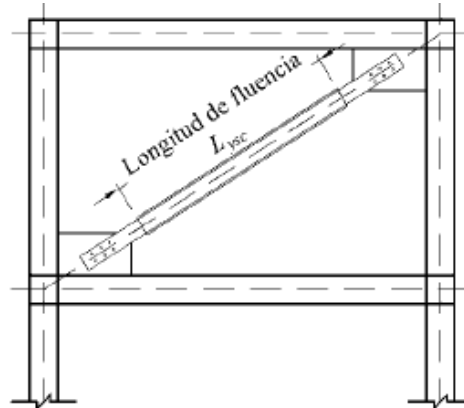


Figura 1. 7. Longitud efectiva de fluencia de los CRP (L_{yx}) (NTC-DCEA, 2017)

Una vez que se tienen la deformación axial elástica de la longitud efectiva de las diagonales, se tiene que determinar la deformación axial de los CRPs, que está asociada a la distorsión de diseño (δ_{bm})

$$\delta_{bm} = C_b \delta_{bx} \quad \text{ec. 1. 3}$$

Donde C_b es el factor de amplificación y tienen un valor de 5.0 (ver figura 1.8)

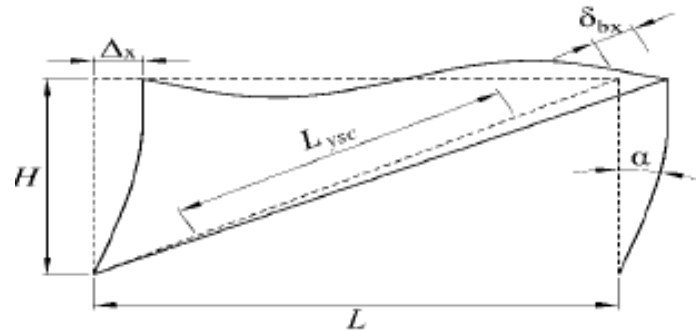


Figura 1. 8. Deformación axial de los CRPs (NTC-DCEA, 2017)

Una vez que se determina el valor de δ_{bm} , se tiene que determinar la deformación unitaria del núcleo de acero (ϵ_{CRP}), con la que se determinaran los valores de ω y β requeridos para el cálculo de la resistencia.

$$\epsilon_{CRP} = \frac{2\delta_{bm}}{L_{ysc}} \quad \text{ec. 1. 4}$$

La resistencia debe estar justificada o avalada mediante los certificados de los fabricantes, esto puede ser con pruebas experimentales; que garanticen la capacidad de los CRPs. La curva bilineal de la figura 1.9 muestra el comportamiento del dispositivo.

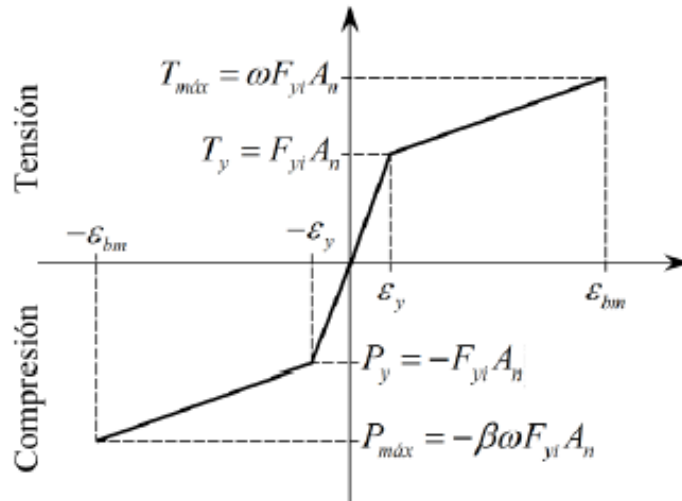


Figura 1. 9. Curva idealizada; fuerza-desplazamiento de los CRPs (NTC-DCEA, 2017)

La resistencia máxima ajustada del CRP, debe tolerar la fuerza total que actúa en las diagonales, se obtiene el diseño en tensión y compresión con las siguientes expresiones:

$$T_{m\acute{a}x} = \omega F_{yi} A_n \quad \text{ec. 1. 5}$$

$$P_{m\acute{a}x} = -\beta \omega F_{yi} A_n \quad \text{ec. 1. 6}$$

Donde:

- F_{yi} : valor mínimo garantizado del límite inferior de fluencia del material del núcleo
- A_n : área total de la sección transversal del núcleo
- β : factor de ajuste de la resistencia en compresión ($\beta > 1$). Proporcionada por el fabricante
- ω : factor de ajuste de la resistencia en tensión ($\omega > 1$). Proporcionada por el fabricante
- $T_{m\acute{a}x}$: resistencia de tensión máxima ajustada
- $P_{m\acute{a}x}$: resistencia de compresión máxima ajustada

La resistencia máxima ajustada de diseño se ajusta con base a la información de las características de los CRPs. Los miembros que concurren en los nudos deben diseñarse para resistir las fuerzas calculadas, es decir que el CRP no puede tener una mayor capacidad axial que una columna, ya que podría causar que falle la columna y no el CRP.

No se puede emplear CRP en forma de “K”, ya que puede causar la falla en la columna. Cabe destacar que las conexiones y uniones deben satisfacer la normativa establecida, no se mencionará detalle, pero en las normas mencionadas especifican los criterios.

1.3. FILOSOFÍA DEL DISEÑO

La normativa de la Ciudad de México proporciona herramientas para diseñar estructuras robustas capaces de soportar fuerzas sísmicas y en muchas ocasiones están sobre diseñadas (reglamento conservador).

La filosofía del diseño que se tiene en las obras civiles es el siguiente; el ingeniero a cargo del proyecto decide respecto al nivel de importancia de la edificación que tan segura debe ser la estructura, o mejor dicho que tan vulnerable. Así mismo se consideran diversos factores como los materiales, los costos, el tiempo, los procesos constructivos, etc.

Imaginemos las siguientes situaciones:

a) Caso 1:

Se diseña un inmueble en el que se espera que nuestro edificio sufra desplazamientos y daños a causa de un sismo deseando. Se pretende que la gente del edificio pueda salir antes de que el inmueble colapse o que tenga daños severos, por lo que se emplea una falla dúctil y no frágil. La reparación del inmueble es costosa y quizás ya no sea tan conveniente su rehabilitación.

b) Caso 2:

Se diseña otra estructura que sea totalmente segura y resistente, y que ante un evento sísmico no tenga daños, pero esto implica que se tiene que invertir mucho dinero, aunque quizás durante la vida útil de la edificación no ocurra ningún evento sísmico de importancia. Lo cual hace muy sobrada la estructura e incosteable.

Estás dos situaciones nos ponen en un contexto en donde el ingeniero estructurista decide qué tipo de proyecto va desarrollar. Este tipo de decisiones conllevan mucha responsabilidad y

a su vez decisiones que repercuten en la vida de otras personas. Él decide en que intervalo de elasticidad tienen que estar la estructura. A pesar de que las probabilidades jueguen a nuestro favor, no tenemos la capacidad de ver el futuro, ni de tampoco predecir los sismos, es evidente que la naturaleza es impredecible y puede suceder en cualquier momento.

Un problema en la actualidad es que se conoce la vulnerabilidad de las edificaciones y se sigue cometiendo los mismos errores del pasado al querer construir viviendas de bajos costos, esperando a que no sufran ningún siniestro, por el contrario, la necesidad y la economía del país hace que se tengan que hacer este tipo de diseños. Es aquí donde surge la siguiente pregunta:

¿Se pueden hacer estructuras de bajos costos y con buen desempeño sísmico?

La respuesta es sí y una forma es con disipadores de energía sísmica, en los siguientes subcapítulos se muestran dos tipos de filosofías de diseño, son las más empleadas en la actualidad.

1.3.1. DISEÑO BASADO EN FUERZAS

Es un método tradicional y quizás el más empleado en la actualidad en los reglamentos del mundo (Díaz, 2018). En la ciudad de México se usa el método estático por ser el más simple y usado por los profesionistas debido a su practicidad. La normativa actual prohíbe para edificaciones mayores a 30 metros emplear este tipo de análisis. Se sugiere ver la normativa a mayor detalle (NTC-DS, 2017).

Una de sus grandes desventajas es conducirnos a diseños pocos dúctiles, además de que suele restringirse para edificios pequeños y únicamente es válido a edificios con una geometría regular.

Los dos métodos de diseño sísmico más conocidos y empleados son:

a) Análisis estático

Es el más simple de todos, consiste en calcular el peso de la estructura y de acuerdo al periodo fundamental de esta se obtiene un coeficiente sísmico (porcentaje de participación de acuerdo al peso de la estructura), luego ese coeficiente pasa a multiplicarse por el peso y obtienen unas fuerzas laterales las cuales se distribuyen en cada entrepiso. Es evidente que tienen más particularidades que se explicaran a continuación:

- 1) De acuerdo al uso y al tipo de estructura se debe determinar las acciones accidentales de sismo cargas vivas instantáneas (CV_{inst}), que se colocan como carga en las losas de acuerdo a la normativa actual (GCDMX, 2017).
- 2) De acuerdo a la geometría y las propiedades de los materiales se obtiene el peso propio de la estructura, posteriormente se le agrega la CV_{inst} , al igual se debe obtener el centro de masa en cada nivel.

- 3) Con la geometría y las propiedades de los materiales (rigidez) se puede obtener el periodo fundamental de la estructura (T) el cual determina el valor del factor de reducción por comportamiento sísmico (Q'), al igual se obtiene el factor de sobre resistencia (R).
- 4) Obtener las fuerzas estáticas por medio de la siguiente expresión:

$$F_i = \frac{c}{QR} W_i h_i \frac{\sum W_i}{\sum W_i h_i} \quad \text{ec. 1.7}$$

Donde:

- F_i = fuerzas estáticas en cada entrepiso
 - c : ordenada espectral del espectro de diseño (SASID)
 - W_i : es el peso de la i -ésima masa
 - Q' : factor de reducción por comportamiento sísmico
 - R : factor de reducción por sobre-resistencia
- 5) Una vez que obtenidas las fuerzas estáticas se aplican en la estructura al centro de la masa de cada entrepiso y a partir de ahí se obtienen los desplazamientos de la estructura, resulta bastante útil y eficiente emplear un programa de análisis estructural (SAP200, ETABS, etc.)
 - 6) Al finalizar el análisis se calculan las distorsiones de entrepiso, para ver si la edificación cumple con la normativa, así mismo se hace un análisis con las excentricidades que vienen estipulada en la normativa.

b) Análisis modal espectral

Es un análisis desde mi punto de vista estático, pero considerado dinámico en el reglamento, ya que se toma en cuenta las diferentes formas de vibrar de una estructura a través de un espectro de diseño (SASID), cada forma modal tiene una deformación asociada a la frecuencia de vibrar, pero el más significativo suele ser el modo 1 y el modo 2.

Es un método más confiable a comparación del estático, ya que se apega al comportamiento real de la estructura. Para emplear este método se necesita aplicar a aun modelo tridimensional elástico y se emplea la siguiente expresión:

$$W_e = \frac{[\{\phi_i\}^T [W] \{J\}]^2}{\{\phi_i\}^T [W] \{\phi_i\}} \quad \text{ec. 1.8}$$

Donde:

- $\{\phi_i\}$: es un vector de amplitudes del i -ésimo modo natural de vibrar de la estructura.
- $[W]$: matriz de masas de la estructura
- $\{J\}$: vector formado con “unos” en las posiciones correspondientes a los grados de libertad de traslación en la dirección el análisis y “ceros” en las otras posiciones.

1.3.2. DISEÑO BASADO EN DESEMPEÑO

Nos permite estimar un nivel de daño deseado o esperado, con base en la probabilidad de ocurrencia de un sismo. De esta manera se puede anticipar el comportamiento estructural (Sánchez, 2008). Dicho lo anterior resulta evidente que al emplear algún sistema de control de daños va a proteger la inversión del proyecto. Simplemente se propone que nuestra estructura primaria, (trabaja en el rango lineal) reciba las cargas gravitacionales. Mientras que los daños o la energía sísmica puedan mitigarse en una estructura secundaria (CRP).

Las ventajas más importantes que tienen esta filosofía son;

- ✓ Seleccionar el nivel de daños deseado en una estructura (de acuerdo a su importancia).
- ✓ Informar al propietario sobre el rendimiento que tendrá la edificación (Ética profesional).
- ✓ Sistemas de control de daños en una estructura, fusibles estructurales que sean fáciles de reemplazar (estructuras resilientes).
- ✓ Diseños estructurales económicos y eficientes (menos materiales de construcción)
- ✓ Aumentar y alargar la vida útil de una estructura.

Al parecer diversos estudios (López, 2013) que se han realizado, siguen este tipo de tendencias y el diseño estructural está tomando ese camino, lo cual es magnífico para la ingeniería mexicana. Nos proporciona una conceptualización de cómo se debe identificar el peligro sísmico, la selección de los niveles y objetivos del diseño para un comportamiento deseado.

Es un método que ha tomado bastante auge, debido a que es más certero que los métodos basados en fuerzas. Este método se logra por medio de un análisis "Pushover", el cual consiste en aplicar una fuerza lateral y en una serie de pasos ir analizando la estructura (articulaciones plásticas), dando como resultado una curva de capacidad de la estructura. Lo interesante de esta técnica es que se estudia la no linealidad es una buena técnica de comprobación, de los métodos antes mencionados.

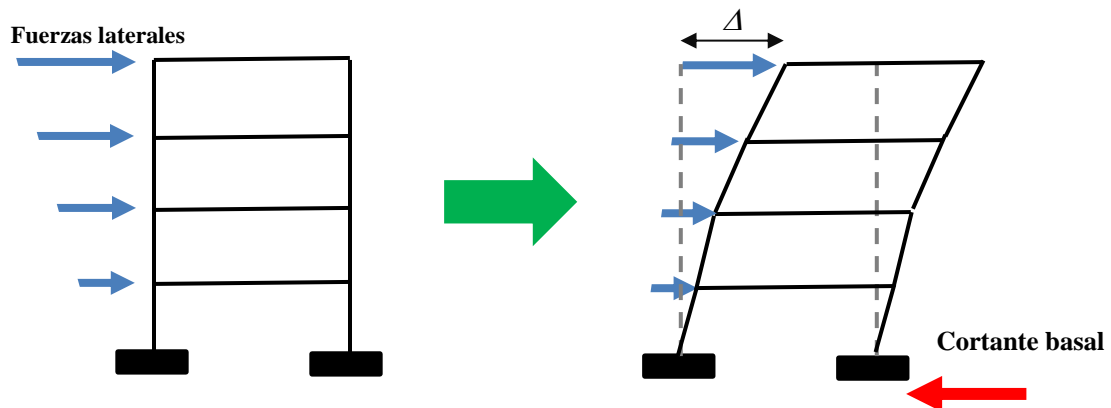


Figura 1. 10. Método Pushover

Las cargas laterales se obtienen del análisis estático (F_i), así mismo dicha carga se va incrementando monótonamente hasta que la estructura alcance el máximo desplazamiento. Suele representarse una gráfica conocida como “capacidad de desempeño” en donde el cortante de base (ordenadas) y los desplazamientos (abscisas), ver la figura 1.11.

Desde algunos años en un Comité VISION (SEAOC, 1995), es conocido como el libro azul. Se inició una forma simple de clasificar los cuatro niveles desempeño en un inmueble:

A-Totalmente Operacional. Es un nivel de desempeño en el que no suceden daños. Las consecuencias sobre los usuarios e instalaciones son despreciables. En general no se requieren reparaciones. La estructura permanece en el rango lineal.

B-Operacional. Ocurren daños moderados en elementos no estructurales y en el contenido de la edificación, e incluso algunos daños ligeros en elementos estructurales. En general, se requieren algunas reparaciones.

C- Seguridad. El nivel de desempeño en el cual ocurren daños moderados en elementos estructurales, no estructurales y en el contenido de la edificación. Se tiene una degradación de la rigidez lateral y la capacidad resistente del sistema. Las instalaciones quedan fuera de servicio y el edificio quizás necesita reparaciones importantes.

D- Pre-colapso. La degradación de la rigidez lateral y la capacidad resistente del sistema compromete la estabilidad de la estructura (cerca del colapso). La instalación es insegura y las reparaciones pueden ser no factibles (económicamente).

A continuación se muestra una tabla que resume el estado de daño y el nivel de desempeño, con sus características principales (ver tabla 1.2)

Tabla 1. 2. Estados de daño y niveles de desempeño (SEAOC, 1995)

Estado de daño	Nivel de Desempeño	Características principales
Despreciable	Totalmente operacional	Daño estructural y no estructural despreciable o nulo. Las funciones y servicios del inmueble siguen operando sin ningún problema.
Ligero	Operacional	Daños ligeros donde las instalaciones continúan en servicio y algunas funciones pueden sufrir interrupciones y necesitan recuperación inmediata.
Moderado	Seguridad	Daños moderados en la que la estructura sufre daños, pero permanece estable. Los elementos no estructurales sufrieron daños.
Severo	Pre-colapso	Daño estructural severo, en la proximidad del colapso estructura, la falla de elementos no estructurales y la seguridad de los ocupantes está comprometida.
Completo	Colapso	Colapso estructural

Para poder comprender los que se menciona en la tabla anterior se puede ver el desempeño de una estructura por medio de una curva de capacidad:

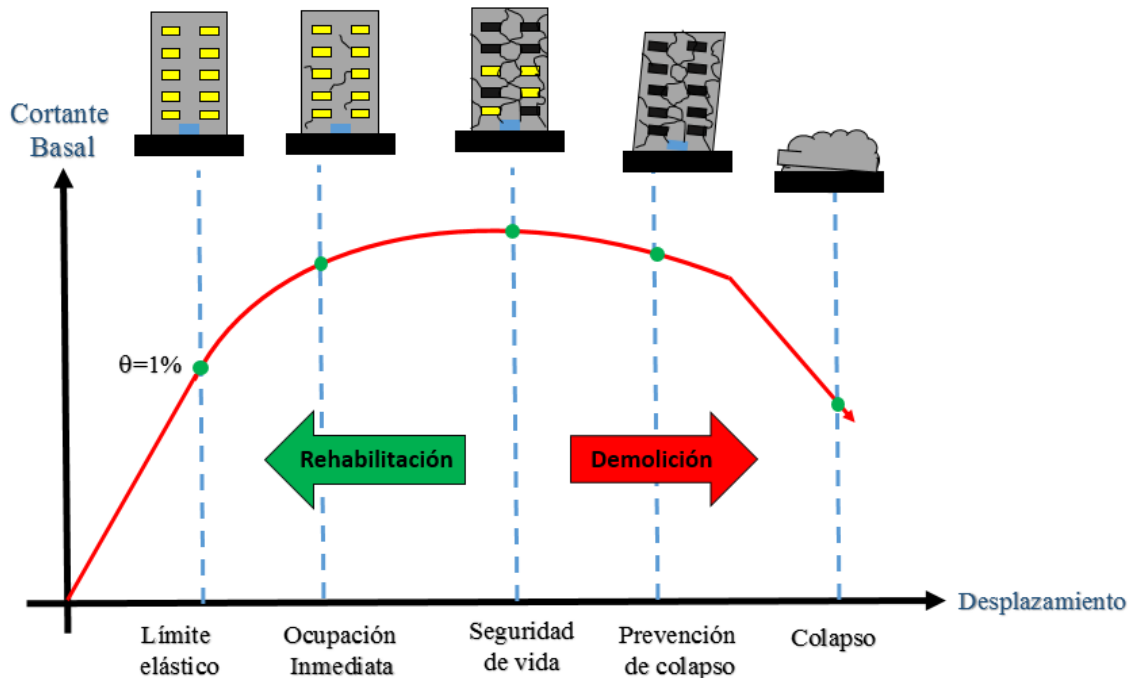


Figura 1. 11. Curva de capacidad de una estructura

En la figura 1.11 se observar que una estructura es totalmente habitable cuando tienen una distorsión del 1%, mientras que cuando tienen daños severos o ha llegado a unas deformaciones y degradación de rigidez considerable, por lo que ya no es viable hacer una rehabilitación o reforzamiento. En estricto rigor para dictaminar que una estructura se debe rehabilitar o no, se tendría analizar las varias situaciones, una de las más importantes es la económica, pero puede haber otras con mayor trascendencia como las culturales, políticas, sociales, etc.

CAPÍTULO II
PLANTEAMIENTO DEL
PROBLEMA

2.1. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo a la investigación y al conocimiento, se sabe que México es un país con un gran potencial, tanto en recursos naturales como en territorio, se tiene una gran diversidad de climas y ecosistemas, capaces de desarrollar cualquier agricultura, pero a si mismo se tiene algunos problemas a causa de los fenómenos naturales, de acuerdo a (Comite de Resiliencia de la Infraestructura, Marzo 2018) En México, a lo largo del siglo XX se tuvieron inundaciones, huracanes y sismos severos en múltiples ocasiones.

Algunos de los más graves fueron los huracanes Hilda y Janet en 1955 (con muchos muertos e incontables damnificados), los sismos de septiembre de 1985 (más de 6,000 muertos), los huracanes Gilbert (1988, más de 200 muertos) y Pauline (1997, más de 500 muertos) y las lluvias de convección que produjeron la inundación de la costa de Chiapas en 1998. Sin mencionar que hace dos años se tuvo dos sismos de grandes magnitudes, que a su vez causaron ciertos estragos, especialmente en Oaxaca (Sismo 7 de septiembre 2017) y la Ciudad de México (19 de septiembre 2017).

Después de un evento sísmico es común encontrar estructuras que están dañadas y necesitan ser rehabilitadas, con el fin de subsanar las deficiencias de un sistema estructural existente. El hecho de que un sistema estructura no cumpla con la normativa vigente, no implica que deba rehabilitarse. El criterio correcto lo dicta la vulnerabilidad del inmueble, no la normatividad.

Esto puede suceder cuando se hace un análisis estático en una estructura, y esté no cumpla la normativa, pero cuando se hace un análisis paso a paso (no lineal), puede ocurrir que si cumpla, para fines de este trabajo se asume que la estructura está dañada respecto a las distorsiones indica la normativa vigente.

Cuando se hace una rehabilitación estructural se debe buscar lo siguiente:

- 1) Si se va reforzar una estructura se hace bien, no a medias (ser contundentes)
- 2) Hay que ser conservador (la arquitectura sale en segundo plano, cuando se habla de seguridad estructural)
- 3) Se debe garantizar la integridad estructural (que todo trabaje como elementos en conjunto)
- 4) La calidad nunca debe bajarse en las obras por los costos, al contrario, es la pieza clave del buen desempeño.

En México y muchos otros países se ha practicado la técnica de rehabilitación, donde en hace mucho tiempo se encamisaban columnas (a la fecha) pero es un procedimiento costoso y a la fecha es difícil tener expresiones que nos permitan calcular dicho refuerzo. Con el paso del tiempo se optó por emplear muros de concreto que aportan rigidez a la estructura, lo cual es una muy buena solución, especialmente para sistemas de mampostería confinada u otros sistemas estructurales. En la actualidad se tienen estructuras a base de marcos de concreto y los contraventeos han tenido un auge increíble. Aun así esto no suele ser suficiente, ya que se busca cumplir las demandas sísmica por medio de la rigidez de los elementos, a darles mayor tamaños

(resistencia) a los elementos y hay otra forma de cumplir con dichas demandas, y es la disipación de energía. Desafortunadamente se tiene un proceso de desarrollo y el mexicano tienen una mentalidad conservadora y no decide invertir en sistemas de protección sísmica.

“La innovación en ingeniería sísmica puede entenderse a partir del planteamiento de sistemas estructurales que pueden controlar adecuadamente el nivel de daño en las estructuras a través de limitar su deformación durante las excitaciones sísmicas” (Espinoza, Diciembre 2009). Los disipadores de energía sísmica pueden desempeñar dicha función y tenemos la oportunidad de emplear dicha tecnología, el problema es que no se conoce del todo en nuestro país.

Las diversas publicaciones e informes que hay de los CRPs, nos dice que los contravientos restringidos al pandeo arrojarían ahorros importantes en términos del costo de las edificaciones sismoresistentes de acero y concreto reforzado, pero hasta el momento no se ha desarrollado un dispositivo nacional para fabricación a escala industrial.

Cualquier proyecto estructural que aspire a usar contravientos restringidos al pandeo tendría que pagar elevadas patentes a desarrolladores extranjeros, por tal motivo el presente trabajo busca implementar una simple propuesta de metodología para el diseño de CRPs, para que de manera sencilla se diseñen y se incentive a emplear estos sistemas de protección sísmica, como un hábito en la vida profesional y a sí mismo comiencen a usarse en estructuras que necesiten reforzamientos estructurales.

Cabe destacar que a la fecha si existen diversas formas de diseñarlos, el problema es que muchas veces se emplean métodos más complejos o extensos que dificultan los cálculos, lo cual hace inalcanzable el uso de estos dispositivos.

Por otro lado, hay empresas o despachos que venden estos productos, pero dicha tecnología suele ser muy cara e inaccesible para los usuarios. Sin embargo, sobra decir capítulo 1, el por qué se necesitan emplear estos sistemas de protección sísmica en nuestra nación.

2.2.ALCANCES

Contribuir con una metodología de diseño paso a paso de los CRPs, para el uso de edificaciones sismoresistentes, partiendo de los desplazamientos de un edificio ante un análisis modal espectral y/o estático.

Describir el proceso de elaboración de los dispositivos de forma manual, para uso de la población, siendo a su vez asequible para los usuarios de escasos recursos que necesiten esta tecnología.

Análisis y modelado de este dispositivo en el elemento finito con análisis estático no lineal como proceso de comprobación.

2.3. OBJETIVOS

- Desarrollar una metodología práctica para el diseño de CRPs que funcionen como fusibles estructurales en estructuras civiles, tales como: marcos de concreto o acero.
- Comprender y analizar el comportamiento estructural de los CRPs, para uso de los diversos sistemas estructurales, tanto nuevos como existentes.
- Incentivar el uso de sistemas de protección sísmica en México.

CAPÍTULO III
DISIPADORES DE ENERGÍA
SÍSMICA DEL TIPO CRP

Los disipadores de energía sísmica son una rama de los diversos sistemas de control estructural, se les consideran sistemas de control pasivos y como su nombre lo indican sirven para mitigar la energía que provoca un sismo. Antes de empezar abordar el tema, se debe conocer su clasificación, ya que existen diversos dispositivos que tienen la misma función, pero trabajan de forma distinta. Una de las clasificaciones es:

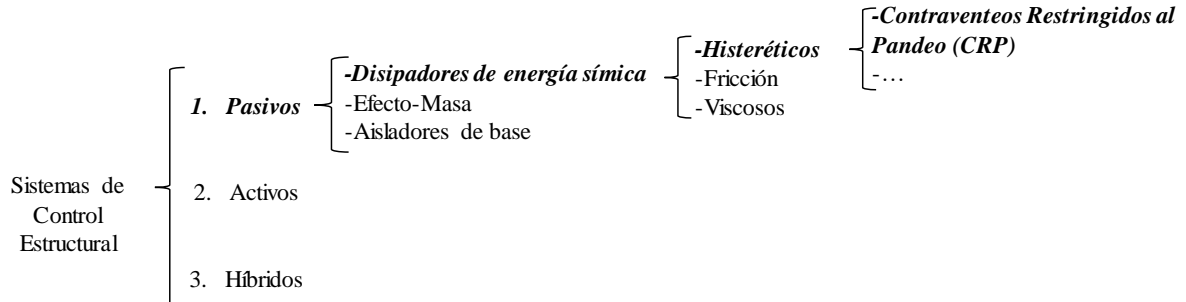


Figura.3. 1. Clasificación de los CRP (Bonilla, 2012)

Existen muchas otras clasificaciones para los mismos, dependiendo del país o la interpretación del autor. Se sugiere leer (Avilés, 2001) para obtener mayores detalles. En este proyecto se enfocará únicamente en los Contraventeos Restringidos al Pandeo (CRP), pero a su vez se explicará brevemente algunos conceptos elementales para su comprensión.

Cuando se tuvo el registro de primer sismo de Japón en los años 20 del siglo pasado, se fue modificando la filosofía de diseño, dejando valiosas lecciones para las futuras generaciones, es indiscutible que la ingeniería estructural va avanzando a pasos agigantados, el diseño de las estructuras de concreto, mampostería y acero mejoran con el paso de los años, la investigación y el desarrollo tecnológico han jugado un papel esencial en estos ámbitos.

Desafortunadamente en México no han sido suficientes, ya que se sigue cometiendo algunos errores del pasado, cayendo en las mismas tendencias, experiencia o prácticas conservadoras en la construcción de las edificaciones.

El diseño sísmico por algún tiempo estuvo basado en las famosas “losas planas” y “plantas débiles o flexibles”, pero las lecciones de la naturaleza han sido catastróficas, ocasionando víctimas, disturbios sociales y pérdidas económicas, a su vez nos está brindando nuevas oportunidades de cambiar nuestro entorno, optimizando mejor nuestros recursos e implementando medidas de prevención.

Cuando se presenta un evento sísmico se libera energía en grandes magnitudes y esto causa estragos en las estructuras cercanas (existen más variables y condiciones), pero en la actualidad existen diversos mecanismos y sistemas de control estructural; lo cual es una alternativa de diseño sismorresistente para contrarrestar las fuerzas laterales que ocasiona un terremoto, siendo estos una manera de mitigar de forma efectiva la energía sísmica.

Una forma de clasificar a los sistemas de control estructural, es el siguiente:



Figura.3. 2. Clasificación de los sistemas de control estructural (Bonilla, 2012)

Dicha clasificación se realiza con en base en su funcionamiento, por ejemplo el control pasivo responden al movimiento de la estructura, mientras que los de control activo son dispositivos de control que responden de acuerdo a un mecanismo de control que se ajusta a la excitación que está ocurriendo durante un sismo y que se retroalimenta con la respuesta que está sufriendo la estructura (Torres, 2000), mientras que los sistemas híbridos de control es una combinación de ambos sistemas.

Los sistemas estructurales de control pasivos es un conjunto de elementos que están integrados de forma secundaria en la estructura y cuando se presenta la acción sísmica responden de forma inercial, mitigando la energía y protegiendo a la estructura principal.

Un beneficio importante que tienen estos dispositivos es que no necesitan ningún tipo de energía para activarse, por lo cual resultan más accesibles a comparación de otros dispositivos. En figura 3.3 se puede apreciar el funcionamiento de un dispositivo:

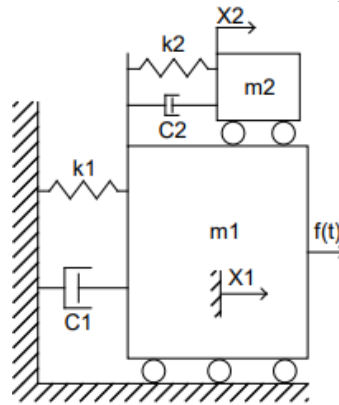


Figura.3. 3. Representación de un sistema de control pasivo (Bonilla, 2012)

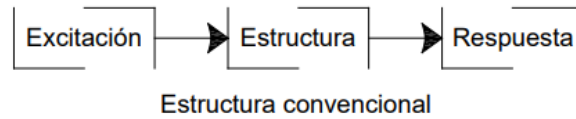
Donde:

- k_i : Rigidez del elemento
- m_i : Masa del elemento
- C_i : Amortiguamiento del elemento
- X_i : Desplazamiento del elemento
- $f(t)$: Función del tiempo

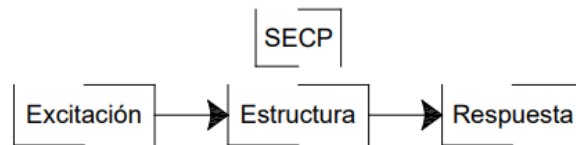
La disipación pasiva de energía es una tecnología que mejora el desempeño de una edificación añadiendo amortiguamiento a la estructura, dando como resultado la reducción de los desplazamientos. En otros países han tenido un gran auge, Japón es uno de los pioneros de esta tecnología, mientras que Estados Unidos de América al igual ha desarrollado diversas investigaciones, aportando valiosos conocimientos. Gracias a la tecnología y a las bases de la

dinámica estructural, se pueden obtener metodologías de diseño, en donde se efectúa un análisis estructural confiable.

Dicho lo anterior resulta factible el reforzamiento de una estructura con problemas de desplazamientos o el diseño de una nueva estructura capaz de mitigar energía sísmica, por ejemplo:



Estructura convencional



Estructura con el Sistema Estructural de Control Pasivo (SECP)

Figura.3. 4. Configuración de una estructura (Bonilla, 2012)

Se observa que en la figura 3.4, que una respuesta sísmica puede ser más eficiente si cuenta con un sistema de protección estructural, asegurando que nuestra estructura no sufra daños y logrando concentrar los daños en los elementos de control pasivo.

Desafortunadamente el desconocimiento de esta tecnología o la complejidad del análisis que esta tecnología conlleva a un cálculo laborioso para poder emplear los SECP, sin mencionar su costo, cualquiera que fuera el caso, desde hace mucho tiempo los colegas japoneses y estadounidenses han hecho una buena labor con los Contraventeos Restringidos al Pandeo, lo cual ha traído consigo sistemas de protección sísmica en edificaciones sustentables y eficientes. Los sistemas de control pasivo también se pueden clasificar en:

- Disipadores de energía
- Osciladores resonantes
- Cables de presfuerzo
- Aisladores de base

Siendo los disipadores de energía de tipo CRP los más trascendentales en este trabajo. Si el lector desea conocer más acerca de la clasificación y usos, se sugiera leer (Bonilla, 2012).

Los disipadores de energía son unos dispositivos que se emplean para modificar la rigidez de la estructura logrando que los períodos naturales de vibración del edificio sean muy diferentes de los períodos predominantes de la excitación sísmica, evitando la resonancia del edificio, a su vez buscan concentrar los daños en estos elementos, mediante las deformaciones de un elemento dúctil. Suelen colocarse en arreglos diagonales en los entrepisos de las edificaciones, su funcionamiento depende básicamente de los desplazamientos relativos de la estructura, también son conocidos como disipadores metálicos, ya que se basan en la fluencia del material dúctil, por lo regular es acero.

CAPÍTULO III

El daño que adquiere una edificación depende básicamente de la manera en que dispositivo absorba la energía. En la normativa actual resulta demasiado costoso absorber toda esta energía con la capacidad elástica de los materiales. Por eso mismo sugiere emplear la ductilidad de los elementos. Dicho lo anterior, los CRP son una gran opción para mejorar el desempeño de la estructura, ya que salvaguardan la vida y pueden colocarse para la prevención del colapso de una edificación. Se observa en la tabla 3.1. una simple comparación de los sistemas de control pasivo; aisladores de base, disipadores de energía; histeréticos y de efecto-masa.

Tabla 3. 1. Tabla de comparación de los sistemas pasivos de control estructural (Oviedo y Duque, 2009)

<i>Aportación</i>	<i>Sistemas pasivos de control estructural</i>		
	Aisladores de base	Disipadores de energía; Histeréticos	Efecto-Masa
Bajo costo de instalación		*	
Larga vida útil de los dispositivos	*	*	*
Bajos costo de mantenimiento de los dispositivos de control	*	*	*
Bajo costo de reemplazo		*	
Baja probabilidad de reemplazo postsismo	*		*
Bajo costo de fabricación del dispositivo		*	
Reducción del daño estructural por sismo	*	*	*
Simplicidad para el uso de rehabilitación o reforzamiento de estructuras existentes		*	
Simplicidad en la implementación de marcos	*	*	*
Simplicidad en la implementación de sistemas de muros de carga		*	*
No requiere mano de obra altamente calificada para la instalación		*	
Bajo impacto en las prácticas de construcción		*	
Fácil obtención de los materiales para su fabricación		*	

De acuerdo a la tabla anterior se ve que el dispositivo histeréticos tiene mayores ventajas sobre los otros. Por supuesto que, esto no significa que sea la mejor opción, ya que hay una serie de factores que se consideran para elegir un disipador de energía sísmica.

3.1. ANTECEDENTES

3.1.1. BREVE HISTORIA DE LOS CRPS

Un Contraviento Convencional (CC) o contraventeo relativo es un elemento bastante “popular” y empleado en las edificaciones. Se emplea para el control de las distorsiones laterales, usando principio de compatibilidad de deformaciones en los dos puntos nodales en la figura 3.5 se puede observar:

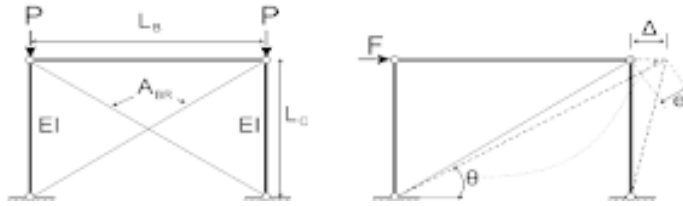


Figura.3. 5. Principio de compatibilidad de deformación en un marco (Ibáñez, 2012)

Suelen colocarse de nodo a nodo en un marco, su función primordial recae en la tensión, aunque pueden soportar carga a compresión (no muy recomendable), pero en sí, sirven para restringir los movimientos laterales y aportar una mayor rigidez a la cruzija. Ver la figura 3.6:

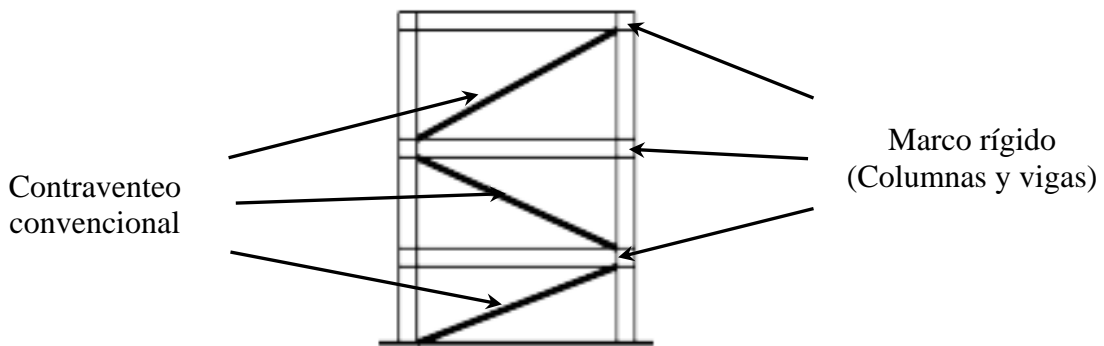


Figura.3. 6. Ejemplo de un contraventeo convencional 2D (Ibáñez, 2012)

En el diseño de un contraventeo se define por la capacidad de carga al pandeo (compresión), suelen tener diversos tipos de sección transversal, por ejemplo en la figura 3.7 se observa diferentes tipos de secciones:



Figura.3. 7. Tipo de secciones de los Contraventeos Convencionales (Gerdau Corsa, 2013)

Debido a que los CC presentan problemas de pandeo al momento de recibir una fuerza de compresión axial, se implementó una técnica para restringir el pandeo, no es su totalidad, ya que aumenta significativamente la capacidad de carga axial, porque al final de cuenta si el dispositivo llega a presentar una falla suele ser por pandeo local o fatiga del núcleo a tensión-compresión.

Un CRP es un elemento estructural que trabaja a compresión y tensión, sin exhibir problemas de pandeo que tendría un CC, así mismo otro problema que tiene los CC es que suelen fatigarse después de aplicarles ciclos sísmicos de carga reversible (tensión y compresión).

Su función es actuar como fusible estructural, en el que protegen al sistema gravitacional de la edificación, así como a sus elementos no estructurales y contenidos, contra daño excesivo.

Debido a lo anterior, la reparación del sistema estructural se reduce a reemplazar o sustituir los fusibles dañados, dando como resultados; ahorros importantes, y más aún la reparación en términos de tiempo y costo el de rehabilitación estructural, logrando así alargar la vida útil de las estructuras, razón por la que actúa de forma eficiente.

3.1.2. COMPONENTES DE UN CRP

Un CRP está integrado principalmente por:

- 1) Un núcleo de acero.
- 2) Material confinante que restringe el pandeo del núcleo.
- 3) Funda de acero que mantiene la integridad del material confinante.
- 4) Material desadherente que se coloca alrededor del núcleo de acero.

En la figura 3.8, se muestra algunas configuraciones:

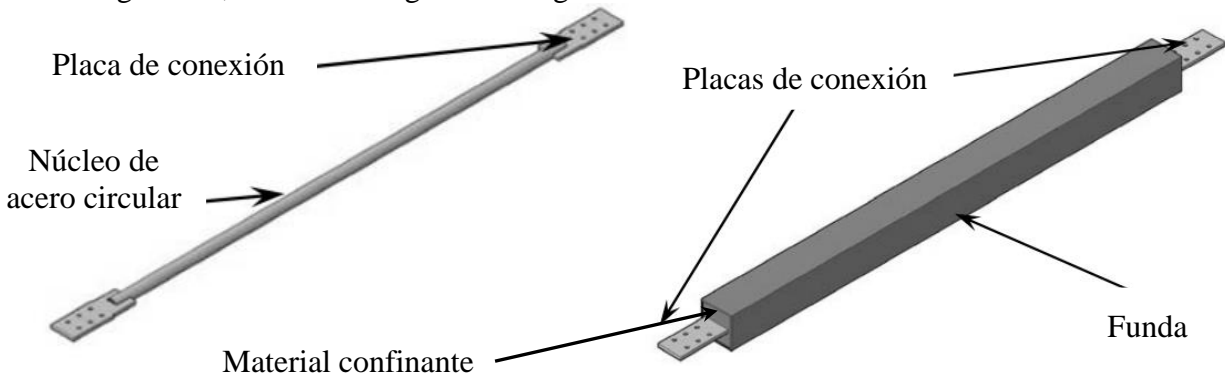


Figura.3. 8. Configuración de un CRP (Terán G. A., 2009)

En la figura 3.9 se observa otra configuración, donde el núcleo está propuesto por una placa plana:

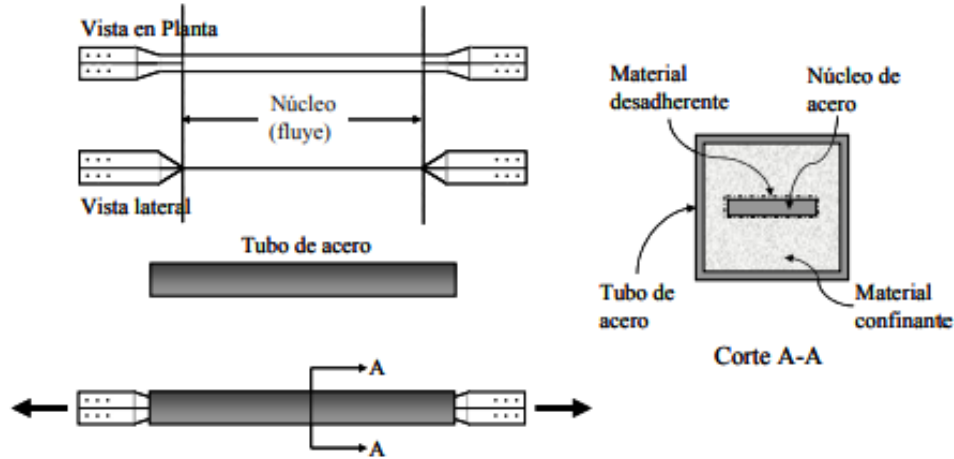


Figura.3. 9. Configuración de un contraventeo restringido al pandeo (Tremblay et al, 2006)

Se observa en la figura 3.9 se tiene materiales típicos que se emplean en la construcción, por lo cual es muy accesible para la comunidad mexicana. Más adelante se explicará cómo se obtienen la geometría y propiedades de dichos elementos, además que tienen ciertas particularidades en su diseño.

3.1.3. ESTUDIOS EXPERIMENTALES Y NUMÉRICOS

Una condición importante en un CRP es el ciclo histérico, el cual debe presentarse estable en las deformaciones inelásticas, lo cual está sustentado de diversas investigaciones (Terán G. A., 2009).

Guerrero (2017), propone un método para el diseño sísmico basado en el desempeño para estructuras de baja altura. Una de las principales ventajas del método es que emplea una evaluación rápida de la estructura, para determinar si necesita CRPs, lo que facilita la aplicación de la filosofía de diseño.

En cuanto a sus limitaciones, el método es válido para edificios regulares de baja altura con marcos rígidos con diafragmas en el plano, y cuya respuesta dinámica está dominada por su modo fundamental de vibración. El autor nos menciona que la idea es emplearlos como fusibles estructurales; es decir dispositivos que concentran el daño y son fáciles de reemplazar mientras la estructura principal permanece intacta. En si es una solución atractiva y económica.

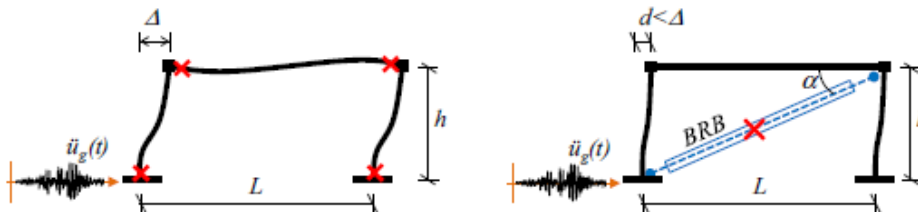


Figura.3. 10. Daños en los marcos convencional y reforzado con un CRP; marcados con X (Guerrero, 2017)

La mayoría de estos métodos se propusieron solo para marcos rígidos de concreto o acero, que están definidos como sistemas duales; donde la resistencia lateral solo es

proporcionada por uno o varios CRPs mientras que la contribución del marco se desprecia, sin embargo, la contribución de la estructura principal puede representar una significativa cantidad de capacidad mayor y se debe tener en cuenta al diseñar.

Algunos parámetros claves, como la ductilidad de desplazamiento máximo, la relación de rigidez y relación de fuerza fueron seleccionados arbitrariamente; lo que llevó a un control limitado del proceso de diseño. Se propuso un método basado en el desplazamiento; se consideró la contribución de los CRPs y la capacidad de la estructura principal.

Por lo tanto, la capacidad de un sistema dual (Marco Rígido de Concreto + CRPs), en la figura 3.11 se observa como la capacidad para el cortante basal aumenta a causa de los CRPs:

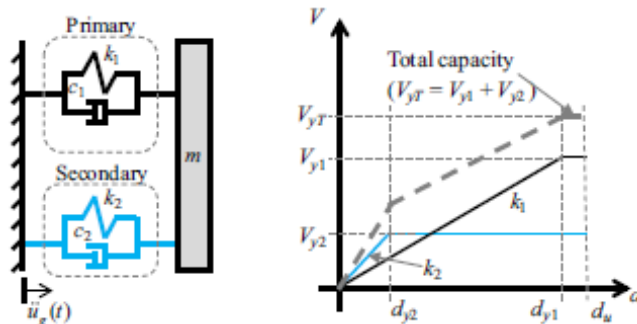


Figura.3. 11. Curva de capacidad de una estructura dual (Guerrero, 2017)

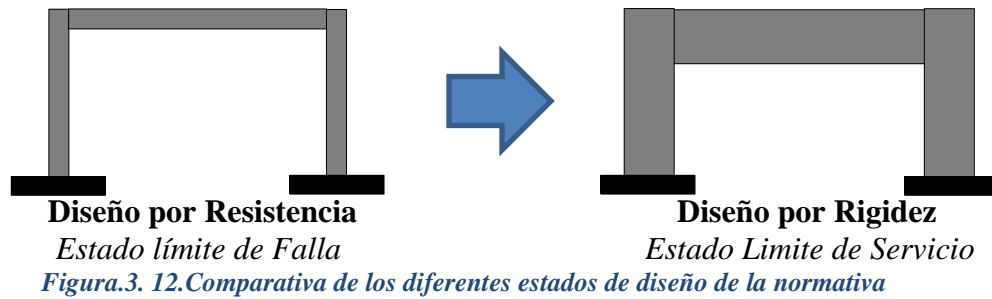
3.1.4. VENTAJAS PRINCIPALES

Los CRPs fueron propuestos hace más de tres décadas en Japón. De acuerdo con (Arroyo, 2009) el uso de sistemas disipadores de energía ha sido ampliamente estudiado en países que como Japón y los EE.UU lideran a nivel mundial la ingeniería sísmica. En Japón el 70% de los edificios con alturas de 60 metros o mayores poseen algún tipo de dispositivo de control de la respuesta sísmica. En Taiwán, Canadá y EE.UU. también ha habido desarrollos experimentales de importancia y se han construido decenas de edificios que utilizan este tipo de dispositivos, si el lector desea conocer más acerca del tema sugiere leer (Wada, 2003).

Después del agua, el concreto es el material más usado del planeta. Es por eso que se busca una alternativa sustentable para disminuir el uso del mismo y a su vez optimizar las edificaciones. Cabe mencionar que el acero tiene una gran huella ecológica por lo que se sugiere emplear la máxima capacidad que los elementos tienen en ductilidad.

La ingeniería estructural se dio cuenta la importancia del diseño estructural para prevenir daños a las edificaciones y pérdidas humanas por causa de eventos sísmicos. Por medio del entendimiento y análisis, la comunidad internacional de ingeniería sísmica ha logrado comprender la importancia de las estructuras sismoresistentes, empleando los principios básicos de la deformación y movimiento. Según (Espinoza, Diciembre 2009) la aplicación de metodologías de diseño que consideren explícitamente las demanda acumuladas de deformación plástica ha dado lugar a estructuras muy robustas con un alto contenido de acero de refuerzo, lo que los hace muchas veces costosas y sobradas. En la actualidad nuestro reglamento está

diseñado para prevenir este tipo problemas, pero el hecho de emplearlo como medio de diseño, implica aceptar que nuestra estructura va tener daños ante un evento sísmico. Se puede emplear la siguiente analogía, ver figura 3.12:



En la figura anterior podemos observar que cuando se diseña por el estado límite de falla nuestras estructuras pueden ser pequeñas y esbeltas, esto quiere decir que soportan las cargas gravitacionales, pero al momento de que una persona decida estar arriba de dicha estructura, seguramente experimentará vibraciones, por lo cual causa temor y desconfianza. Por otro lado, la otra estructura se ve más segura y confiable, pero el costo y el material suelen marca una gran diferencia, y evidentemente no es accesible para todos.

Dicho lo anterior, resulta efectivo el diseño de elementos y estructuras que permitan la disipación de energía sísmica, ya que plantean optimización de recursos (diminución de tamaño en los elementos estructurales) y confiabilidad en la estructura (sistema de protección sísmica). La propuesta de este proyecto se observa en la figura 3.13:

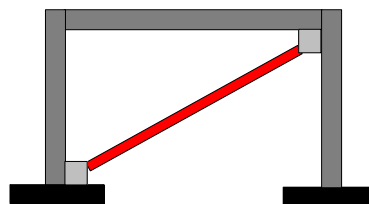


Figura.3. 13.Marco Rígido de Concreto con un CRP

Los CRPs trabajan mejor que los CC, ya que disipan más energía sísmica, esto se logra observar por medio de un diagrama de histéresis o curva de histéresis. Una curva de histéresis es una representación en dos dimensiones; las ordenadas se tiene la fuerza (Tensión-Compresión), mientras que en las abscisas se tienen los desplazamientos, dicha curva nos muestra un comportamiento de diversos ciclos de tensión y compresión en donde el área bajo la curva representa la energía sísmica disipada por el dispositivo. Ver figura 3.15:

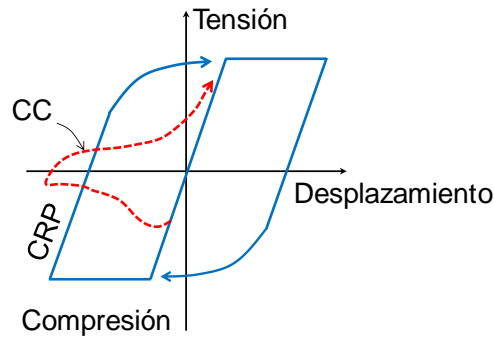


Figura.3. 14.Ciclo de histéresis CC vs CRP (Cortesía de Guerrero.)

Cabe mencionar que sus principales ventajas de un CRP son:

- Soportan grandes ciclos de tensión y compresión
- Protegen a la estructura primaria
- Disipan mayor energía sísmica que un CC
- Después de un sismo, difícilmente tendrán que remplazarse
- Aportan rigidez a la ecuación de movimiento, cambiando el periodo de l estructura.

3.2.RESILIENCIA SÍSMICA

En la ingeniería estructural, se sabe que existe incertidumbre al momento de realizar cálculos o estimaciones, por lo que se suele emplear factores de seguridad para mitigar esta incertidumbre y garantizar la seguridad. En los reglamentos y las normativas se emplea los conceptos de estado de falla y estado de servicio, para satisfacer las demandas solicitadas o estar por lo menos arriba de las demandas.

Al hacer un análisis de seguridad estructural basada en la probabilidad de falla y la necesidad de tomar como variables aleatorias (riesgos), tanto las cargas actuantes como los parámetros de resistencia genera desconfianza, a pesar de los estudios y leyes empleadas, se sigue teniendo incertidumbre.

Por lo anterior se dice que la resiliencia es una respuesta o una acción de mejora continua, que surge desde las amenazas ante alguna catástrofe, incluyendo los peligros que estos mismos conllevan. En la actualidad hay grupos vulnerables o naciones que están condenados a sufrir este tipo de acciones o problemas. ¿Qué se entiende por resiliencia en la ingeniería estructural?

Existen otras definiciones:

Según la (NIAC, 2009) “*La capacidad de reducir la magnitud y duración de los efectos causados por fenómenos perturbadores*”

Es un término familiar para los ingenieros, debido a que se sigue mejorando las técnicas y conocimientos que se van adquiriendo a lo largo del tiempo; como la resistencia, confiabilidad, redundancia y respuesta y recuperación en una estructura.

Los fenómenos perturbadores se refieren a la parte de sismos, explosiones, deslaves, etc. Se debe hacer hincapié que la resiliencia se ha convertido en una forma estratégica empirista en la cual se manejan los negocios y sobre todo juegan un rol operacional de suma importancia.

Los componentes de la resiliencia en un sistema estructural o proyecto, va estar determinado como lo muestra la figura 3.15:

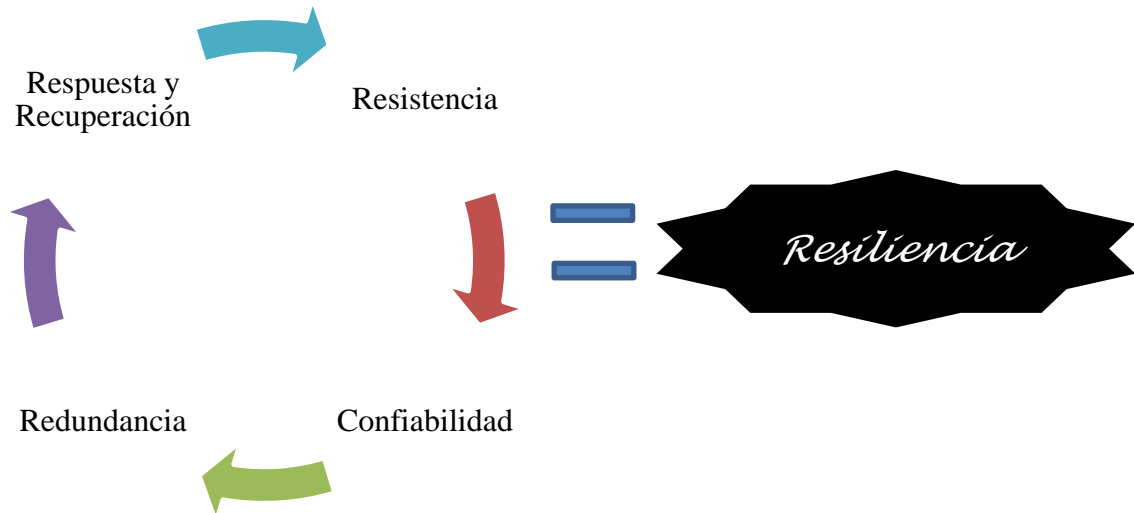


Figura.3. 15.Ciclo de flujo de la resiliencia

Cuando se presenta un evento extraordinario o perturbador, en los que excede los parámetros de diseño que se pensaron, existe la posibilidad de una pérdida total. A pesar de que se tenga un seguro que pague por todos los daños, no resulta factible el volver a construir con la misma filosofía, ya que se estoimosá empleando nuevos recursos, y si el seguro lo cubre es evidente que dichos recursos no salen de nuestra bolsa, pero al final, si impacten tanto con el ambiente con tan solo el hecho de volver a construir, por eso resulta mejor apostar por un sistema de protección especializado.

Las siguientes definiciones que componen la resiliencia estructural son:

- ✓ **Resistencia:** Capacidad de tolerar o soportar las cargas gravitacionales o accidentales.
- ✓ **Confiabilidad:** Componente de la obra que permite mitigar los daños o pérdidas que puede tener un sistema estructural y a pesar del siniestro permita su operación.
- ✓ **Redundancia:** Se refiere a la capacidad adicional para soportar un evento perturbador sin colapsar. En otras palabras, es la defensa que evita la falla catastrófica.
- ✓ **Respuesta y recuperación:** Es un componente de la obra que permite mitigar los daños o pérdidas que puede tener un sistema estructural, con la capacidad de remplazarse de manera efectiva y simple en el menor tiempo posible.

Dentro del análisis estructural, los ingenieros y arquitectos analizan los edificios u obras para que cumplan con la normativa, ya que está normativa tienen un cierto grado de confiabilidad y es un respaldo ante cualquier situación legal. Básicamente el rol de ingeniero con lleva mucha responsabilidad y compromiso por parte de él.

Prevenir y mitigar el daño a infraestructura causado por fenómenos naturales de grandes magnitudes; como huracanes, terremotos o tsunamis, es una disposición esencial para cualquier gobierno debido a que las pérdidas económicas y humanas pueden ser catastróficas al no dar la importancia necesaria al tema. Como parte de las medidas que se toman para cumplir con este objetivo, los reglamentos de construcción han sufrido cambios significativos en las últimas décadas gracias al estudio del comportamiento de diversos tipos de estructuras ante demandas características de los mencionados fenómenos.

Muchas de las mejoras a las disposiciones contenidas en los reglamentos son una consecuencia de investigaciones experimentales, ya que los modelos numéricos ante condiciones de no linealidad, comportamientos no elástico y condiciones de frontera realistas se tornan sumamente complicados y, en muchas ocasiones, poco confiables. Por ello, existe una gran importancia de desarrollar y mejorar métodos de análisis calibrados con pruebas de laboratorio. Esto con la finalidad de diseñar, planear y construir estructuras más seguras para sus ocupantes.

A su vez dicho reglamento o la normativa (GCMX, 2017) nos habla de las derivas de entrepiso o distorsiones de entrepiso, donde se tiene que identificar inicialmente el sistema estructural, luego se plantea hacer un análisis para ver que tanto se desplaza el edificio de acuerdo a su geometría y rigidez. Una vez que se tienen esa rigidez se plantea la diferencia entre los desplazamientos que tienen un nivel, multiplicándose por la sobrerresistencia y el factor de comportamiento sísmico, dicha distorsión debe satisfacer un límite en la normativa.

De esta manera se queda respaldado de forma legal y se garantiza que nuestro edificio cumpla con los requerimientos necesarios según la normativa. Por supuesto que esto se concentra en una memoria de cálculo y es un documento legal ante cualquier situación que afecte a terceros. Pero a pesar de que se cuenta con un reglamento y normativa, se sigue teniendo problemas en la construcción y diseño de las edificaciones, recurriendo a proyectos económicos baratos.

Ante tal negligencia, varias edificaciones se consideran vulnerables ante eventos sísmicos y en el presente trabajo se proponen algunos unos ejemplos de construcción vertical, donde la vivienda cuenta con plantas flexibles en las diversas zonas de la Ciudad de México; asimismo las edificaciones estarán construidas a base de marcos rígidos de concreto, los cuales estarán equipados con dispositivos de disipación de energía sísmica del tipo Contraventeo Restringidos al Pandeo (CRP). Dentro del trabajo se busca una construcción eficiente y especialmente con resiliencia.

Cabe mencionar que en muchas ocasiones los edificios cumplen con el reglamento (distorsiones), pero eso no lo exime de pérdidas considerables, y que a su vez genera pérdidas económicas estructurales, por lo que se propone una medida de mitigación y protección de la estructura, siendo esto un método asequible para ciertos edificios, donde se logra prevenir colapsos y evitar reconstrucción de los mismos, generando un método efectivo para la prevención de desastres.

En regiones con peligro sísmico moderado y alto, se requiere el uso de sistemas estructurales que no sólo minimicen el daño estructural, sino que permita a la estructura ser reparada con el mínimo uso de materiales adicionales y, preferentemente, puedan ser remplazados los CRPs. Por lo tanto, México aún no ha comprendido del todo que tiene una necesidad de emplear sistemas de protección sísmica.

CAPÍTULO IV
PROPUESTA DE
METODOLOGÍA DE DISEÑO

La metodología de diseño está basada en las investigaciones anteriores; (Teran, 2009) y (R. Tremblay, 2006), entre muchas otras investigaciones que se tienen a la fecha, especialmente de (Guerrero, 2016), donde se aplica una serie de pasos algebraicos para llegar a ecuaciones simples y contundentes que nos permiten diseñar fácilmente los CRPs.

La metodología consiste en encontrar un factor de rigidez (f_k), que transforma el área de un contraventeo convencional (CC) a un contraventeo restringido al pandeo (CRP). Una vez que se tiene el área del CRP se determinan sus propiedades y geometrías del mismo. Es un proceso iterativo en el que se puede plantear muchos arreglos, por lo que es decisión del estructurista o diseñador elegir la opción más conveniente. Una vez que se tienen los detalles del CRP, restaría emplear los planos y geometrías para su fabricación e instalación.

4.1. MÉTODO PROPUESTO

A continuación, se muestra en la figura 4.1 un diagrama de flujo en el que se presentan los pasos de la metodología:

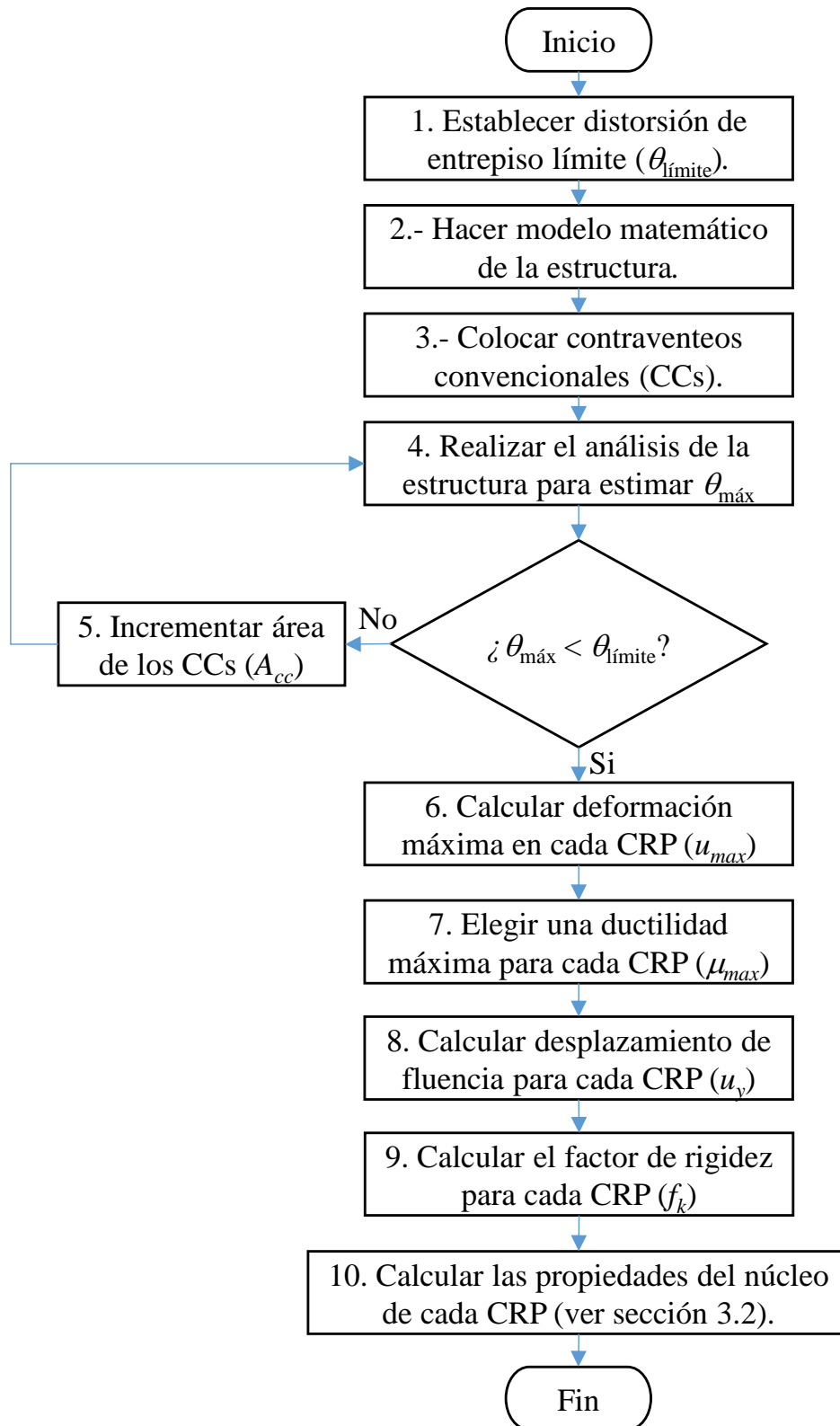


Figura.4. 1. Algoritmo para el diseño del CRP.

Partiendo del algoritmo de la figura 4.1, la metodología se desglosa más a detalle a continuación;

- 1) Seleccionar la distorsión máxima permisible que tiene la estructura de acuerdo a su sistema estructural ($\theta_{m\acute{a}x}$). Esto se hace con base en la normativa del RCDF en su versión 2017, en la sección de diseño sísmico, en el capítulo 4 “Factores de comportamiento sísmico y distorsiones permisibles”, hay una serie de tablas en la que se encuentran las distorsiones permisibles dependiendo el sistema estructural.
- 2) Por medio de algún programa de análisis estructural se modela la edificación.
- 3) Colocar Contraventeos Convencionales (CCs) en el modelo. Si se colocan dos o más CCs en un mismo nivel se recomienda conservar la simetría en la estructura para evitar problemas de torsión, como se puede ver el ejemplo de la figura 4.2.

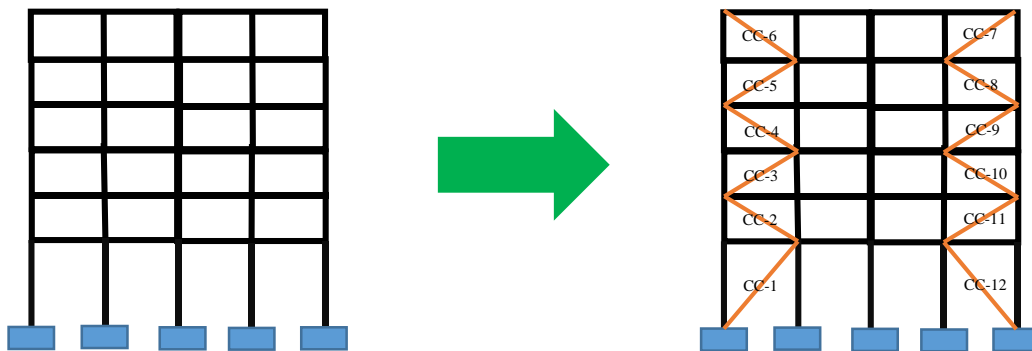


Figura.4. 2.Ejemplo de arreglos (simétricos) de CC en un modelo.

- 4) Ejecutar el programa de análisis empleado. Se debe verificar que las distorsiones de entrepiso o distorsiones del edificio ($\theta_{m\acute{a}x}$) sean menores a las distorsiones permitidas por la normativa o las distorsiones buscadas.

$$\theta_{\max} \leq \theta_{\text{limite}} \quad \text{ec. 4. 1}$$

- En caso de cumplir la desigualdad de ante mencionada pasar al paso 6.
 - En caso de no cumplir con la desigualdad anterior, pasar al paso 5.
- 5) El diseñador debe aumentar el área requerida del o los Contraventeos Convencionales (A_{cc}) o colocar más CCs en las diversas crujías, en la figura 4.3. se colocó CC con mayor área. Dicho lo anterior, se procede a realizar el paso 4, verificando que se cumpla la desigualdad de la ec. 4.1.

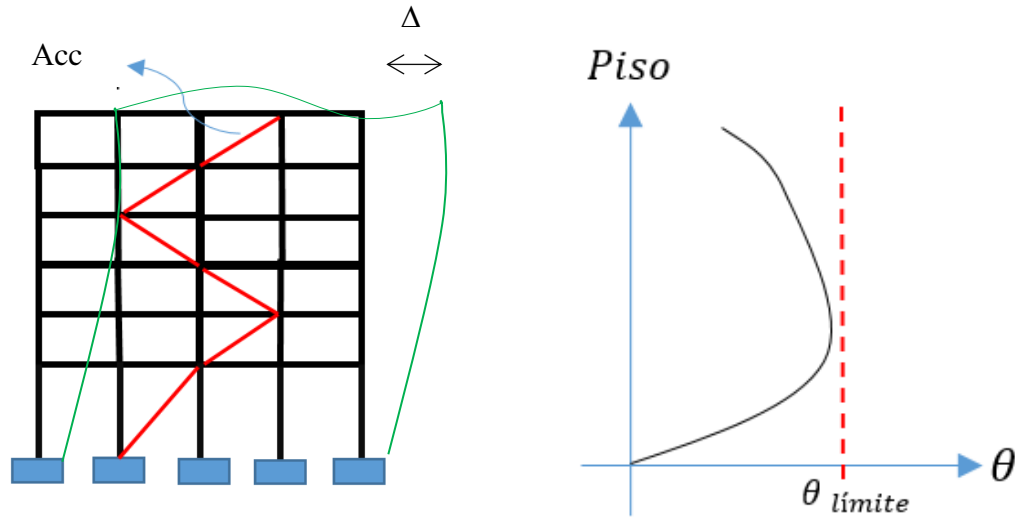


Figura.4. 3.Desplazamiento de un edificio a 2D y la historia de distorsiones de entrepiso.

Es importante recordar que los desplazamientos del edificio están vinculados con las distorsiones de entrepiso, se observa la relación que tienen por medio de la siguiente ecuación:

$$\Delta_{\max} = \theta_{\max} \cdot h_i \quad \text{ec. 4. 2}$$

Donde:

- Δ_{\max} : desplazamiento relativo de entrepisos
- θ_{\max} : distorsión de entrepiso máximo permitido
- h_i : altura de entrepiso de cada nivel

- 6) Una vez que se obtuvo el área de los contraventeos convencionales, A_{cc} , se procede a calcular la deformación axial máxima de cada uno de los CCs. Basándonos en la ecuación (empleando el desplazamiento de la estructura), se puede proceder a calcular la u_{\max} . (ver la ec. 4.3)

$$u_{\max} = \Delta_{\max} \cdot \cos(\alpha) \quad \text{ec. 4. 3}$$

Donde:

- u_{\max} : deformación axial máxima del CC
- Δ_{\max} : desplazamiento relativo de entrepisos
- α : ángulo de la crujía donde se colocará el CC

- 7) Elegir una ductilidad máxima (μ_{\max}) para cada CRP, se recomienda que se tomen valores del 5 al 7.

- 8) Calcular el desplazamiento de fluencia para cada CRP, el cual se obtiene de la siguiente expresión: verificar tamaño de letra en ecuaciones

$$u_y = \frac{u_{\max}}{\mu_{\max}} \quad \text{ec. 4. 4}$$

Donde:

- u_y : deformación de fluencia del CRP
- u_{max} : deformación axial máxima del CC
- $\mu_{máx}$: ductilidad del núcleo del CRP

9) Obtener el factor de rigidez (f_k) para cada CRP, con la siguiente ecuación:

$$f_k = \frac{f_{ye}}{E} \cdot \frac{L_w}{u_y} \quad \text{ec. 4.5}$$

$$f_{ye} \approx 1.1 f_y \quad \text{ec. 4.6}$$

Donde:

- f_{ye} : resistencia esperada del acero
- L_w : longitud total del CRP (de nodo a nodo)
- E : módulo de elasticidad del acero
- u_y : deformación de fluencia del CRP
- f_y : fluencia del acero

Cabe mencionar que la ec. 4.6 es empleada cuando el fabricante no nos proporciona la fluencia esperada del material. En caso de que se tenga la certeza de fluencia ya no será necesario multiplicar por el factor 1.1.

10) Al final solo se deben calcular las propiedades del núcleo de cada CRP, que se verá en la siguiente sección.

4.2. CÁLCULO DE LA GEOMETRÍA DEL NÚCLEO

Las propiedades del núcleo se pueden obtener por medio del siguiente diagrama de flujo (ver figura 4.4)

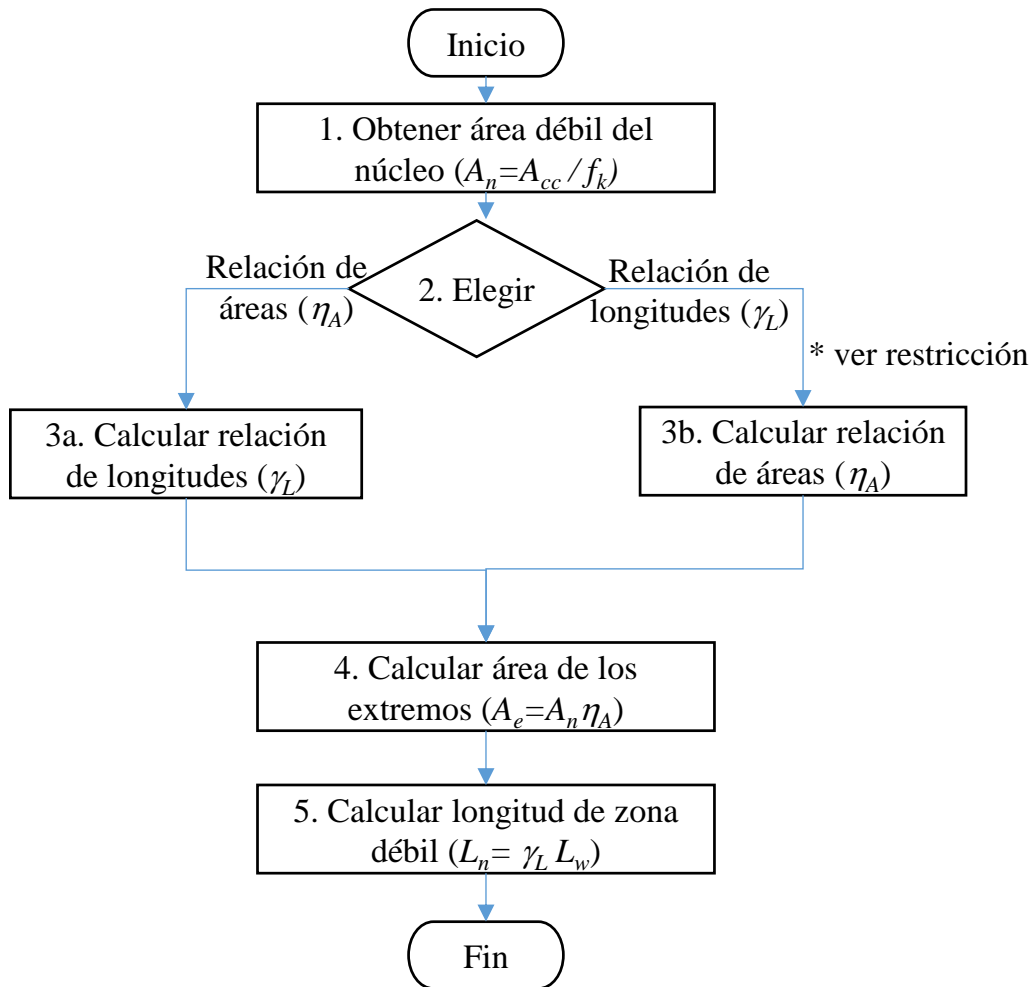


Figura.4. 4. Algoritmo para las propiedades del núcleo

1) Calcular el área débil del núcleo del CPR, por medio de la siguiente expresión:

$$A_n = \frac{A_{cc}}{f_k} \quad \text{ec. 4. 7}$$

Donde:

- A_n : área del núcleo del CPR
- A_{cc} : área transversal del CC
- f_k : factor de rigidez obtenido de las propiedades del CPR

2) Elegir una de las dos relaciones de diseño para cada CPR; relación de longitudes (γ_L) o relación de áreas (η_A).

3.a) Cuando se elige un valor en la relación de áreas (η_A), se debe calcular el valor de la relación de longitudes (γ_L), donde se debe emplear la siguiente expresión:

$$\gamma_L = \frac{\eta_A}{f_k(\eta_A - 1) + 1} \quad \text{ec. 4. 8}$$

Donde:

- γ_L : relación de longitudes (longitud del núcleo-longitud total del CRP)
- η_A : relación de áreas (área del núcleo con el área de un extremo del CRP)
- f_k : factor de rigidez obtenido de las propiedades del CRP

Nota: Se recomienda usar los siguientes valores de (η_A): 1.5 a 3

3.b) Cuando se elige un valor en la relación de longitudes (γ_L), se debe calcular el valor de la relación de áreas (η_A), donde se debe emplear la siguiente expresión:

$$\eta_A = 1 - \frac{\gamma_L - 1}{f_k \gamma_L - 1}; \quad \text{solo sí } \gamma_L > \frac{1}{f_k} \quad \text{ec. 4.9}$$

Para emplear esta expresión se debe tener presente que hay una restricción con la siguiente desigualdad, si empleamos una relación de longitudes mejor a lo planteado matemáticamente obtendremos áreas negativas y físicamente eso no es posible:

$$\gamma_L = \frac{L_n}{L_w} \quad ; \quad \gamma_L > \frac{1}{f_k} \quad \text{ec. 4.10}$$

A continuación, se muestra el motivo por el cual está limitada la ec. 4.10, todo surge de los siguientes planteamientos:

- Imaginemos que nuestra sección en un lado fuera muy grande o tendiera al infinito o tuviera un área muy grande, por consiguiente, el área del núcleo tendería a “cero” (valores muy pequeños), lo cual físicamente no es posible.

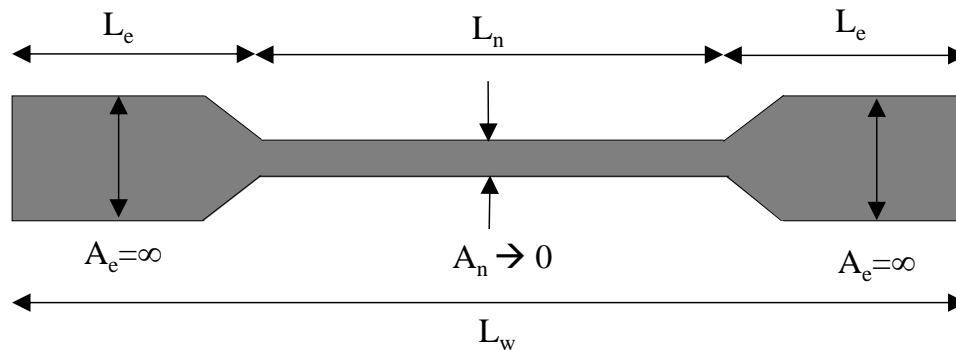


Figura.4.5. Dimensiones del núcleo del CRP.

Se mencionó que la restricción física está dada por la construcción del elemento del núcleo. Por otro lado, se observa que siempre nuestro CRP va a tener una restricción matemática por la ec. 4.8. Por ejemplo, si se tiene un $f_k=2$, en la gráfica 4.6 se tiene el límite del valor de las relaciones de longitudes

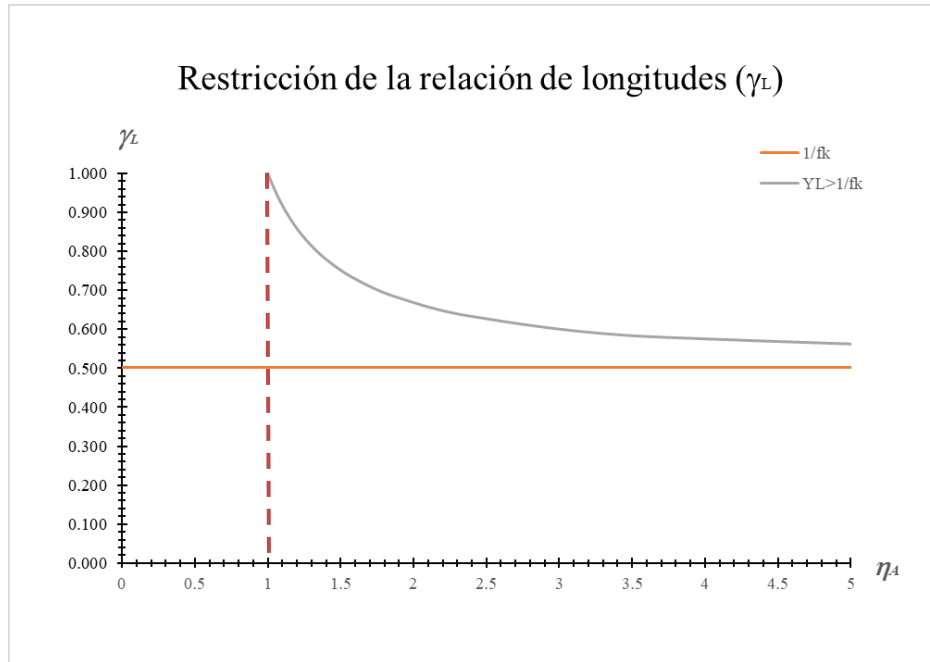


Figura.4. 6. Ejemplo de la restricción del γ_L .

Se puede observar que en la figura 4.6 que la línea roja representa cuando el $A_e=A_n$, y por lo tanto el área del extremo con el área del núcleo son iguales, esto no se recomienda, ya que se usa más material. Mientras que la curva naranja tendría a converger al f_k .

Nota: Se recomienda usar (γ_L) entre los siguientes valores: 1/4 a 2/3.

4) Para obtener el Área en los extremos del dispositivo, usar la siguiente ecuación:

$$A_e = A_n \cdot \eta_A \quad \text{ec. 4. 11}$$

Donde:

- A_n : área del núcleo del CRP
- A_e : área transversal del extremo del CRP
- η_A : relación de áreas (área del núcleo con el área de un extremo del CRP)

5) Al final se calcula la longitud de la zona débil con la expresión:

$$L_n = \gamma_L \cdot L_W \quad \text{ec. 4. 12}$$

Donde: cursivas

- L_n : longitud total del área del núcleo del CRP
- γ_L : relación de longitudes (longitud del núcleo-longitud total del CRP)
- L_W : longitud total del CRP (de nodo a nodo)

Se recomienda ver la Figura.4. 7. Dimensiones del CRP, para tener una mejor referencia de las partes que se están calculando y eligiendo en el dispositivo.

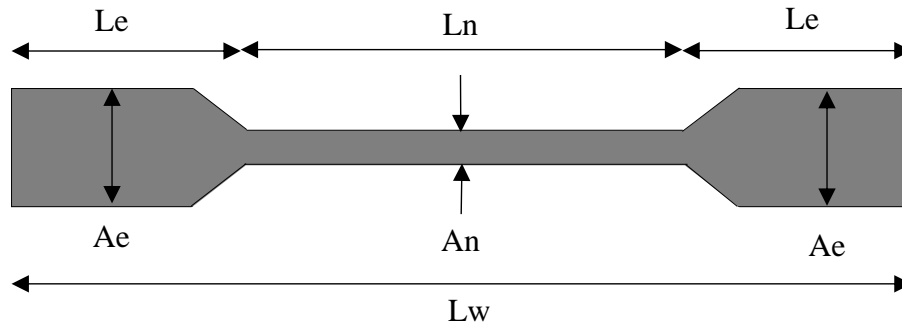


Figura.4. 7. Dimensiones del CRP

4.3. RIGIDEZ Y RESISTENCIA DEL CRP

Una vez que se tiene el diseño del CRP, restaría calcular su rigidez, y su capacidad a compresión máxima, con las siguientes ecuaciones:

$$K_{CRP} = f_k \cdot \frac{A_n \cdot E}{L_w} \quad \text{ec. 4. 13}$$

$$P_{ye} = f_{ye} \cdot A_n \quad \text{ec. 4. 14}$$

Donde:

- f_k : factor de rigidez obtenido de las propiedades del CRP
- A_n : área del núcleo del CRP
- f_{ye} : resistencia esperada del acero
- L_w : longitud total del CRP (de nodo a nodo)
- E : módulo de elasticidad del acero
- P_{ye} : resistencia a compresión axial máxima del núcleo del CRP
- K_{CRP} : rigidez del CRP

4.4. TAMAÑO DE FUNDA

Primero se debe calcular la resistencia máxima a compresión que va tener el CRP, empleando la ecuación de carga crítica de pandeo:

$$P_{crit} = \pi^2 \frac{EI_{min}}{L_w^2} \quad \text{ec. 4. 15}$$

Donde:

- L_w : longitud total del CRP (de nodo a nodo)
- E : módulo de elasticidad del acero
- P_{crit} : resistencia a compresión axial máxima del CRP
- I_{min} : Inercia mínima de una sección HSS o OR

Selecciona un factor de seguridad, se recomienda que sea mayor a 2.

Cuando se iguala la ecuación de pandeo crítico (ec. 4.15) con la fuerza de la carga axial que tienen el dispositivo, se puede despejar el momento de inercia. Es importante destacar que aquí se le agrega el factor de seguridad, lo recomendado es de 2, pero nunca ese $f_s < 1$

$$P_{crit} = P_{ye} \quad \text{Si: } f_s \approx 2$$

$$I_{min} = \frac{P_{crit} \cdot L_w^2}{E \pi^2} \cdot f_s \quad ; \quad I_{min} = \frac{2P_{ye} L_w^2}{E \pi^2} \quad \text{ec. 4.16}$$

Se debe elegir la funda o encamisado, la cual tiene que tener el menor momento de inercia (ver la tabla IMCA) y a su vez buscar el PTR más ligero (ver disponibilidad y fabricantes).

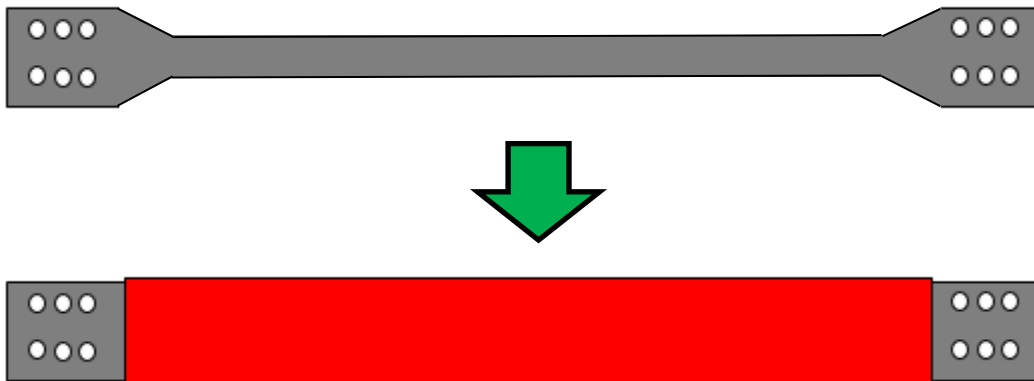


Figura.4. 8. Encamisado del CRP (Vista longitudinal)

CAPÍTULO V
APLICACIÓN DE LA
METODOLOGÍA

En éste capítulo se presentan algunos ejemplos sencillos, aplicando la metodología propuesta. Se empleará el programa SAP2000 (2011), para realizar el análisis de la estructura. Cabe mencionar que no entraremos a detalle en los acabados, fachadas, ni en los armados de los elementos; debido a que el objetivo de este capítulo se muestra el funcionamiento de la metodología. Se desea construir una edificación para uso casa-habitación, tipo departamentos, ubicados en:

- a) Periférico Sur 3335, Magdalena Contreras, CDMX (Zona I)
- b) Av. Emperadores 118, Benito Juárez, 03300 Ciudad de México, CDMX (Zona II)
- c) Calle Héroes 179, Cuauhtémoc, 06300 Ciudad de México, CDMX (Zona III)

Se presentan tres ejemplos en cada zona, es decir: un edificio de cinco niveles, un edificio de 10 niveles y un edificio de 15 niveles. Las edificaciones son del grupo B, con un factor de comportamiento $Q=3$, con una ductilidad media. Debido a que se plantea hacer una geometría rectangular, el factor de irregularidad tiene un valor 1.0. El factor de hiperestaticidad tendrán un valor de $k_1=0.8$. Los espectros correspondientes se muestran en la figura 5.1.

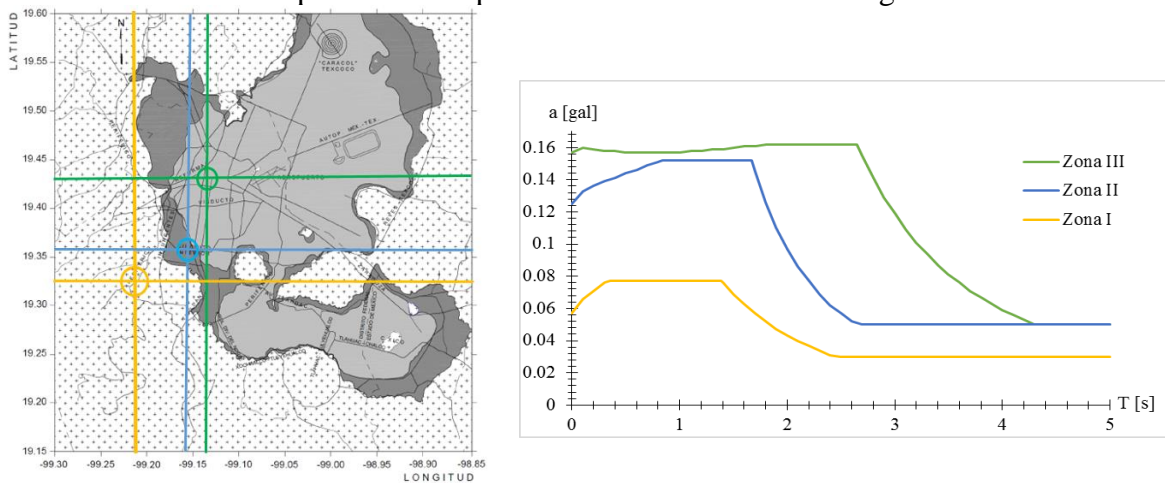


Figura 5. 1. Ubicación de las edificaciones y espectros de diseño (NTC-DS,2017-SASID)

Las cargas empleadas se obtuvieron de acuerdo a la Tabla 6.1.1 de las normas (GCDMX, 2017). Las consideraciones en las losas de entrepiso son: $CM=350 \text{ kg/m}^2$ y $CV=100 \text{ kg/m}^2$, mientras que la carga en la azotea es de; $CM=264 \text{ kg/m}^2$ y $CV=70 \text{ kg/m}^2$. Para el modelo se empleó un concreto de $f'c=350 \text{ kg/cm}^2$ ($E=261916 \text{ kg/cm}^2$). La losa de los modelos fue de 12 cm. La altura del entrepiso de los modelos es de 3 m. Mientras que las demás geometrías se especifican en la tabla 5.1:

Tabla 5. 1. Geometrías de las estructuras estudiadas

Clave	5EZ1	10EZ1	15EZ1	5EZ2	10EZ2	15EZ2	5EZ3	10EZ3	15EZ3
Unidades	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
Trabes Primarias	60x30	60x30	80x40	65x30	80x45	90x45	65x30	65x30	80x35
Trabes Secundarias	50x25	50x20	50x25	50x25	50x25	60x30	50x25	50x25	50x25
Columnas	50x50	80x80	100x100	85x70	120x100	150x100	90x80	140x100	120x110

5.1. EDIFICIOS UBICADOS EN LA ZONA I

5.1.1. EJEMPLO 1. EDIFICIO DE 5 NIVELES (Z-I-5)

Empleando el programa de análisis SAP2000 (SAP2000, 2011), donde se modelo el edificio de 5 niveles, con las geometrías y propiedades antes mencionadas, en las siguientes imágenes se muestra el modelado:

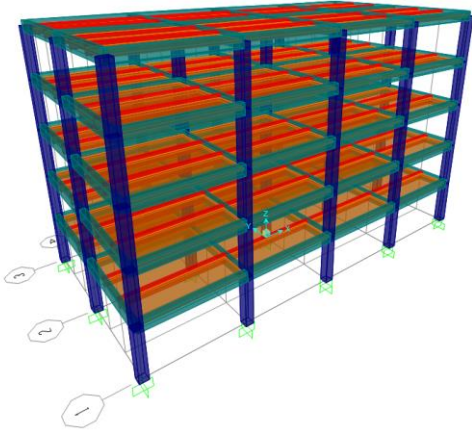


Figura 5. 2. Modelo en SAP2000 (Vista 3-D)

Tabla 5. 2. Resultados del espectro de sitio (SASID)

Resultados del SASID	
T_s	0.49
a_0	0.119
c	0.326
T_a	0.35
T_b	1.383
k	1.5
a_{max}	0.077

Ahora se aplica el análisis estático, (ver NTC-DS):

Tabla 5. 3. Análisis estático en direcciones “x” y “y”

Análisis Estático; dirección X y Y					
Niveles	Altura	Peso	Peso*altura	Fuerza	Cortante
	h_i	W_i	$W_i h_i$	F_i	V_i
	m	ton	m-ton	ton	ton
5	15	291	4379	58.73	58.73
4	12	325	3904	52.36	111.08
3	9	325	2928	39.27	150.35
2	6	325	1952	26.18	176.53
1	3	325	976	13.09	189.62
	Total	1593	14140		

Las distorsiones de entrepiso, los cuales se obtienen de la siguiente ecuación:

$$\theta_i = \frac{\delta_{i-1} - \delta_i}{h} (QR)$$

Ec. 5. 1

Donde:

- h : altura de entrepiso [cm]
- δ_{i-1} : Desplazamiento anterior en [cm]
- δ_i : Desplazamiento actual en [cm]
- Q : factor de comportamiento sísmico
- R : factor de sobre-resistencia

En la figura siguiente se muestran los perfiles de distorsiones, donde se observa que la estructura cumple con la normativa, pero eso no lo exime de que tenga daños cuando ocurra un sismo, ya que las distorsiones están arriba del 1% (si está por debajo del 1% quiere decir que se encuentra en el intervalo lineal).

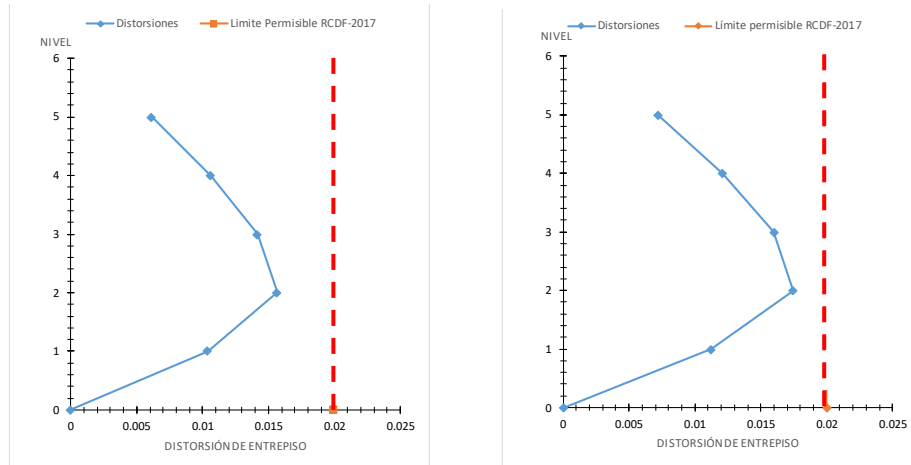


Figura 5. 3. Distorsiones de entrepiso dirección “X” y “Y” del edificio de 5 niveles

Se desea que la estructura permanezca en un intervalo lineal, se aplica la metodología para reducir las distorsiones y concentrar los daños en los CRPs. Al aplicar la metodología como se mostró en el capítulo anterior:

- 1) Lo primero es realizar un análisis estructural, como el anterior, pero ahora con el $Q=4$, debido a que nos da los mismos valores en las fuerzas horizontales se omite colocar resultados. Luego se tienen que elegir una distorsión límite:

$$\theta_{\max} \leq 0.01 \quad \text{ec. 4.1.}$$

- 2) Colocar el arreglo de CC en el modelo, hasta que las distorsiones sean menores al 1%, en este caso se hizo el siguiente arreglo, con los perfiles señalados, cabe mencionar que se conservó el arreglo en forma simétrica para evitar torsión del edificio (ver figura 5.11), así mismo se observa que la distorsión quedó cerca o por debajo del 1% en ambas direcciones:

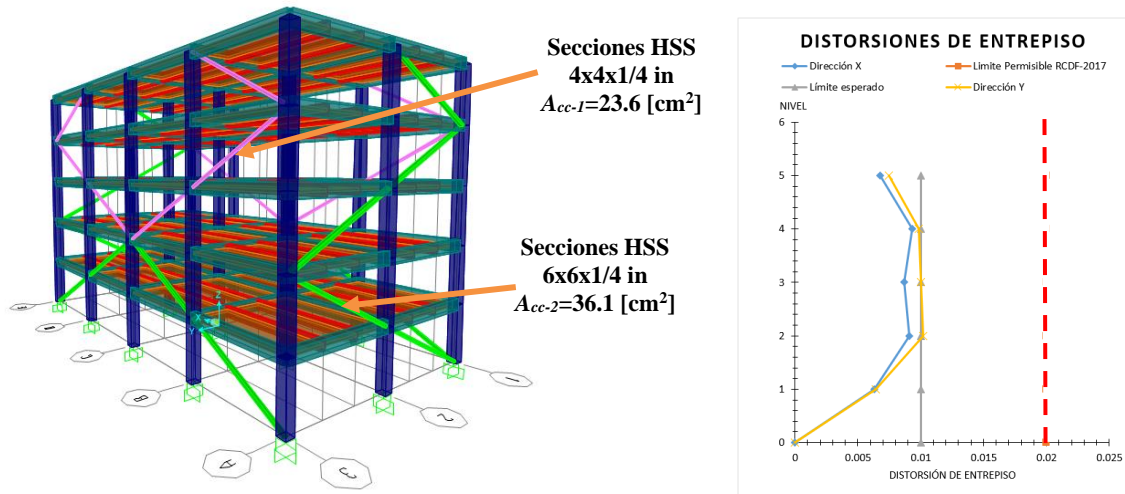


Figura 5. 4. Arreglos de CC para el modelo de cinco niveles y sus distorsiones correspondientes

- 3) Una vez que se tiene la distorsión del entrepiso 0.01, se puede obtener el desplazamiento del dispositivo:

$$\Delta_{m\acute{a}x} = 0.01(300cm) = 3cm \quad ec. 4.2.$$

- 4) Se procede a calcular la deformación axial máxima de cada uno de los CC.

$$u_{max-cc1-cc2} = (3cm)[\cos(26.6^\circ)] = 2.68cm \quad ec. 4.3$$

- 5) Se elige una ductilidad máxima ($\mu_{m\acute{a}x}=6$) para ambos CRPs.

- 6) Calculando el desplazamiento de fluencia para los dos CRPs:

$$u_y = \frac{2.68cm}{6} = 0.4467cm \quad ec. 4.4$$

- 7) El factor de rigidez (f_k) para los CRPs, el módulo de elasticidad del acero es $E=2.1 \times 10^6$ kg/cm², mientras que la fluencia del acero A-36 es $f_y=2350$ kg/cm². Para obtener la longitud del CRP se aplica el teorema de Pitágoras $L_w=670.8$ cm, una vez que se tiene lo anterior se puede calcular (f_k):

$$f_{ye} \approx 1.1(2530kg / cm^2) = 2783kg / cm^2 \quad ec. 4.17$$

$$f_k = \frac{2783kg / cm^2}{210000kg / cm^2} \cdot \frac{670.8cm}{0.4467cm} = 1.99 \quad ec. 4.18$$

- 8) Con las áreas de los dos contraventeos $A_{cc-1}=23.16$ cm² y $A_{cc-2}=36.1$ cm² se debe calcular el área débil del núcleo del CPR, en este caso primero se calculará el primer CRP:

$$A_{n-CRP-1} = \frac{26.13cm^2}{1.99} = 11.65cm^2 \quad ec. 4.19$$

- 9) Empleando la relación de áreas $\eta_A=1.5$, para el primer CRP, ahora se calcula el valor de la relación de longitudes (γ_L):

$$\gamma_L = \frac{1.5}{1.99(1.5-1)+1} = 0.75 \quad \text{ec. 4. 20}$$

10) Ahora se obtienen el área en los extremos del dispositivo:

$$A_e = (11.65\text{cm}) \cdot (1.5) = 17.48\text{cm}^2 \quad \text{ec. 4. 21}$$

11) La longitud de la zona débil del núcleo queda de la siguiente manera:

$$L_n = 0.75 \cdot (670.8\text{cm}) = 505\text{cm} \quad \text{ec. 4. 22}$$

En la figura 5.5 se muestran las partes que se calcularon para el dispositivo.

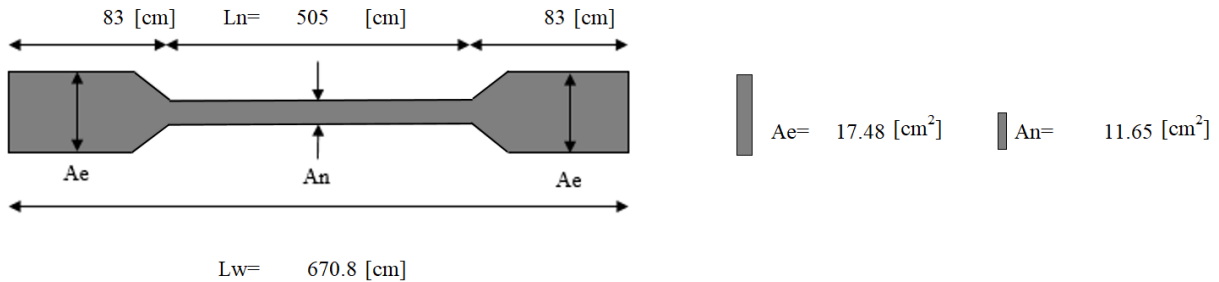


Figura 5. 5. Dimensiones del núcleo del CRP-1 (Vista en corte y transversal)

12) Para calcular la rigidez, y su capacidad a compresión máxima:

$$K_{CRP-1} = 1.99 \times \frac{11.65\text{cm}^2 \times 2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2}{670.8\text{cm}} = 72502.268 \text{kg/cm} \quad \text{ec. 4. 23}$$

$$P_{ye} = (2783 \text{kg/cm}^2)(11.65\text{cm}^2) = 32424 \text{kg} \quad \text{ec. 4. 24}$$

13) Para el tamaño de la funda, se emplea la siguiente expresión, es importante checar que en el modelo de SAP2000, la fuerza axial se menor a la a de la columna:

$$I_{\min} = \frac{2(32424\text{kg})}{2.1 \times 10^6 \text{kg/cm}^2} \frac{(670.8\text{cm})^2}{\pi^2} = 1408\text{cm}^4 \quad \text{ec. 4. 25}$$

14) Se elige la funda o encamisado en función de la inercia, debe ser mayor o igual al resultado de la ecuación 4.25. En la figura 5.6 se muestra el perfil seleccionado y a su longitud final.

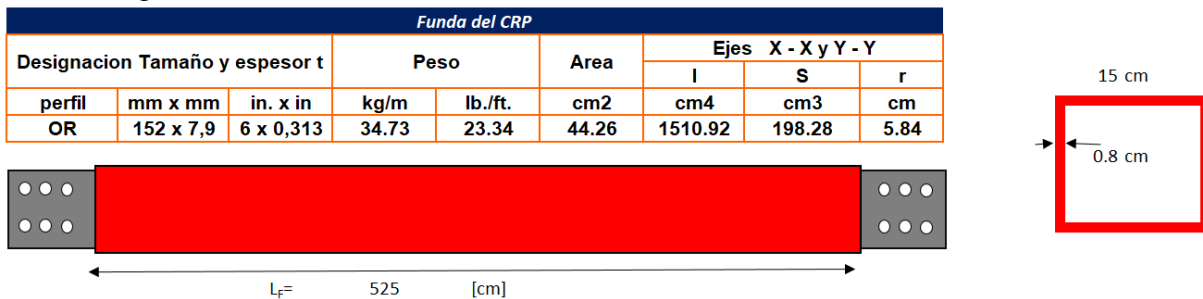


Figura 5. 6. Encamisado del CRP-1 (Vista longitudinal y transversal)

15) Ahora se calcular el segundo CRP-2 con el área de $A_{cc-2}=36.1 \text{ [cm}^2\text{]}$ se va calcular el área débil del núcleo del CPR, en este caso primero se calculará el primer CRP:

$$A_{n - CRP - 2} = \frac{36.1 \text{ cm}^2}{1.99} = 18.16 \text{ cm}^2 \quad \text{ec. 4. 26}$$

16) Empleando la relación de áreas $\eta_A=1.5$, para el primer CRP, ahora se calcula el valor de la relación de longitudes (γ_L):

$$\gamma_L = \frac{1.5}{1.99(1.5-1)+1} = 0.75 \quad \text{ec. 4. 27}$$

17) Ahora se obtienen el área en los extremos del dispositivo:

$$A_e = (36.1 \text{ cm}) \cdot (1.5) = 27.24 \text{ cm}^2 \quad \text{ec. 4. 28}$$

18) La longitud de la zona débil del núcleo queda de la siguiente manera:

$$L_n = 0.75 \cdot (670.8 \text{ cm}) = 505 \text{ cm} \quad \text{ec. 4. 29}$$

En la figura 5.7 se muestran las partes que calculadas para el dispositivo.

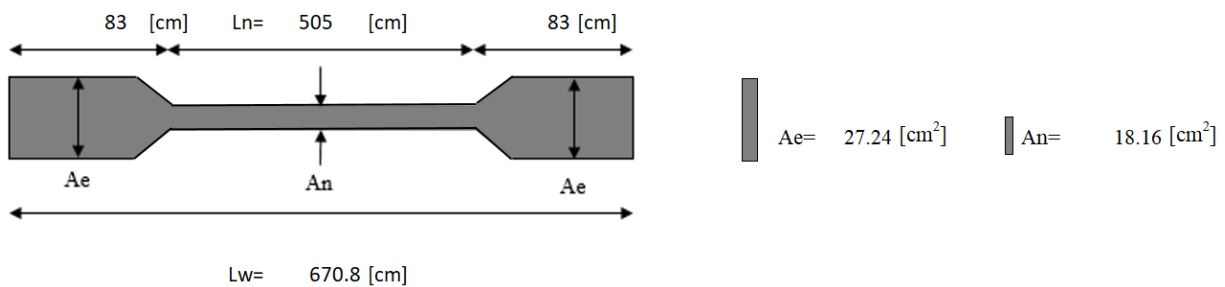


Figura 5. 7. Dimensiones del núcleo del CRP-2 (Vista en corte y transversal)

19) Para calcular la rigidez, y su capacidad a compresión máxima:

$$K_{CRP - 2} = 1.99 \times \frac{18.16 \text{ cm}^2 \times 2.1 \times 10^6 \text{ kg / cm}^2}{670.8 \text{ cm}} = 113010.876 \text{ kg / cm} \quad \text{ec. 4. 30}$$

$$P_{ye} = (2783 \text{ kg / cm}^2)(18.16 \text{ cm}^2) = 50540 \text{ kg} \quad \text{ec. 4. 31}$$

20) Para el tamaño de la funda, se emplea la siguiente expresión. Por otro lado, es importante checar que en el modelo de SAP2000, la fuerza axial sea menor a la a de la columna:

$$I_{\min} = \frac{2(50540 \text{ kg})}{(2.1 \times 10^6 \text{ kg / cm}^2)} \frac{(670.8 \text{ cm})^2}{\pi^2} = 2195 \text{ cm}^4 \quad \text{ec. 4. 32}$$

21) Se elige la funda o encamisado en función de la inercia, debe ser mayor o igual al resultado de la ecuación 4.32. En la figura 5.8 se muestra el perfil seleccionado y a su longitud final.

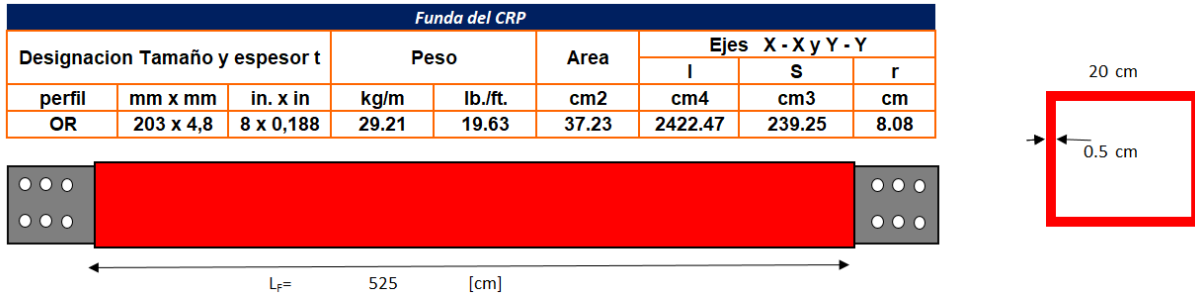


Figura 5. 8.Encamisado del CRP-2 (Vista longitudinal y transversal)

En la figura 5.9 se presentan las distorsiones de entrepiso iniciales y finales.

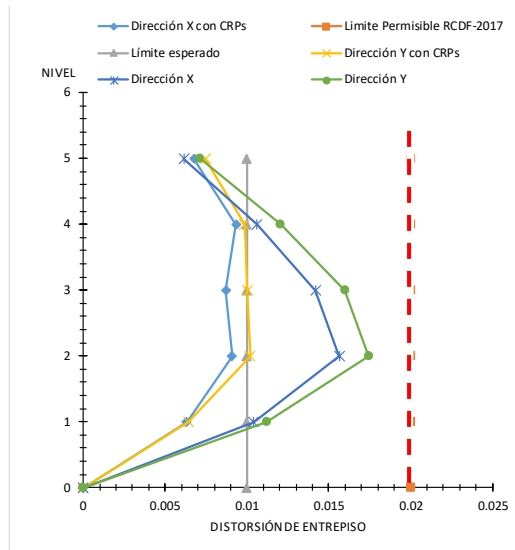


Figura 5. 9. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (5 niveles)

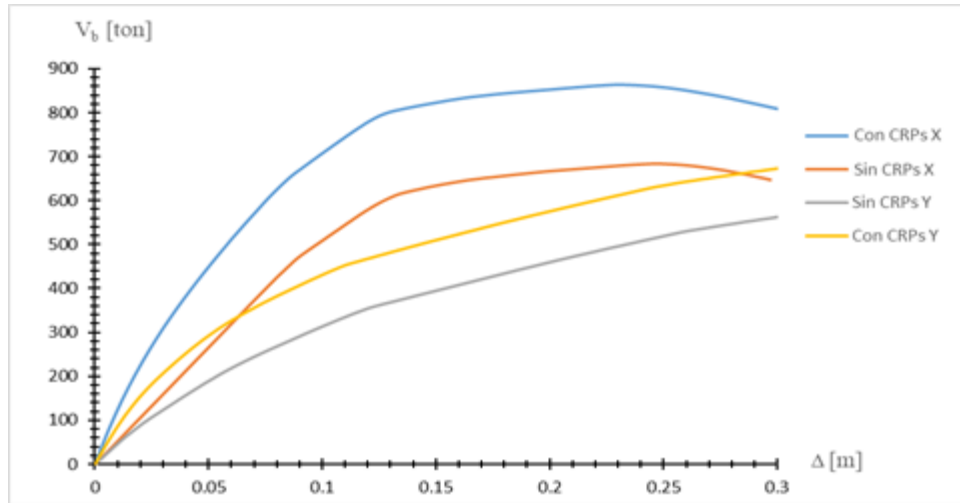


Figura 5. 10. Curva de capacidad de la estructura en dirección “x” y “y”

La figura 5.10 muestra una curva de capacidad estimada para la estructura. Se puede observar que la estructura con CRPs tiene mayor capacidad.

5.1.2. EJEMPLO 2. EDIFICIO DE 10 NIVELES (Z-I-10)

Empleando la misma metodología para la edificación de 10 niveles, se obtiene en análisis estático, las distorsiones y la solución al edificio:

Tabla 5. 4. Análisis estático en direcciones “x” y “y”

Análisis Estático dirección X y Y					
Niveles	Altura	Peso	Peso*altura	Fuerza	Cortante
	h _i	W _i	W _i h _i	F _i	V _i
-	m	ton	m-ton	ton	ton
10	30	328	9849	71.58	71.58
9	27	362	9766	70.98	142.56
8	24	362	8681	63.09	205.66
7	21	362	7596	55.21	260.86
6	18	362	6511	47.32	308.18
5	15	362	5425	39.43	347.61
4	12	362	4340	31.55	379.16
3	9	362	3255	23.66	402.82
2	6	362	2170	15.77	418.59
1	3	362	1085	7.89	426.48
	Total	3584	58683		

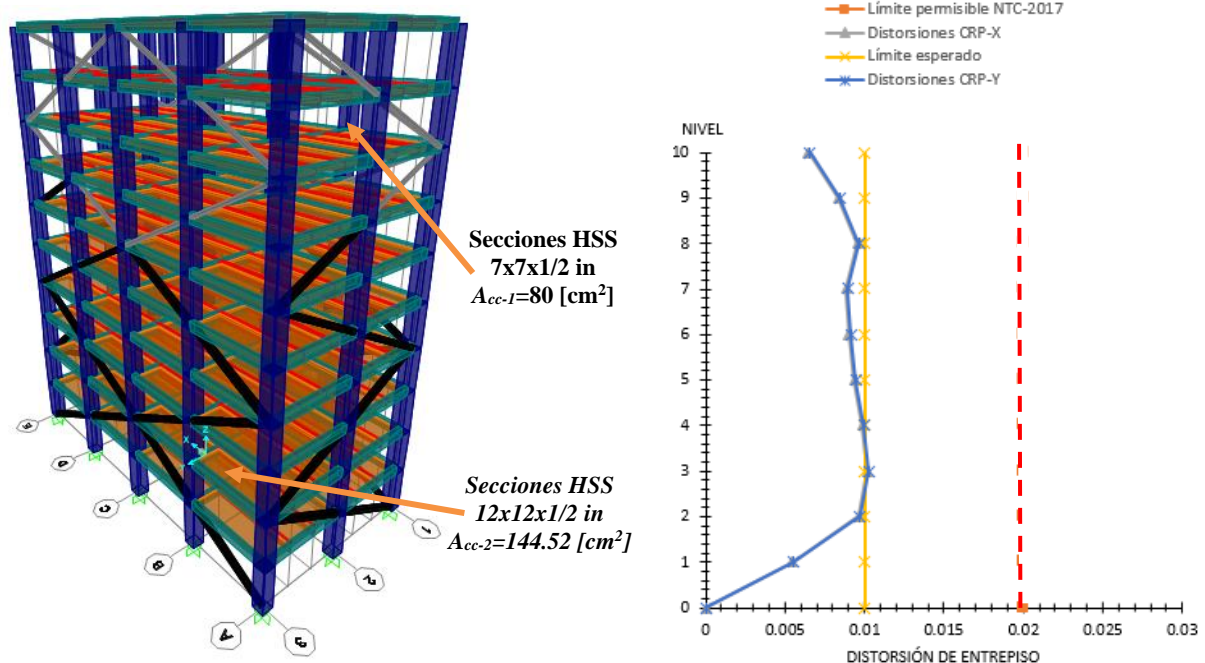


Figura 5. 11. Arreglos de CC para el modelo de 10 niveles y sus distorsiones correspondientes

Las propiedades de los CRPs quedan de la siguiente manera:

Tabla 5. 5. Propiedades y geometría del CRP-1

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{cc} =$	80	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max} =$	0.0055	
Altura de Entrepiso	$h_i =$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max} = \theta_{max} * h_i$	1.65	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	$\alpha =$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\alpha) =$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max} =$	1.48	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max} =$	5	
Deformación de Fluencia	$u_y =$	0.295	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y =$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye} =$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E =$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w =$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k =$	3.01	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n =$	26.56	[cm ²]
Relación de áreas	$\eta_A = A_e / A_n$	1.5	
Área del extremo del CRP	$A_e =$	39.84	[cm ²]

Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=L_n/L_w$	0.60	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	402	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	135	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	250439.613	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	73920.000	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	3210	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	5452.63	[cm ⁴]

Tabla 5. 6. Propiedades y geometría del CRP-2

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional

Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{cc}=$	144.52	[cm ²]
--	-----------	--------	--------------------

2) Diseño de las propiedades del CRP

Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max}=$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i=$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max}*h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	$\alpha=$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\alpha)=$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max}=$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max}=$	7	
Deformación de Fluencia	$u_y=$	0.383	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y=$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye}=$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E=$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w=$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k=$	2.32	

3) Diseño del núcleo débil

Área del núcleo del CRP	$A_n=$	62.32	[cm ²]
Relación de áreas	$\eta_A=A_e/A_n$	1.5	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	93.47	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=L_n/L_w$	0.69	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	466	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	102	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	452419.162	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	173424.000	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s =$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min} =$	7531	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real} =$	8907.00	[cm ⁴]

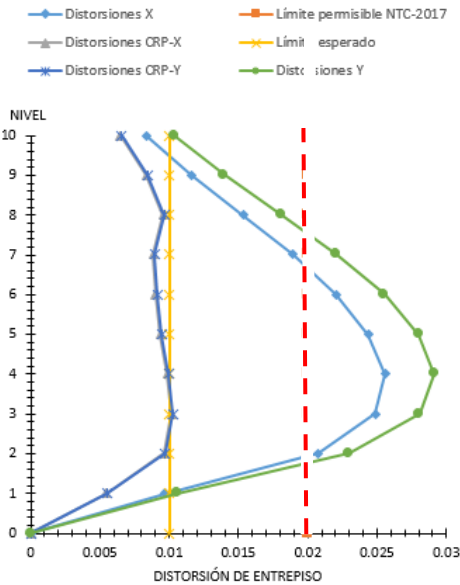


Figura 5. 12. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (10 niveles)

5.1.3. EJEMPLO 3. EDIFICIO DE 15 NIVELES (Z-I-15)

Se modelo el edificio de 15 niveles, con las geometrías y propiedades antes mencionadas, se le aplico un análisis modal, ya que el reglamento no permite usar el análisis estático.

Para diseñar los CRPs se aplicará la metodología como se mostró en el capítulo anterior.

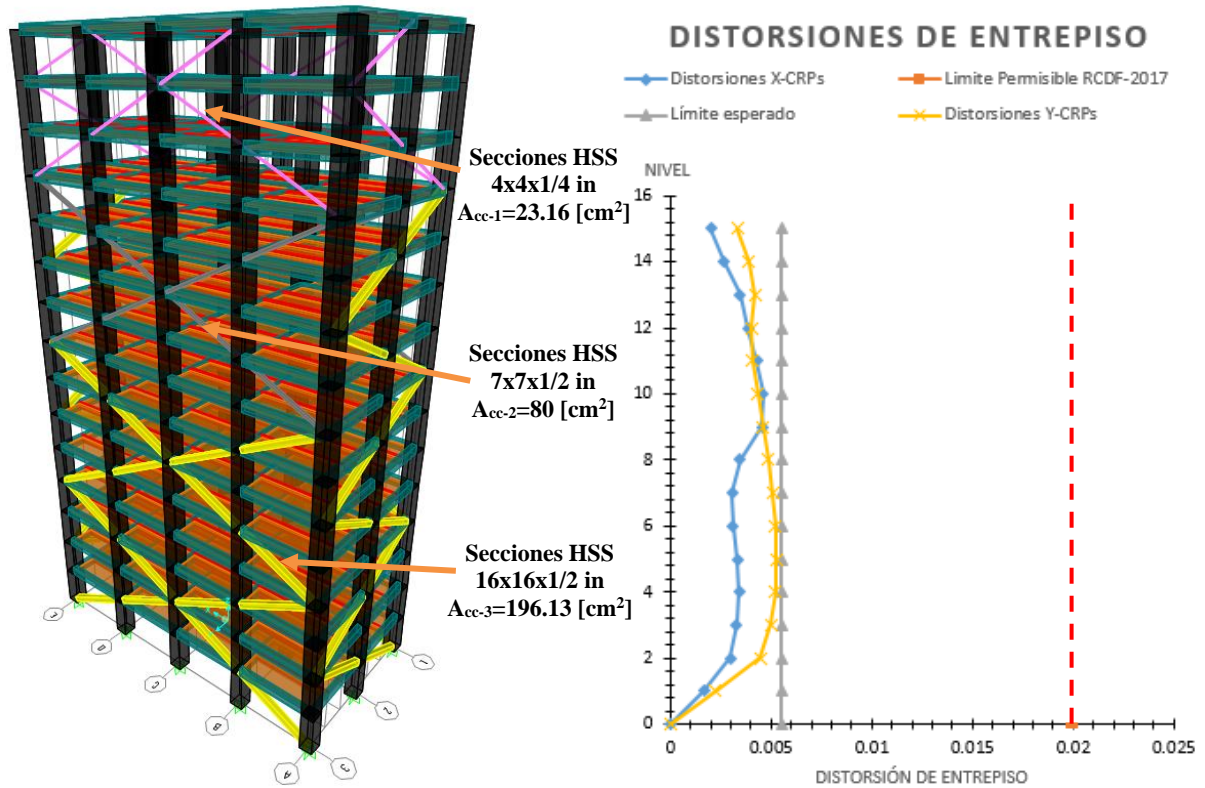


Figura 5. 13. Arreglos de CC para el modelo de 15 niveles y sus distorsiones correspondientes

Las propiedades de los CRPs quedan de la siguiente manera:

Tabla 5. 7. Propiedades y geometría del CRP-1

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	Acc=	23.16	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	θ_{max} =	0.0055	
Altura de Entrepiso	h_i =	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max}*h_i$	1.65	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	α =	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\alpha)$ =	0.89	
Deformación Axial Máxima	u_{max} =	1.48	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	μ_{max} =	5	
Deformación de Fluencia	u_y =	0.295	[cm]
Resistencia nominal del acero	f_y =	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	f_{ye} =	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	E =	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	L_w =	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	f_k =	3.01	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	A_n =	7.69	[cm ²]

Relación de áreas	$\eta_A=A_e/A_n$	2	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	15.38	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=L_n/L_w$	0.50	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	334	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	168	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	72502.268	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	21399.840	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	930	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	5452.63	[cm ⁴]

Tabla 5. 8. Propiedades y geometría del CRP-2

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional

Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{cc}=$	80	[cm ²]
--	-----------	----	--------------------

2) Diseño de las propiedades del CRP

Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max}=$	0.0055	
Altura de Entrepiso	$h_i=$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max}*h_i$	1.65	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	$\alpha=$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\alpha)=$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max}=$	1.48	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max}=$	5	
Deformación de Fluencia	$u_y=$	0.295	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y=$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye}=$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E=$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w=$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k=$	3.01	

3) Diseño del núcleo débil

Área del núcleo del CRP	$A_n=$	26.56	[cm ²]
Relación de áreas	$\eta_A=A_e/A_n$	1.5	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	39.84	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=L_n/L_w$	0.60	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	402	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	135	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	250439.613	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	73920.000	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	3210	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	5452.63	[cm ⁴]

Tabla 5. 9. Propiedades y geometría del CRP-3

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$Acc=$	196.13	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max}=$	0.0055	
Altura de Entrepiso	$h_i=$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max}*h_i$	1.65	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	$\alpha=$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\alpha)=$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max}=$	1.48	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max}=$	5	
Deformación de Fluencia	$u_y=$	0.295	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y=$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye}=$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E=$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w=$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k=$	3.01	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n=$	65.12	[cm ²]
Relación de áreas	$\eta_A=A_e/A_n$	2	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	130.24	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=L_n/L_w$	0.50	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	334	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	168	[cm]
4) Propiedades mecánicas del CRP			
Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	613984	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	181224	[kg]
5) Funda o camisa del dispositivo			
Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	7870	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	8907	[cm ⁴]

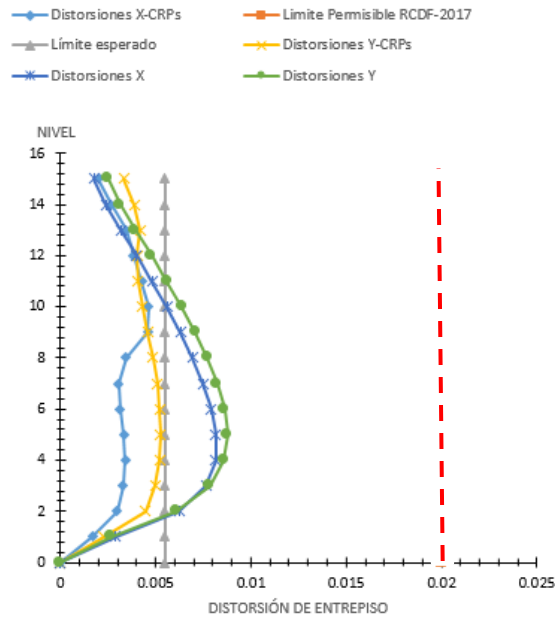


Figura 5. 14. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (15 niveles)

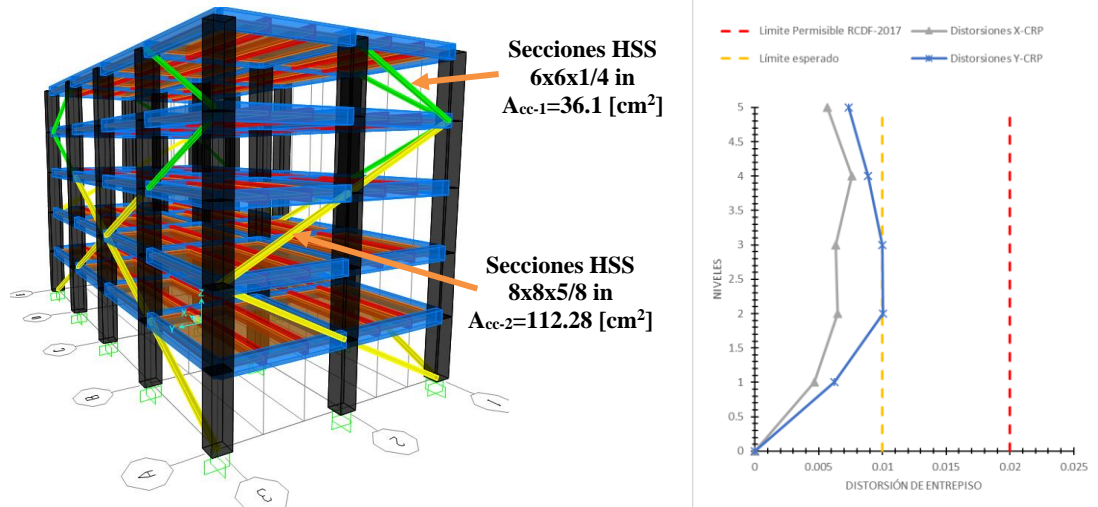
5.2. EDIFICIOS UBICADOS EN LA ZONA II

5.2.1. EJEMPLO 4. EDIFICIO DE 5 NIVELES (Z-II-5)

Empleando la misma metodología, pero para la edificación de 5 niveles, se obtiene en análisis estático, las distorsiones y la solución al edificio:

Tabla 5. 10. Análisis estático en direcciones “x” y “y”

Análisis Estático					
Niveles	Altura	Peso	Peso*altura	Fuerza	Cortante
	hi	Wi	Wihi	Fi	Vi
-	m	ton	m-ton	ton	ton
5	15	334	5009	147.66	147.66
4	12	367	4408	129.94	277.60
3	9	367	3306	97.46	375.06
2	6	367	2204	64.97	440.03
1	3	367	1102	32.49	472.51
	Total	1803	16031		



Las propiedades de los CRPs quedan de la siguiente manera:

Tabla 5. 11. Propiedades y geometría del CRP-1

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{cc} =$	36.1	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max} =$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i =$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max} = \theta_{max} * h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	$\alpha =$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\theta) =$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max} =$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max} =$	6	
Deformación de Fluencia	$u_y =$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y =$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye} =$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E =$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w =$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k =$	1.99	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n =$	18.16	[cm ²]
Relación de áreas	$\gamma_l =$	0.75	
Área del extremo del CRP	$A_e =$	27.41	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\eta_A =$	1.51	
Longitud del Núcleo	$L_n =$	503	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e =$	84	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CVRP} =$	113010.876	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye} =$	50540	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s =$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min} =$	2195	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real} =$	2422.47	[cm ⁴]

Tabla 5. 12. Propiedades y geometría del CRP-2

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional

Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$Acc =$	112.28	[cm ²]
--	---------	--------	--------------------

2) Diseño de las propiedades del CRP

Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max} =$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i =$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max} = \theta_{max} * h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CVRP	$\alpha =$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CVRP	$\cos(\theta) =$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max} =$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max} =$	6	
Deformación de Fluencia	$u_y =$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y =$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye} =$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E =$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w =$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k =$	1.99	

3) Diseño del núcleo débil

Área del núcleo del CRP	$A_n =$	56.48	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_l =$	0.75	
Área del extremo del CRP	$A_e =$	85.25	[cm ²]
Relación de áreas del CRP	$\eta_A =$	1.51	
Longitud del Núcleo	$L_n =$	503	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e =$	84	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CVRP} =$	351491.998	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye} =$	157192	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s =$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min} =$	6826	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real} =$	7617.00	[cm ⁴]

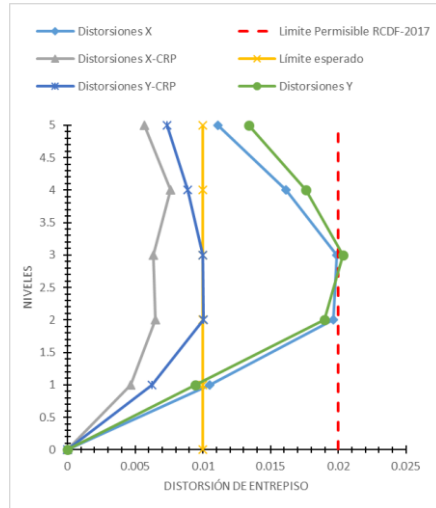


Figura 5. 16. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (5 niveles)

5.2.2. EJEMPLO 5. EDIFICIO DE 10 NIVELES (Z-II-10)

Empleando la misma metodología para la edificación de 10 niveles, se obtiene en análisis estático, las distorsiones y la solución al edificio:

Tabla 5. 13. Análisis estático en direcciones “x” y “y”

Análisis Estático; dirección X y Y					
Niveles	Altura	Peso	Peso*altura	Fuerza	Cortante
	hi	Wi	Wih	Fi	Vi
-	m	ton	m-ton	ton	ton
10	30	451	13547	216.35	216.35
9	27	485	13095	209.12	425.46
8	24	485	11640	185.88	611.34
7	21	485	10184	162.65	773.99
6	18	485	8730	139.41	913.40
5	15	485	7275	116.18	1029.57
4	12	485	5820	92.94	1122.52
3	9	485	4365	69.71	1192.22
2	6	485	2910	46.47	1238.69
1	3	485	1455	23.24	1261.93
	Total	4817	79021		

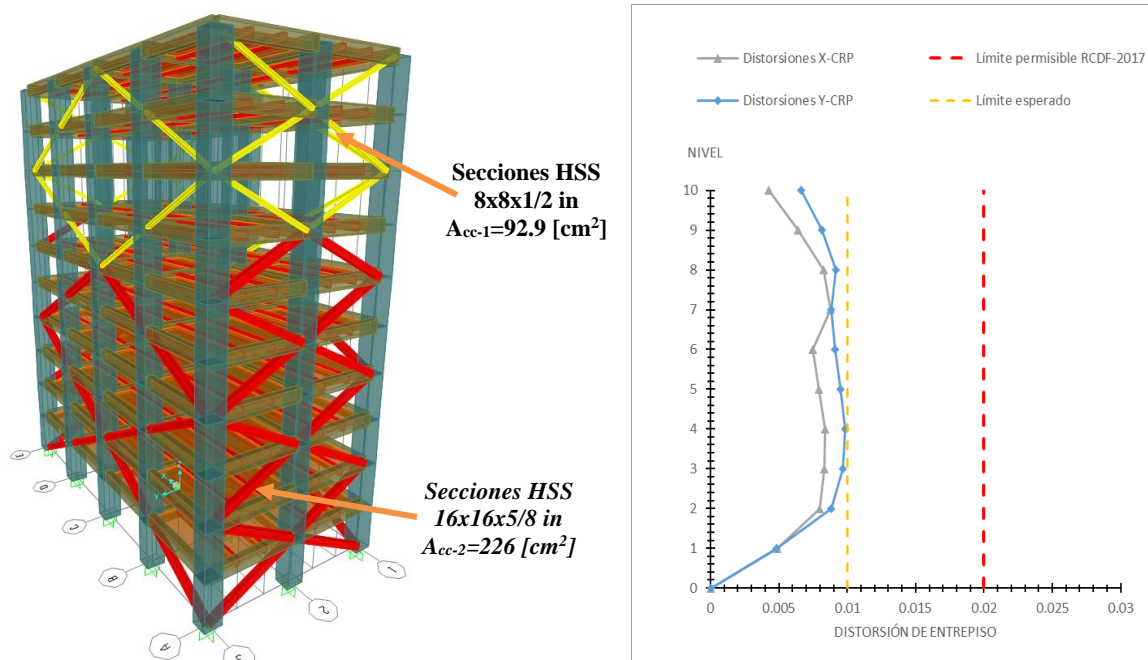


Figura 5. 17. Arreglos de CC para el modelo de 10 niveles y sus distorsiones correspondientes

Las propiedades de los CRPs quedan de la siguiente manera:

Tabla 5. 14. Propiedades y geometría del CRP-1

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{cc} =$	92.9	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max} =$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i =$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max} = \theta_{max} * h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CVRP	$\alpha =$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CVRP	$\cos(\theta) =$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max} =$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max} =$	6	
Deformación de Fluencia	$u_y =$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y =$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye} =$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E =$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w =$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k =$	1.99	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n =$	46.73	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L =$	0.66	
Área del extremo del CRP	$A_e =$	97.66	[cm ²]
Relación de áreas del CRP	$\eta_A =$	2.09	

CAPÍTULO V

Longitud del Núcleo	$L_n=$	443	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	114	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CVRP}=$	290823.001	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	130060	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	5648	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	6285.00	[cm ⁴]

Tabla 5. 15. Propiedades y geometría del CRP-2

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional

Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{cc}=$	226	[cm ²]
--	-----------	-----	--------------------

2) Diseño de las propiedades del CRP

Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max}=$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i=$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max}*h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CVRP	$\alpha=$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CVRP	$\cos(\theta)=$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max}=$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max}=$	6	
Deformación de Fluencia	$u_y=$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y=$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye}=$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E=$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w=$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k=$	1.99	

3) Diseño del núcleo débil

Área del núcleo del CRP	$A_n=$	113.69	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\mu_L=$	0.66	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	237.59	[cm ²]
Relación de áreas del CRP	$\eta_A=$	2.09	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	443	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	114	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CVRP}=$	707491.908	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	316400	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s =$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min} =$	13740	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real} =$	15817.00	[cm ⁴]

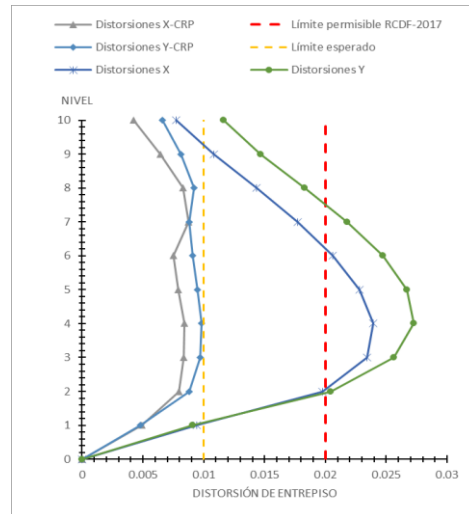


Figura 5. 18. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (10 niveles)

5.2.3. EJEMPLO 6. EDIFICIO DE 15 NIVELES (Z-II-15)

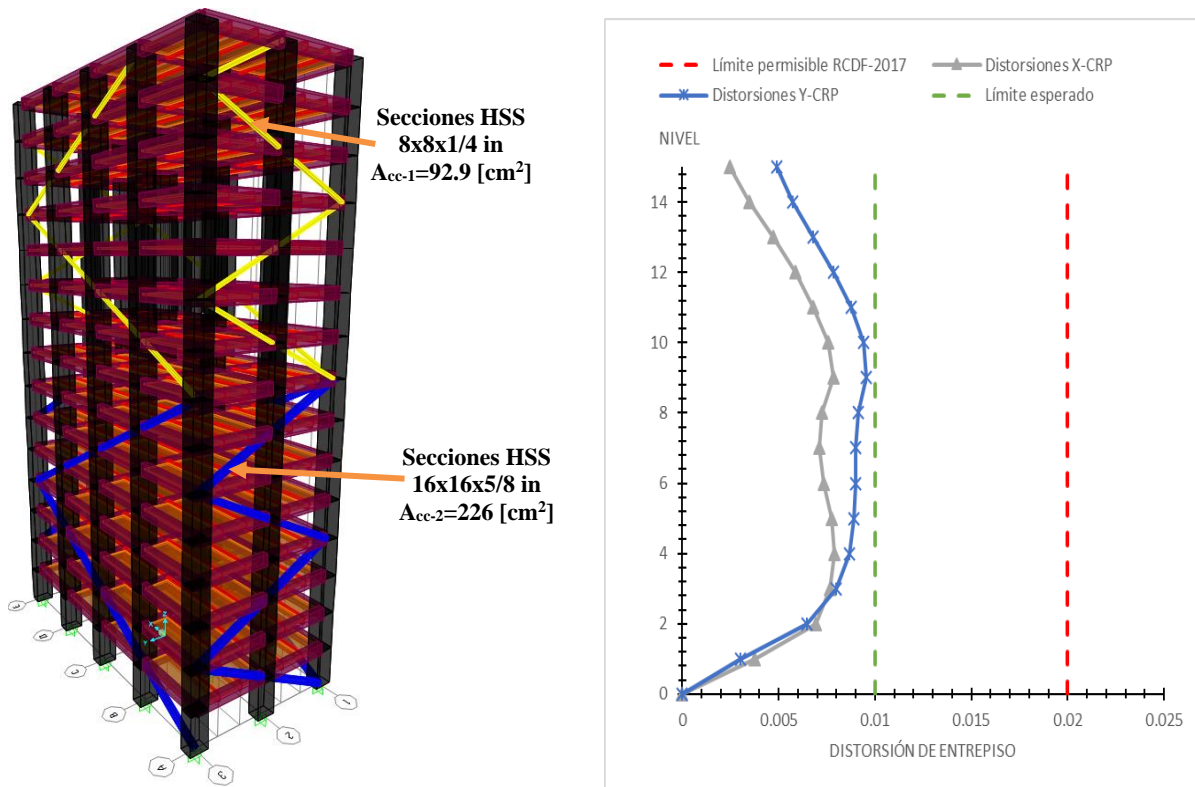


Figura 5. 19. Arreglos de CC para el modelo de 15 niveles y sus distorsiones correspondientes
Las propiedades de los CRPs quedan de la siguiente manera:

Tabla 5. 16. Propiedades y geometría del CRP-1

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	Acc=	92.9	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max} =$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i =$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max} = \theta_{max} * h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CVRP	$\alpha =$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CVRP	$\cos(\theta) =$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max} =$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max} =$	6	
Deformación de Fluencia	$u_y =$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y =$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye} =$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E =$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w =$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k =$	1.99	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n =$	46.73	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L =$	0.66	
Área del extremo del CRP	$A_e =$	97.66	[cm ²]
Relación de áreas del CRP	$\eta_A =$	2.09	
Longitud del Núcleo	$L_n =$	443	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e =$	114	[cm]
4) Propiedades mecánicas del CRP			
Rigidez del CRP	$K_{CVRP} =$	290823	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye} =$	130060	[kg]
5) Funda o camisa del dispositivo			
Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s =$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min} =$	5648	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real} =$	6285	[cm ⁴]

Tabla 5. 17. Propiedades y geometría del CRP-2

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{req} =$	226	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max} =$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i =$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max} = \theta_{max} * h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CVRP	$\alpha =$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CVRP	$\cos(\theta) =$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max} =$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max} =$	6	
Deformación de Fluencia	$u_{\gamma} =$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y =$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye} =$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E =$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w =$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k =$	1.99	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n =$	113.69	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L =$	0.66	
Área del extremo del CRP	$A_e =$	237.59	[cm ²]
Relación de áreas del CRP	$\eta_A =$	2.09	
Longitud del Núcleo	$L_n =$	443	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e =$	114	[cm]
4) Propiedades mecánicas del CRP			
Rigidez del CRP	$K_{CVRP} =$	707491.908	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye} =$	316400	[kg]
5) Funda o camisa del dispositivo			
Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s =$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min} =$	13740	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real} =$	15817.00	[cm ⁴]

Así mismo se presenta una tabla con las distorsiones de entrepiso iniciales y finales:

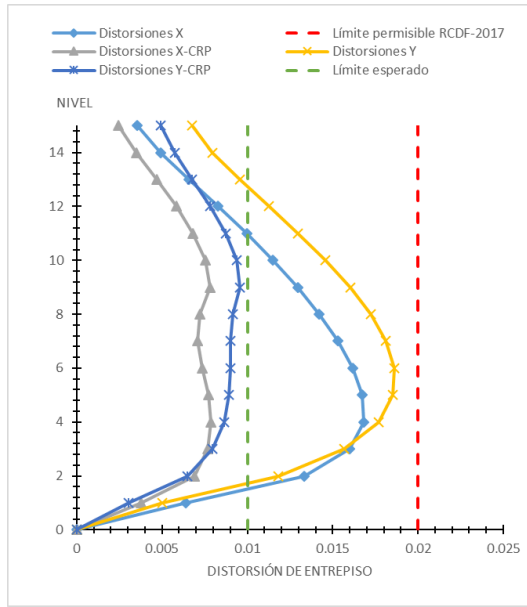


Figura 5. 20. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (15 niveles)

5.3. EDIFICIOS UBICADOS EN LA ZONA III

5.3.1. EJEMPLO 7. EDIFICIO DE 5 NIVELES (Z-III-5)

Empleando la misma metodología para la edificación de 5 niveles, se obtiene en análisis estático, las distorsiones y la solución al edificio:

Tabla 5. 18. Análisis estático en direcciones “x” y “y”

Análisis Estático					
Niveles	Altura	Peso	Peso*altura	Fuerza	Cortante
-	hi	Wi	Wihi	Fi	Vi
-	m	ton	m*ton	ton	ton
5	15	334	5010	169	169
4	12	367	4409	148	317
3	9	367	3306	111	428
2	6	367	2204	74	502
1	3	367	1102	37	539
	Total	1803	16031		

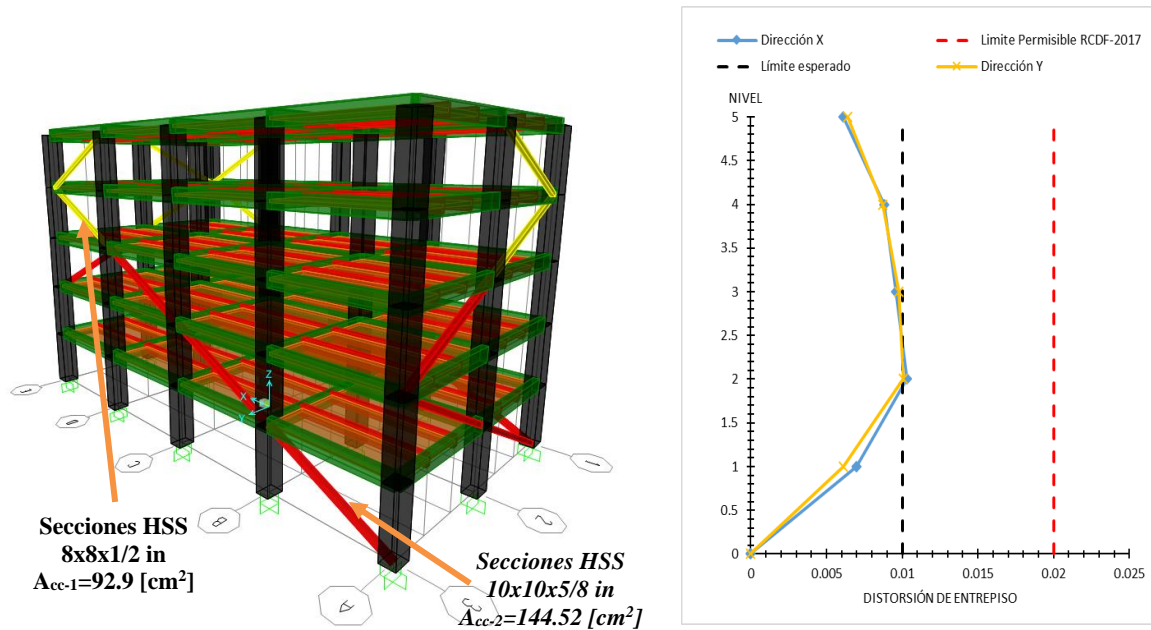


Figura 5. 21. Arreglos de CC para el modelo de 5 niveles y sus distorsiones correspondientes

Las propiedades de los CRPs quedan de la siguiente manera:

Tabla 5. 19. Propiedades y geometría del CRP-1

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$Acc=$	92.9	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max}=$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i=$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max}*h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CVRP	$\alpha=$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CVRP	$\cos(\theta)=$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max}=$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max}=$	6	
Deformación de Fluencia	$u_y=$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y=$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye}=$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E=$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w=$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k=$	1.99	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n=$	46.73	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=$	0.66	

Área del extremo del CRP	$A_e=$	97.66	[cm ²]
Relación de áreas del CRP	$\eta_A=$	2.09	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	443	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	114	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	290823.001	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	130060	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	5648	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	6285.00	[cm ⁴]

Tabla 5. 20. Propiedades y geometría del CRP-2

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional

Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{req}=$	144.52	[cm ²]
--	------------	--------	--------------------

2) Diseño de las propiedades del CRP

Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max}=$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i=$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max}*h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	$\alpha=$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\alpha)=$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max}=$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max}=$	6	
Deformación de Fluencia	$u_y=$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y=$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye}=$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E=$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w=$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k=$	1.99	

3) Diseño del núcleo débil

Área del núcleo del CRP	$A_n=$	72.70	[cm ²]
Relación de áreas	$\eta_A=A_e/A_n$	1.5	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	109.05	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=L_n/L_w$	0.75	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	505	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	83	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	452419	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	202328	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	8786	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	8907.00	[cm ⁴]

Así mismo se presenta una tabla con las distorsiones de entrepiso iniciales y finales:

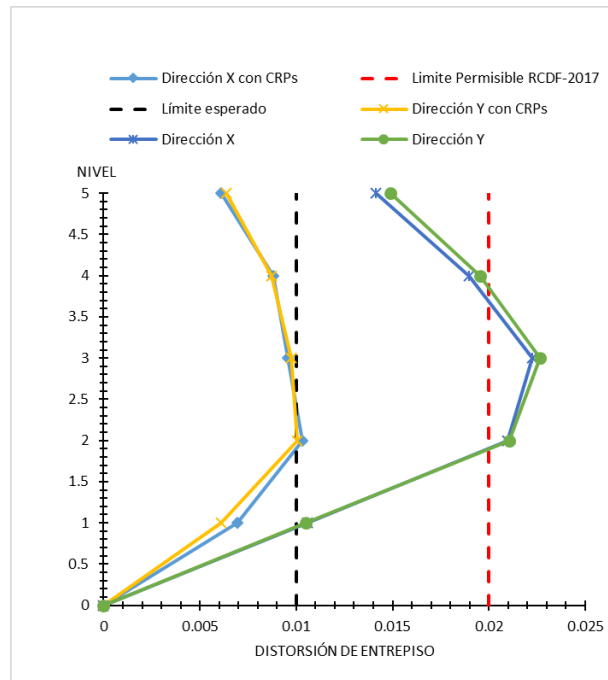


Figura 5. 22. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (5 niveles)

5.3.2. EJEMPLO 8. EDIFICIO DE 10 NIVELES (Z-III-10)

Empleando la misma metodología, pero para la edificación de 10 niveles, se obtiene en análisis estático, las distorsiones y la solución al edificio:

Tabla 5. 21. Análisis estático en direcciones “x” y “y”

Análisis Estático					
Niveles	Altura	Peso	Peso*altura	Fuerza	Cortante
	hi	Wi	Wihi	Fi	Vi
-	m	ton	m*ton	ton	ton
10	30	386	11591	185	185
9	27	420	11334	181	366
8	24	420	10074	161	527
7	21	420	8815	141	668
6	18	420	7556	121	789
5	15	420	6296	101	890
4	12	420	5037	81	970

3	9	420	3778	60	1031
2	6	420	2519	40	1071
1	3	420	1259	20	1091
	Total	4164	68258		

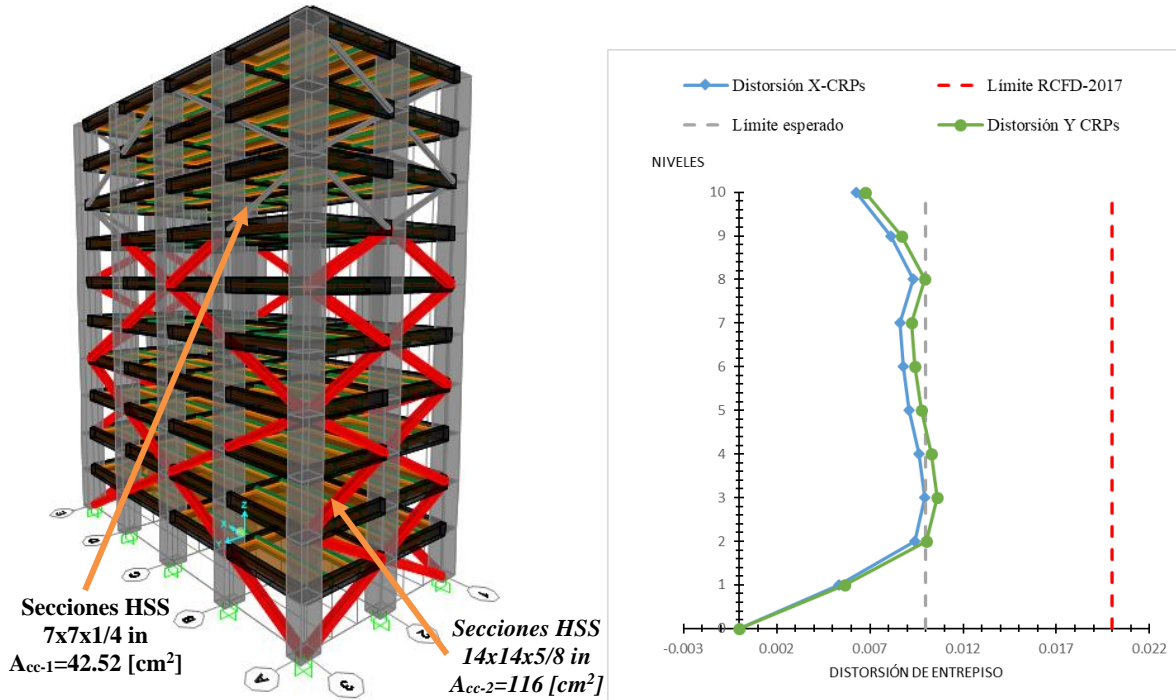


Figura 5. 23. Arreglos de CC para el modelo de 10 niveles y sus distorsiones correspondientes

Las propiedades de los CRPs quedan de la siguiente manera:

Tabla 5. 22. Propiedades y geometría del CRP-1

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{cc} =$	44.52	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max} =$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i =$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max} = \theta_{max} * h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	$\alpha =$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\alpha) =$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max} =$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max} =$	5	
Deformación de Fluencia	$u_y =$	0.537	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y =$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye} =$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E =$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w =$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k =$	1.66	

3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n=$	26.88	[cm ²]
Relación de áreas	$\eta_A=A_e/A_n$	1.5	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	40.31	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=L_n/L_w$	0.82	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	550	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	60	[cm]
4) Propiedades mecánicas del CRP			
Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	139369.645	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	74793.600	[kg]
5) Funda o camisa del dispositivo			
Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	3248	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	3251.32	[cm ⁴]

Tabla 5. 23. Propiedades y geometría del CRP-2

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$Acc=$	116	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max}=$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i=$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max}*h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	$\alpha=$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\alpha)=$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max}=$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max}=$	7	
Deformación de Fluencia	$u_y=$	0.383	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y=$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye}=$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E=$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w=$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k=$	2.32	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n=$	50.02	[cm ²]
Relación de áreas	$\eta_A=A_e/A_n$	1.5	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	75.03	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=L_n/L_w$	0.69	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	466	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	102	[cm]
4) Propiedades mecánicas del CRP			
Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	363137	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	139200	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s =$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min} =$	6045	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real} =$	6285.00	[cm ⁴]

Así mismo se presenta una tabla con las distorsiones de entrepiso iniciales y finales:

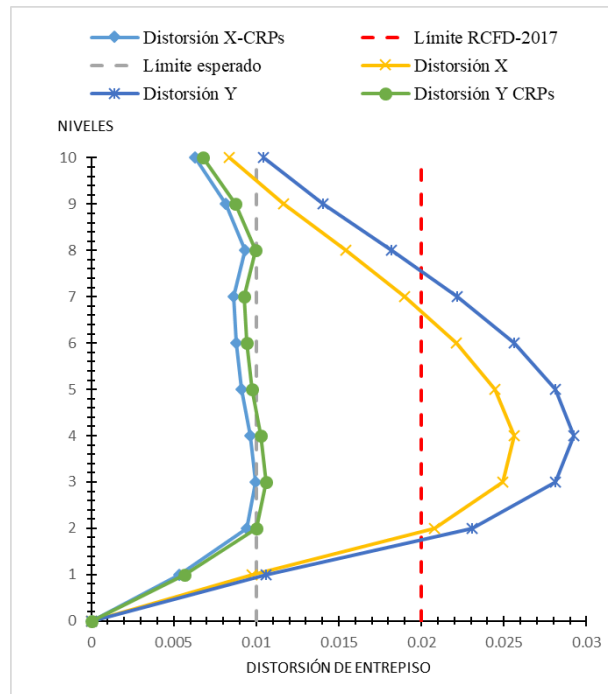


Figura 5. 24. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (10 niveles)

5.3.3. EJEMPLO 9. EDIFICIO DE 15 NIVELES (Z-III-15)

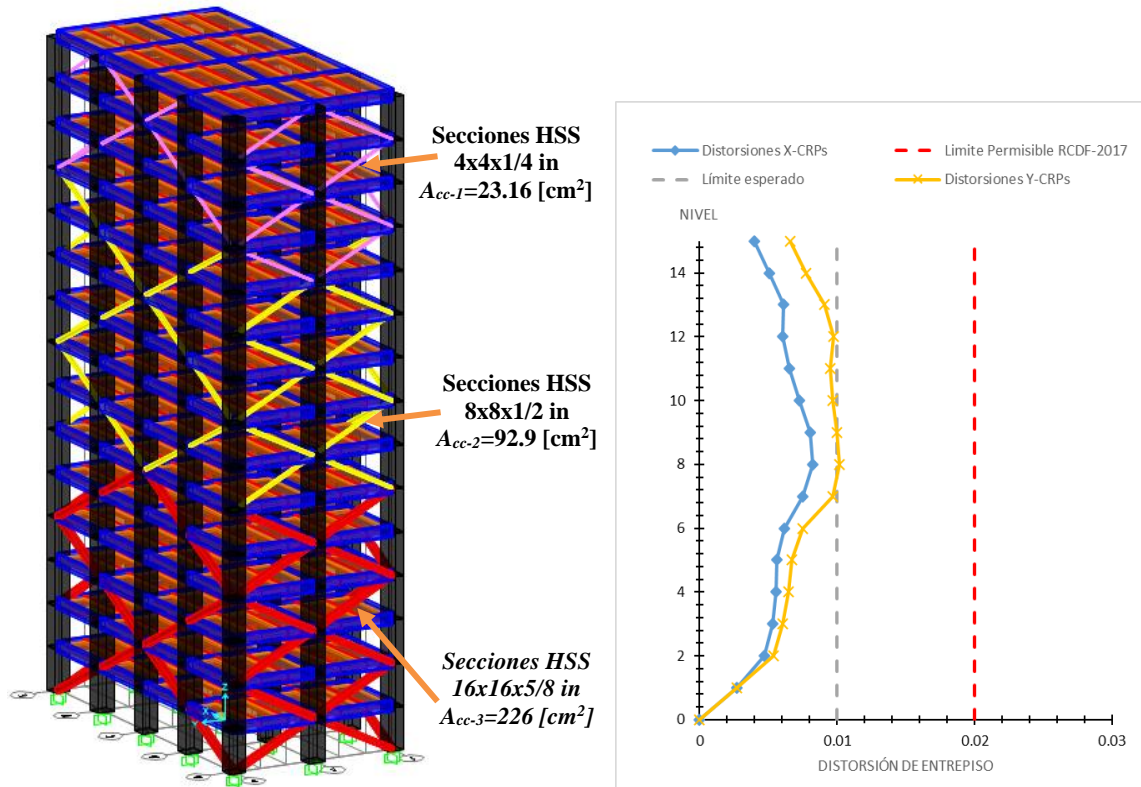


Figura 5. 25. Arreglos de CC para el modelo de 15 niveles y sus distorsiones correspondientes

Tabla 5. 24. Propiedades y geometría del CRP-1

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	Acc=	23.16	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	θ_{max} =	0.0055	
Altura de Entrepiso	h_i =	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max}*h_i$	1.65	[cm]
Ángulo de inclinación del CRP	α =	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CRP	$\cos(\alpha)$ =	0.89	
Deformación Axial Máxima	u_{max} =	1.48	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	μ_{max} =	5	
Deformación de Fluencia	u_y =	0.295	[cm]
Resistencia nominal del acero	f_y =	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	f_{ye} =	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	E =	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	L_w =	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	f_k =	3.01	

3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n=$	7.69	[cm ²]
Relación de áreas	$\eta_A=A_e/A_n$	2	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	15.38	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=L_n/L_w$	0.50	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	334	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	168	[cm]
4) Propiedades mecánicas del CRP			
Rigidez del CRP	$K_{CRP}=$	72502.268	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	21399.840	[kg]
5) Funda o camisa del dispositivo			
Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	930	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	5452.63	[cm ⁴]

Tabla 5. 25. Propiedades y geometría del CRP-2

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional			
Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{cc}=$	92.9	[cm ²]
2) Diseño de las propiedades del CRP			
Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max}=$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i=$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max} * h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CVRP	$\alpha=$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CVRP	$\cos(\theta)=$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max}=$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max}=$	6	
Deformación de Fluencia	$u_y=$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y=$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye}=$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E=$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w=$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k=$	1.99	
3) Diseño del núcleo débil			
Área del núcleo del CRP	$A_n=$	46.73	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=$	0.66	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	97.66	[cm ²]
Relación de áreas del CRP	$\eta_A=$	2.09	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	443	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	114	[cm]
4) Propiedades mecánicas del CRP			
Rigidez del CRP	$K_{CVRP}=$	290823.001	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	130060	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	5648	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	6285.00	[cm ⁴]

Tabla 5. 26. Propiedades y geometría del CRP-3

1) Análisis estructural con el contraventeo convencional

Área Requerida de Contraventeos Convencionales	$A_{cc}=$	226	[cm ²]
--	-----------	-----	--------------------

2) Diseño de las propiedades del CRP

Desplazamiento de Entrepiso Máximo Permitido	$\theta_{max}=$	0.01	
Altura de Entrepiso	$h_i=$	300	[cm]
Desplazamiento Relativo de Entrepiso	$\Delta_{max}=\theta_{max} * h_i$	3	[cm]
Ángulo de inclinación del CVRP	$\alpha=$	26.6	[°]
Coseno del ángulo de inclinación del CVRP	$\cos(\theta)=$	0.89	
Deformación Axial Máxima	$u_{max}=$	2.68	[cm]
Ductilidad del núcleo del CRP	$\mu_{max}=$	6	
Deformación de Fluencia	$u_y=$	0.447	[cm]
Resistencia nominal del acero	$f_y=$	2530	[kg/cm ²]
Resistencia esperada del acero	$f_{ye}=$	2783	[kg/cm ²]
Módulo de elasticidad de acero	$E=$	2100000	[kg/cm ²]
Longitud total del dispositivo de nodo a nodo	$L_w=$	670.8	[cm]
Factor de Rigidez	$f_k=$	1.99	

3) Diseño del núcleo débil

Área del núcleo del CRP	$A_n=$	113.69	[cm ²]
Relación de Longitudes del CRP	$\gamma_L=$	0.66	
Área del extremo del CRP	$A_e=$	237.59	[cm ²]
Relación de áreas del CRP	$\eta_A=$	2.09	
Longitud del Núcleo	$L_n=$	443	[cm]
Longitud del Extremo del CRP	$L_e=$	114	[cm]

4) Propiedades mecánicas del CRP

Rigidez del CRP	$K_{CVRP}=$	707491.9	[kg/cm]
Carga a compresión máxima del CRP	$P_{ye}=$	316400	[kg]

5) Funda o camisa del dispositivo

Factor de Seguridad para la Compresión	$f_s=$	2	
Momento de Inercia Mínima del Tubo Cuadrado OR	$I_{min}=$	13740	[cm ⁴]
Perfil Seleccionado IMCA	$I_{real}=$	15817.00	[cm ⁴]

Así mismo se presenta una tabla con las distorsiones de entrepiso iniciales y finales:

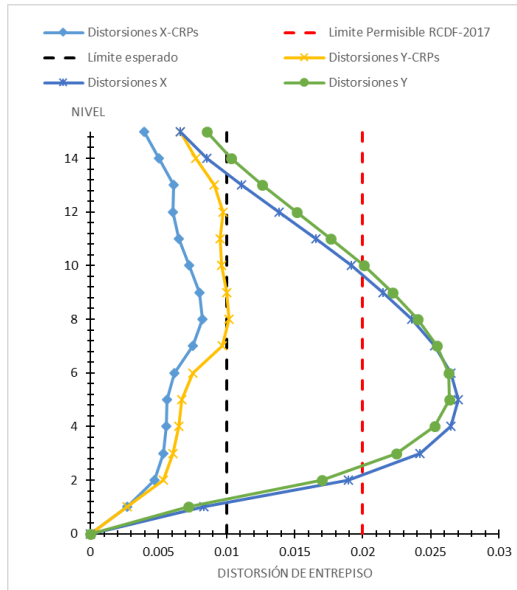


Figura 5. 26. Distorsiones de entrepiso iniciales y finales (15 niveles)

Se demostró que la metodología funciona es muy sencillo calcular los CRPs, así mismo se muestra una tabla comparativa de los periodo iniciales dominantes que tienen las estructuras y los periodos finales(ver tabla 5.27).

Tabla 5. 27. Periodos iniciales y finales de las estructuras

Resultados del análisis sin CRPs									
Clave	5EZ1	10EZ1	15EZ1	5EZ2	10EZ2	15EZ2	5EZ3	10EZ3	15EZ3
Unidades	seg	seg	seg	seg	seg	seg	seg	seg	seg
T ₁	0.91	1.59	1.87	0.85	1.36	1.48	0.66	1.05	1.63
T ₂	0.869	1.49	2.07	0.85	1.28	1.58	0.66	1.05	1.78
Resultados del análisis con CRPs									
Clave	5EZ1	10EZ1	15EZ1	5EZ2	10EZ2	15EZ2	5EZ3	10EZ3	15EZ3
Unidades	seg	seg	seg	seg	seg	seg	seg	seg	seg
T ₁	0.653	0.869	0.98	0.6	0.75	1.08	0.39	0.56	1.09
T ₂	0.54	0.6631	1.22	0.49	0.81	1.17	0.39	0.53	1.04

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES

6.1. CONCLUSIONES

De acuerdo a los objetivos que se plantearon al inicio del proyecto, se puede concluir que la metodología para los CRPs es práctica y funcional en las diversas estructuras diseñadas, así mismo se concluye que:

- Los CRPs redujeron significativamente las distorsiones de entrepiso en las estructuras estudiadas.
- En las estructuras diseñadas se pudo ver que los CRPs reducen considerablemente la sección de las columnas. Esto, reduce los costos de construcción. Los CRPs favorecen la rigidez inicial de las estructuras (ver tabla 5.27).
- Es posible diseñar estructuras resilientes con los CRPs sin usar en otros tipos de sistemas de control sísmico costosos o especializados, logrando así incentivar a emplearlos desde su inicio de construcción o en estructuras que necesitan rehabilitación.
- Es evidente que la zona más desfavorable es la zona lacustre, porque las aceleraciones son mayores. Así mismo, los dispositivos son capaces de acomodar las demandas, demostrando que son eficientes al garantizar seguridad estructural y optimización en los elementos estructurales.

6.2. RECOMENDACIONES PARA EL USO DE LA METODOLOGÍA

A lo largo del desarrollo de la tesis, se encontraron oportunidades de optimización de tiempos para la aplicación de la metodología de diseño de los CRPs. Se ofrecen las siguientes recomendaciones:

- 1) Se recomienda cambiar las áreas de las secciones de los CRPs cada 4 o 6 niveles.
- 2) Las fuerzas cortantes (laterales) dan una idea del tamaño de la sección que requiere la crujía para que se coloque una sección HSS cercana a la necesitada.
- 3) Para evitar muchas iteraciones en la aplicación de la metodología, se sugiere satisfacer primero las distorsiones de la estructura para que cumplan con los requerimientos y posteriormente comenzar el diseño por resistencia.

6.3. RECOMENDACIONES PARA INVESTIGACIONES FUTURAS

- Encontrar una relación o geometría que permita optimizar el material, es decir, encontrar un diseño del CRP en donde se aproveche la máxima capacidad de los elementos que lo componen.
- Emplear un análisis dinámico no lineal tipo “paso a paso” en el que se pueda comparar esta metodología simplificada, para poder valorar si las estructuras realmente necesitan

ser reforzadas, en el caso de que esta correlación considerar este proyecto como un método simplificado.

- Investigar el comportamiento de las conexiones y anclajes que van a utilizar en los elementos, ya que su cálculo es idealizado y no se consideran excentricidades en los nodos que se colocan.

REFERENCIAS

- Arriaga, G. A. (2018). "Modelo experimental numérica no lineal de un marco de concreto reforzado, equipado con disipadores de energía sísmica". Ciudad de México, Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Arroyo, E. D. (2009). "Estudio experimental de contavientos restringidos contra pandeo: desarrollo conceptual y detalles de implementación". Distrito Federal, México: Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco .
- Avilés, S. R. (2001). "Dispositivos para el control de vibraciones". Valdivia, Chile: Facultad de Ciencias de la Ingeniería .
- Bonilla, S. L. (2012). "Teoría de aislamiento sísmico para edificaciones". México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- Berrón (2018), "Análisis de las edificaciones afectadas en la ciudad de México por el sismo del 19 de septiembre de 2017 dictaminadas por el instituto para la seguridad de las construcciones", CNIE XXI-SMIE-Campeche, Ciudad de México, México.
- CFE (2008) "Manual de diseño de obras civiles, Diseño por viento". Instituto de Investigaciones Eléctricas, Comisión Federal de Electricidad.
- Comite de Resiliencia de la Infraestructura. (Marzo 2018). "Resiliencia de la infraestructura, una visión general". Ciudad de México: Colegio de Ingenieros Civiles de México; Comite de Resiliencia de la Infraestructura.
- Daza, D. (2017), "¿Qué es el cinturón de fuego del pacífico y por qué produce fuertes terremotos?", Perú21, <https://peru21.pe/ciencia/cinturon-fuego-pacifico-produce-fuertes-terremotos-376813>
- Díaz de León, G. (2018), "Comparativa de dos filosofías de diseño sísmico aplicadas a edificios de concreto reforzado: método basado en desplazamientos y método basado en fuerzas NTC 2017", Facultad de Ingeniería, UNAM, México.
- Espinoza, A. D. (Diciembre 2009). "Estudio experimental de Contraventeos Restringidos Contra Pandeo: Desarrollo Conceptual y Detalles de Implementación". Ciudad de México: UAM-Azcapotzalco.
- GCDMX (2017). "Reglamento de construcción del Distrito Federal, Cuerpo principal y sus Normas Técnicas Complementarias". Gaceta del gobierno de la ciudad de México, México
- Gerdau Corsa (2013) "Catálogo de tablas de dimensiones y propiedades de perfiles estructurales laminados GERDAU CORSA", www.gerdaucorsa.com.mx
- Guerrero, H., Ji, T., Teran-Gilmore, A. & Escobar, J. A., (2016). "A method for preliminary seismic design and assessment of low-rise structures protected with buckling-restrained braces". Eng Struct, Volumen 123, pp. 141-154.

- Guerrero, H., Terán-Gilmore, A., Ji, T. & Escobar, J. A., (2017). "Evaluation of the economic benefits of using Buckling-Restrained Braces in hospital structures located in very soft soils". *Engineering Structures*, Volumen 136, pp. 406-419.
- Ibáñez, V. R. (2012), "Contraventeo", *Acero*, <http://raydeacero.blogspot.com/2012/02/contraventeo.html>
- Lagos, O. S. (2014). "La instrumentación sísmica en México". Ciudad de México: Facultad de Ingeniería, UNAM.
- López, S. y Ayala, G. A. (2013) "Método de diseño basado en desplazamientos para marcos de concreto reforzado", *Revista Ingeniería Sísmica*, No. 88 91-111
- Meza O. N. (2015), "Los 8 sismos más catastróficos en la historia de México", *Forbes*, <https://www.forbes.com.mx/los-8-sismos-mas-catastroficos-en-la-historia-de-mexico/>
- Montaño, J.J. G. (2013), "Regiones sísmicas de la República Mexicana", DRO 390, <http://dro390mazatlan.com/regiones-sismicas-mexico/>
- NIAC (2009) "Critical Infrastructure Resilience final report and recommendations", National Infrastructure Advisory Council, <https://www.dhs.gov/sites/default/files/publications/niac-critical-infrastructure-resilience-final-report-09-08-09-508.pdf>
- NTC-DS (2017). "Reglamento de construcción del Distrito Federal, Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo". Gaceta del gobierno de la ciudad de México, México.
- NTC-DCEA (2017). "Reglamento de construcción del Distrito Federal, Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Acero". Gaceta del gobierno de la ciudad de México, México.
- Oviedo, J. A., & Duque, M. d. (2009). "Disipadores histeréticos metálicos como técnica de control de respuesta sísmica en edificaciones colombianas" ". *Revista EIA*, núm11, pp. 51-63.
- R. Tremblay, P. B. (2006). "Seismic testing and performance of buckling-restrained bracing systems". Canada, NRC, 183-198.
- Ruiz, J. L. (2017), "Fotos: antes y después de los edificios derrumbados en CDMX, Google Street", https://www.huffingtonpost.com.mx/2017/09/23/fotos-el-antes-y-despues-de-los-edificios-derrumbados-en-cdmx_a_23220020/
- Sánchez-Badillo, A y A Terán-Gilmore (2008), "Diseño por desempeño de estructuras dúctiles de concreto reforzado ubicadas en la Zona del Lago del D.F.: ejemplo de aplicación", *Revista de Ingeniería Sísmica*, 78, 47-71.
- SAP2000 (2011). "Computers and Structures", Inc. v15.1.0, Bekerley, EUA

- SEAOAC (1995), "Conceptual framework for performance based seismic engineering of building, Structural Engineers Association of California", https://www.researchgate.net/publication/315487018_Diseño_Basado_en_Desempeño_Performance_Based_Diseño
- Sistema Geológico Mexicano, (2017) "Tectónico de placa", Museo virtual, <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Sismologia-de-Mexico.html>
- Teran, G. A. (2009). "Preliminary Design of Low-Rise Buildings Stiffened with Buckling-Restrained Braces by a Displacement-Based Approach". *Earthquake Spectra*, 185-209.
- Terán, G. A. (2009). "Estudio experimental en contravientos desadheridos". *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*, 1-29.
- Terán, G. A. (2010). "El futuro del diseño sismoresistente de las edificaciones de concreto reforzado: Una visión basada en sustentabilidad". *concreto y cemento. Investigación y Desarrollo*, 1-15.
- Torres, P.-N. M. (2000). "Criterio de diseño para el refuerzo de edificios con disipadores de energía histeréticos". Distrito Federal, México: Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Acatlán.
- Toro, A. M. (2014, julio 14). "Falla, Geología general", <http://anamtoro-geologiageneral.blogspot.com/2014/07/fallas.html>
- Wada, e. a. (2003). "Innovative strategies in earthquake engineering". *Earthquake Engineering: Recent Advances and Applications*, Capítulo 10, CRC Press.