



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE ESCUELAS LOCALIZADAS EN EL VALLE DE
MÉXICO CON BASE EN SU VULNERABILIDAD SÍSMICA

T E S I S

Que para obtener el título de

INGENIERO CIVIL

Presenta:

Héctor Martínez Rodríguez

Director de tesis:

Dr. Mauro P. Niño Lázaro



México, D.F.

Mayo, 2016.



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA
COMITÉ DE TITULACIÓN
FING/DICyG/SEAC/UTIT/034/16

Señor
HÉCTOR MARTÍNEZ RODRÍGUEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. MAURO POMPEYO NIÑO LÁZARO, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

"ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO DE ESCUELAS LOCALIZADAS EN EL VALLE DE MÉXICO CON BASE EN SU VULNERABILIDAD SÍSMICA"

- I. INTRODUCCIÓN
- II. ESTADO DEL ARTE
- III. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ESTRUCTURALES DE ESCUELAS TIPO
- IV. REVISIÓN Y ADECUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS CON LA REGLAMENTACIÓN VIGENTE
- V. VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL
- VI. ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO EN FUNCIÓN DEL DAÑO ESPERADO
- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- REFERENCIAS
- ANEXOS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 11 de abril del 2016.
EL PRESIDENTE

M.I. GERMÁN LOPEZ RINCÓN

GLR/MTH*gar.

Resumen

Se realiza un análisis costo-beneficio para determinar si tres estructuras con uso de escuela diseñadas bajo los reglamentos de construcción RCDF-2004, RCDF-1989 y RCDF-1977 son viables para rigidizar con el fin de que cumplan con las distorsiones manejadas en el cuerpo y apéndice de las NTC para diseño sísmico 2004 (NTCS-2004), o en su defecto reconstruir esas estructuras con un diseño basado en el RCDF-2004.

Para este propósito se elige realizar el diseño de tres estructuras con uso de escuela bajo los reglamentos RCDF-2004, RCDF-1989 y RCDF-1977 y las NTC para diseño sísmico del 2004 (NTCS-2004), 1987 (NTCS-1987) y 1977 (NTCS-1977), posteriormente las estructuras de RCDF-1989 y RCDF-1977 se sometieron a los parámetros sísmicos que rigen en las NTCS-2004, y finalmente se evaluaron con cuerpo y apéndice. Una vez obtenida esa comparación se toma la decisión de modificar las tres estructuras, si se requiere, para que cumplan con los lineamientos de seguridad manejados en las NTCS-2004.

Se procede con un análisis no lineal mediante el cual se obtienen las curvas de vulnerabilidad sísmica para las estructuras RCDF-2004, RCDF-1987 y RCDF-1977 tanto originales como modificadas para predecir su comportamiento sísmico.

Finalmente se realiza un análisis costo-beneficio en función de la vulnerabilidad sísmica y el costo de reconstrucción de las diferentes opciones para determinar si es viable la solución de modificar las estructuras, o en su caso volver a reconstruirlas.

AGRADECIMIENTOS

A Dios y a su hijo San Charbel que me regalaron la vida.

A Luis, María, Cesar y Luís que me motivaron crecer día a día.

A los Doctores Mauro y Miguel por compartir su conocimiento
y experiencia para mi formación profesional.

Contenido

INTRODUCCIÓN	7
1.-ESTADO DEL ARTE	12
2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ESTRUCTURALES DE ESCUELAS TIPO	19
2.1 Elementos que conforman la estructura.....	21
2.2 Carga Muerta	21
2.3 Carga Viva máxima e instantánea	21
2.4 Propiedades mecánicas de los materiales.....	22
2.5 Definición de la demanda sísmica.....	23
2.5.2 Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, RCDF-2004...	27
2.5.3 Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, RCDF-1987..	28
2.5.4 Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, RCDF-1977..	29
2.6 Diseño de elementos estructurales	30
2.6.1 Acorde al reglamento 2004.....	30
2.6.2 Acorde al reglamento 1987	36
2.6.3 Acorde al reglamento 1977.....	42
2.7 Costos directos	47
3 REVISIÓN Y ADECUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS CON LA REGLAMENTACIÓN VIGENTE	49
3.1 Evaluación estructural 1977 con espectro de respuesta de NTCS-2004	49
3.2 Evaluación estructural 1987 con espectro de respuesta de NTCS-2004	52
3.3 Evaluación estructural 2004 con espectro de respuesta de NTCS-2004	54
3.4 Reforzamiento y/o rigidización para cumplir los desplazamientos manejados por las NTC-2004: cuerpo principal y apéndice A.....	55
4 VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL	65
4.1 Estimación de la respuesta y daño de las escuelas diseñadas acorde a los reglamentos 2004, 1987 y 1977.....	66
4.1.1 Curvas de vulnerabilidad para estructuras de un nivel.....	69
4.1.2 Curvas de vulnerabilidad para estructuras de tres niveles.....	70
4.2 Estimación de la respuesta y daño de las escuelas modificadas acorde al reglamento 2004: apéndice A.....	71
5 ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO EN FUNCIÓN DEL DAÑO ESPERADO.....	74
6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86

REFERENCIAS.....	87
ANEXOS	89

INTRODUCCIÓN

Los reglamentos de construcción del Distrito Federal a lo largo de la historia (RCDF-1977, RCDF-1987, RCDF-2004, entre otros) han sido uno de los códigos más avanzados en el mundo y que mayor relevancia tiene debido a su amplio contenido en temas como cimentaciones, instrumentación, análisis de las estructuras bajo condiciones determinadas de sismo o viento, entre otros. Fue elaborado con la participación de diversas entidades como la Secretaría de Obras, Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda del Distrito Federal, la UNAM, entre otros, y se ha ido modificando a lo largo del tiempo.

Después de los daños ocasionados durante el sismo de 1985, se observó la necesidad de disminuir el grado de riesgo de las estructuras que afectan a la población de la Ciudad de México contra desastres posteriores. Las autoridades establecieron revisar y actualizar las normas hasta ese momento vigentes, obteniendo como resultado nuevos parámetros en materia de estabilidad, uso de estructuras, explotación de materiales, aprovechamiento de recursos y servicios públicos.

Debido a que el reglamento de construcción del Distrito Federal se ha ido modificando, diversas estructuras han quedado rezagadas en materia de seguridad sísmica. Existen construcciones en la Ciudad de México que aún están diseñadas bajo reglamentos antiguos por lo que es importante realizar un estudio para observar su estado.

Es por eso que para este proyecto se decide estudiar 3 estructuras con uso de escuela, las cuales fueron diseñadas con reglamentos antiguos: RCDF-2004, RCDF-1987 y RCDF-1977, con el objetivo de precisamente observar su comportamiento y establecer una conclusión que permita demostrar si esas estructuras cumplen con los parámetros de la reglamentación (RCDF-2004) y si no es el caso, cuál sería la solución para que esas estructuras cumplan primero con la normativa actual y segundo, calcular el costo directo de esa solución, y observar su beneficio. Esta conclusión es llevada a cabo gracias a un análisis costo-

beneficio en función de la vulnerabilidad estructural comparada con lo que establece el RCDF-2004.

El RCDF-2004 fue publicado el 6 de octubre de 2004 y consta del cuerpo principal del reglamento y las Normas Técnicas Complementarias (NTC-2004). En esta versión se establecen grandes avances tecnológicos y científicos, se crea la manifestación de construcción (desapareciendo el permiso de construcción), se incrementan las obligaciones de los responsables de obra y se estipulan criterios para el diseño estructural de edificaciones (Villaverde, 2009).

Es importante destacar que como resultado del avance tecnológico de los últimos años es necesario mejorar los procedimientos constructivos y la instrumentación de la construcción, además de los procesos técnicos y reglamentarios involucrados. Por lo que nuevamente se considera necesario reformar el actual reglamento de construcciones (McCormac, 1994).

Objetivos

General

Realizar un análisis costo-beneficio que permita demostrar si las estructuras diseñadas bajo los reglamentos RCDF-2004, RCDF-1987 y RCDF-1977 son viables para rigidizar desde un punto de vista económico y técnico, con el fin de que cumplan lo establecido en el RCDF-2004, o en su caso, tener que volver a reconstruir las estructuras a través un diseño con el reglamento actual, todo ello en función de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras.

Particulares

- Identificar el comportamiento en términos de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras diseñadas con los reglamentos RCDF-2004, RCDF-1989 y RCDF-1977 bajo las acciones sísmicas que establecen las normas del apéndice de las NTCS-2004.
- Identificar el comportamiento en términos de la vulnerabilidad sísmica de las estructuras diseñadas con los reglamentos RCDF-2004, RCDF-1989 y RCDF-1977 a las cuales se les rigidiza para que cumplan los parámetros de las NTCS-2004.
- Realizar un análisis costo-beneficio, luego de observar el comportamiento en términos de vulnerabilidad sísmica para las estructuras RCDF-2004, RCDF-1987 y RCDF-2004 tanto originales como rigidizadas, con la finalidad de proponer si es viable rigidizar las estructuras o volver a construirlas ya con los parámetros del RCDF-2004.

Justificación

Debido a que en la Ciudad de México existen estructuras aun diseñadas con reglamentos anteriores como el RCDF-1977 y RCDF-1987, el presente trabajo tiene la finalidad de establecer una conclusión, desde el punto de vista técnico y económico, entre rigidizar las estructuras reglamentos RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF- 2004 con el fin de que cumplan con lo marcado en el apéndice de las NTCS-2004 o reconstruir totalmente las estructuras con un diseño basado en el RCDF-2004 mediante un análisis costo-beneficio basado en la vulnerabilidad sísmica.

Capítulo 1

1.-ESTADO DEL ARTE

La Ciudad de México es una de las ciudades más grandes del mundo y por consiguiente cuenta con una gran población que año con año va creciendo de forma exponencial: población que demanda comida, agua, educación e infraestructura que les permita tener una mejor calidad de vida.

La infraestructura es la parte medular de toda población que desea desarrollo, misma que demanda preparación, conocimiento y tecnología. El desarrollar infraestructura en la Ciudad de México es uno de los retos más importantes que ha enfrentado el territorio desde la fundación de la metrópoli por parte del imperio Tenochtitlán. El reto radica en que la Ciudad fue fundada sobre un lago el cual tiene sus orígenes desde principios del cuaternario, alrededor de 500 años aproximadamente. La zona del valle de México (zona en la cual se encuentra la ciudad de México) almacenó agua proveniente de abundantes lluvias, formando diversos lago como el de Zumpango, Xaltocan, Texcoco, Xochimilco y Chalco, de los cuales solo en la actualidad se encuentran el de Xochimilco, Tláhuac y Texcoco gracias a las obras de ingeniería que se han generado con el propósito de drenar el agua almacenada, de esta forma poder ocupar espacios y atender la demanda de infraestructura de la población (Reinoso, 1994).

Dichas condiciones han dado lugar a que el diseño de la infraestructura tome en cuenta condiciones de suelo, condiciones ambientales y por supuesto los sismos (causados por el movimiento de placas tectónicas en el Océano Pacífico), parámetros que son de vital importancia en la construcción de edificaciones.

1.1 Sismos

Los sismos constituyen una de las más poderosas fuerzas que la naturaleza puede dar, a lo largo de la historia han causado grandes destrucciones en ciudades y pueblos alrededor del mundo, su poder es tal que han hecho caer edificios, presas y colosales construcciones que el hombre ha creado, por lo que

es motivo de vital importancia que el ingeniero civil preste atención a sus efectos y que diseñe edificaciones que puedan soportar tan grandes fuerzas de una manera técnica y por supuesto, económica (Villaverde, 2009).

1.1.1 Actividad sísmica alrededor del mundo

Los sismos no ocurren en toda la superficie de la tierra, lo hacen en regiones muy específicas debido a las características bajo las cuales se encuentran dichas regiones, esto se confirmó gracias a los estudios que se han tenido de los sismos, estudios comenzados apenas en el siglo XX en el cual se grabaron los primeros registros de este fenómeno (Villaverde, 2009).

En la figura 1.1 se puede observar la ocurrencia de sismos en el planeta tierra, es importante recalcar que la zona de mayor impacto es en los continentes americano y asiático.

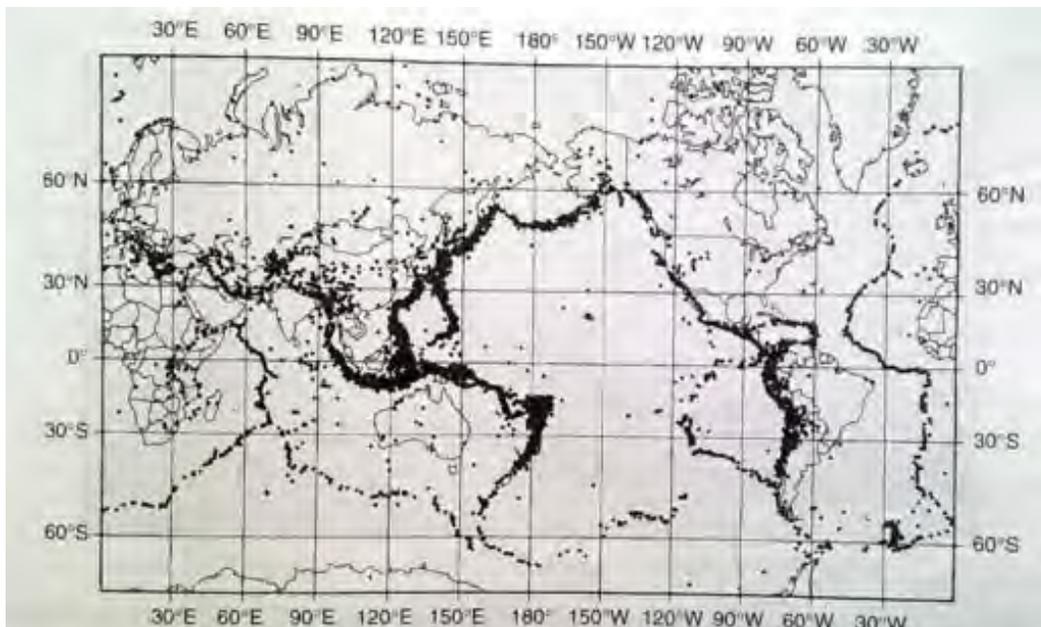


Figura 1.1 Ocurrencia de sismos obtenidos por Villaverde entre 1963 y 1988 (Villaverde, 2009).

1.1.2 Magnitud sísmica

Los sismos se catalogan en escalas las cuales se basan en una cuantitativa descripción del daño causado por un sismo a una región en particular y la asociada reacción humana.

El desarrollo de las escalas data desde 1564 hasta llegar a 1902 año en donde el italiano sismólogo Giuseppe Mercalli desarrollo la escala que lleva su nombre, y que se ha usado de manera muy general.

La tabla 1.1 muestra un registro de los sismos que han golpeado al mundo desde 1900, año en que el hombre comenzó a grabar los eventos sísmicos.

Tabla 1.1. Magnitud de Sismos obtenidos desde 1900 alrededor del mundo
(Villaverde, 2009)

Categoría	Magnitud (Mercalli)	No. de sismos /año
Gigante	>8	1
Mayor	7-7.9	18
Fuerte	6-6.9	120
Moderado	5-5.9	800
Ligero	4-4.9	6,200
Menor	3-3.9	49,000
muy menor	2-3	365,000
Apenas perceptible	1-2	17,885,000

1.1.3 Sismos en la Ciudad de México

En la figura 1.2 se observan las zonas de Michoacán, Guerrero y Oaxaca, lugares donde se originan con mayor frecuencia los epicentros de los sismos que han afectado al país.

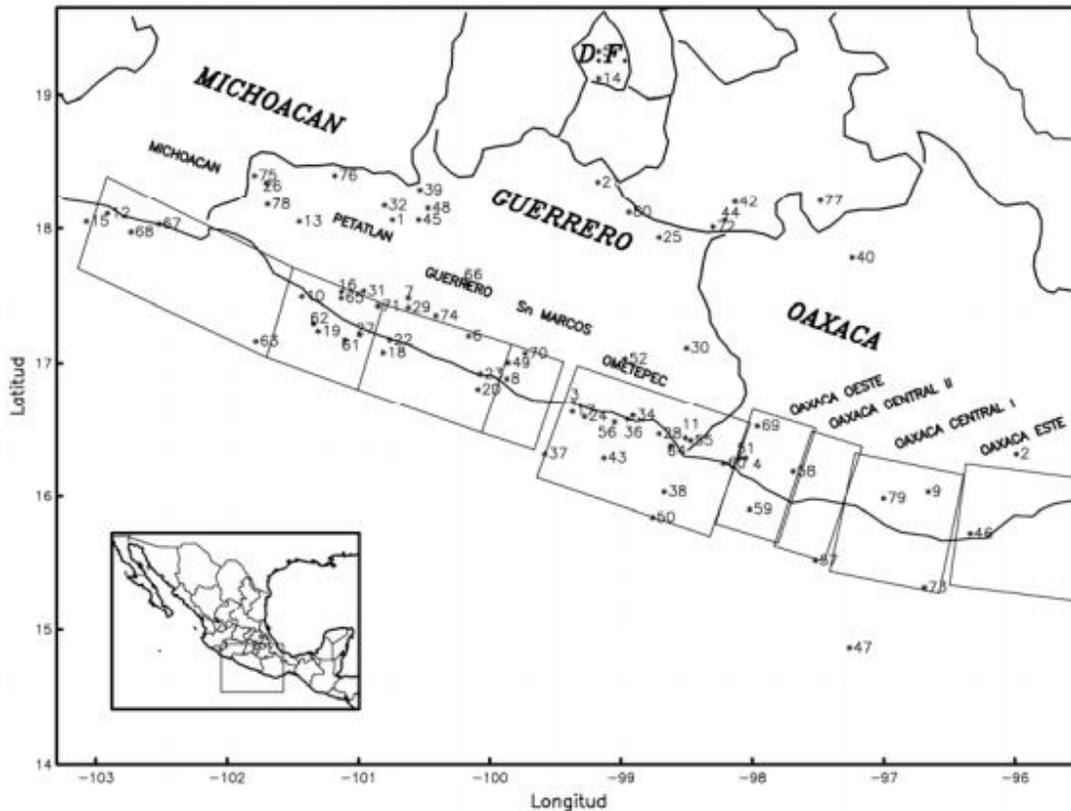


Figura 1.2. Epicentro de sismos que han afectado a la ciudad de México desde 1985, en la región de Michoacán, Guerrero y Oaxaca (Reinoso, 1994)

De manera general podemos hablar de 4 grupos que han afectado al territorio nacional.

- Temblores locales (magnitud < 5.5)
- Temblores tipo Acambay (magnitud < 7.0)
- Temblores de profundidad intermedia de falla normal (magnitud = < 7.8)
- Temblores de Subducción (magnitud < 8.2)

1.2 Diseño estructural

El diseño estructural es la parte medular de todo proyecto estructural, es la parte intangible del mismo pero de su buena realización depende que la estructura cumpla los parámetros de seguridad, costo y la estética necesarios para el confort humano (Meli, 1995).

Es importante recalcar que un proyecto de construcción depende mucho de las características bajo las cuales se estará construyendo y claro la función primordial de este.

Alrededor del mundo las condiciones van cambiando y por lo tanto un diseño estructural se debe adoptar de acuerdo a lo que se presenta. En el caso de la Ciudad de México donde se realiza el presente estudio se tienen condiciones austeras bajo las cuales se debe trabajar sobre todo en la parte sísmica.

La Ciudad de México es una de las regiones con mayor actividad sísmica en el país e incluso a nivel mundial, por lo que los factores de seguridad deben ser sumamente rígidos y deben contemplar un gran margen de los mismos (McCormac y Elling, 1994).

1.3 Análisis costo beneficio de una estructura.

En la ingeniería civil es importante establecer diferentes soluciones para una misma problemática. Las soluciones deben tomar en cuenta aspectos fundamentales desde el punto de vista técnico y económico. El analizar costos en una estructura requiere de componentes técnicos, profesionales, y un componente de mantenimiento que permita tener una observación continua la estructura.

El análisis costo beneficio tiene su origen alrededor de 1844, el desarrollo de este análisis se asoció directamente con obras de ingeniería. Su desarrollo fue progresando, a principios del siglo XX fue retomando más fuerza y durante la segunda guerra mundial se empleó directamente, a base de programación lineal, probabilidad aplicada, entre otras (UNAM, 2006).

El análisis costo beneficio depende mucho de la manera de aplicación y ejecución, de forma general se puede hablar que toma en cuenta tres aspectos.

- Quien lo utiliza
- Cuando se utiliza
- Para que se utiliza

Con base en estos tres aspectos podemos evaluar y enfocar un análisis costo beneficio sobre cualquier problemática, en el caso de una estructura el quien, se lo adjudicamos al cliente, el cuándo se relaciona con la vida útil para la cual se diseña, y el para que esta vinculado con el tipo de estructura (UNAM, 2006).

El estudio de la vulnerabilidad sísmica para establecer el análisis costo-beneficio es de suma importancia, por lo que diversos investigadores han contribuido al desarrollo del tema, Kappos, Stylianidis y Pitilakis (1998) realizaron una investigación en Grecia para establecer un método híbrido para calcular la vulnerabilidad sísmica, la cual se basa en métodos analíticos y empíricos.

En el tema de análisis costo beneficio en función de la vulnerabilidad sísmica, existen estudios que permiten observar la importancia de este análisis, Andreas y Dimitrakopoulos (2006) establecieron que es factible rigidizar estructuras con el objetivo de mitigar los daños por impactos sísmicos en Europa, investigación que apporto el despertar un interés mayor sobre la seguridad sísmica en estructuras construidas en ese mismo continente.

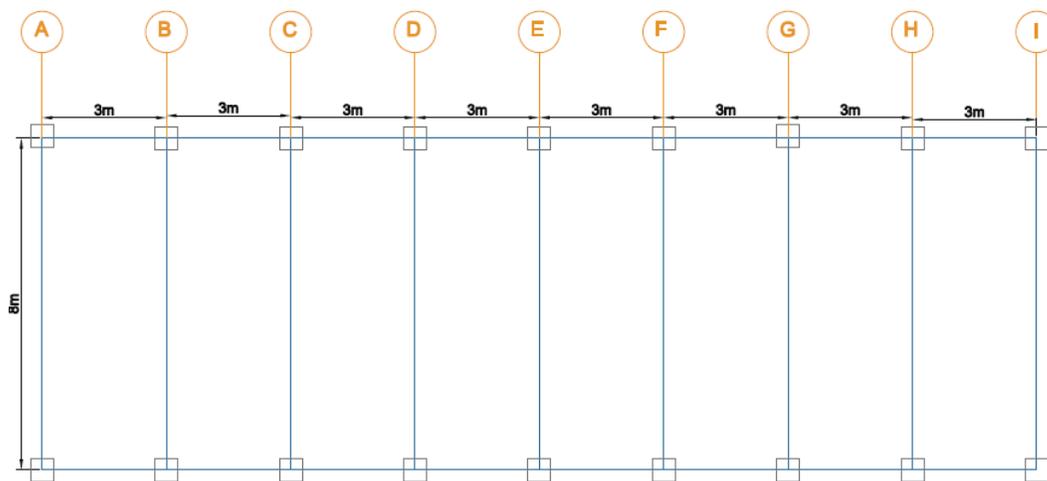
Es preciso concluir que además de que una estructura tenga un excelente diseño y que cuente con gran seguridad sísmica, se debe realizar un análisis costo-beneficio para observar su impacto en la sociedad. Es por ello que el presente trabajo tiene como finalidad mostrar una conclusión entre rigidizar estructuras diseñadas bajo el RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004 para que sean más seguras y cumplan con la reglamentación vigente (RCDF-2004 y NTCS-2004) o bien, definitivamente volver a re-construirlas ya con un diseño basado en ese mismo reglamento, tomando en cuenta como base fundamental la vulnerabilidad sísmica y el análisis costo beneficio.

Capítulo 2

2 CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y ESTRUCTURALES DE ESCUELAS TIPO

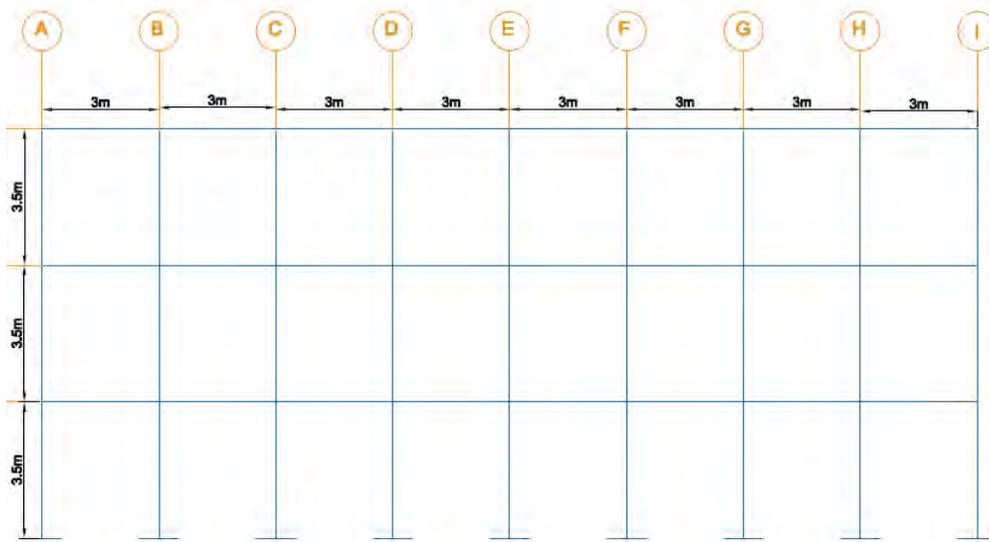
El presente trabajo toma como base tres estructuras diseñadas bajo el reglamento de construcción RCDF-2004, RCDF-1987 y RCDF-1977 para realizar un análisis costo-beneficio en función de la vulnerabilidad sísmica, tales estructuras están ubicadas en la zona IIIa y un factor de comportamiento sísmico $Q=2$ debido al tipo de estructura (GDF, 2004).

La figura 2.1 muestra las diferentes vistas de la estructura que se diseña para demostrar los objetivos del presente proyecto, de forma general es una estructura con 8 crujeas en el sentido x, 1 crujea en el sentido y, y tres niveles.

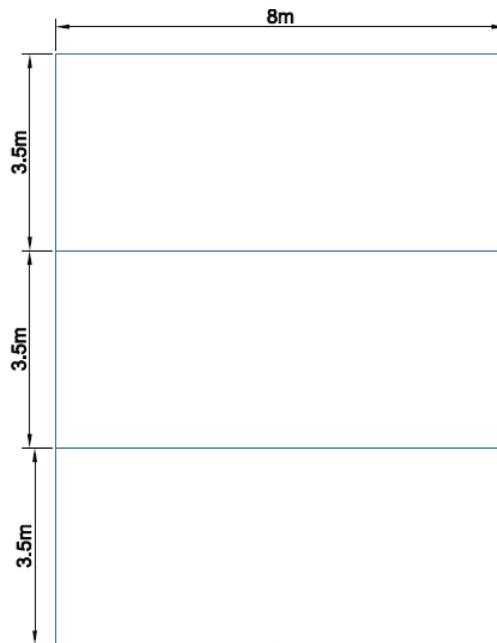


a) Vista en planta

Figura 2.1. a) Vista en planta, b) lateral x, c) lateral y (continua)



b) Vista lateral x



c) Vista lateral y

Figura 2.1. a) Vista en planta, b) lateral x, c) lateral y (continuación)

2.1 Elementos que conforman la estructura

Una estructura es un conjunto de elementos que mantiene una forma cuyo objetivo es la de soportar cargas para un fin específico dentro de la ingeniería civil. Dichos elementos se describen a continuación.

- Vigas. La estructura está basada en vigas con sección rectangular debido a que sus propiedades tanto técnicas como constructivas permiten una mejor adaptación al diseño realizado.
- Columnas. Las secciones óptimas para la estructura están a base de secciones cuadradas debido a la adaptación tanto técnica como constructiva.
- Loza maciza. La aportación de la loza a la resistencia de la estructura es de importancia al momento de elegir la mejor opción para elementos que aporten rigidez a la construcción.

2.2 Carga Muerta

La carga muerta es el resultado de tomar en cuenta los pesos de los distintos elementos estructurales que componen a la escuela (columnas, traveses y loza), para ello se realiza una primera estimación en las dimensiones óptimas a fin de que cumplan con lo establecido en el RCDF (Meli, 1995).

2.3 Carga Viva máxima e instantánea

La carga viva es la que se debe a la operación y uso de la construcción. Esta debe incluir todo lo que no tiene una posición fija y definitiva dentro de la estructura. La carga viva es la principal acción variable que debe considerarse en el diseño.

La carga viva contiene dos características: su variación temporal y su variación espacial.

De la variación temporal podemos establecer dos divisiones de la carga viva: carga viva máxima y carga viva instantánea. La carga viva máxima es usada para la superposición con la carga muerta ya que es la que se espera en la estructura a

lo largo de su vida útil, mientras la carga viva instantánea es usada para la superposición con una acción accidental ya que es la que puede ocurrir en un instante (Meli, 1995).

2.4 Propiedades mecánicas de los materiales

Como ya se describió en el subcapítulo 2.1 una estructura está compuesta de elementos los cuales en conjunto cumplen una funcionalidad, dichos elementos deben cumplir con características que les permitan cumplir con su objetivo por lo que deben estar compuestos de materiales con una determinada consistencia, a continuación describimos los materiales bajo los cuales están conformados los elementos de las estructuras con uso de escuela de este proyecto.

2.4.1 Concreto

La norma NMX-C-155-ONNCCE-2004 define al concreto como el material pétreo artificial obtenido de la mezcla en proporciones determinadas de cemento, agregados, agua y en su caso, aditivos (ONNCCE, 2004).

Propiedades generales del concreto

- **Módulo de compresión:** es la característica que denota su capacidad de esfuerzo último antes de que sufra una deformación, se denota como $f'c$.

$$f'c=250 \text{ kg/cm}^2$$

- **Módulo de elasticidad (E):** es la característica que permite obtener la capacidad de deformación antes de que sufra un daño.

El RCDF establece para su cálculo la siguiente ecuación:

$$E=14,000*\sqrt{f'c} \dots\dots\dots \text{Ec. 2.1}$$

Con la ecuación 2.1 se obtiene un módulo de elasticidad del concreto
 $E=221359.44 \text{ kg/cm}^2$

2.4.2 Acero

La función del acero en una edificación elaborada con concreto armado es soportar los esfuerzos de tensión, complementando así la deficiencia que el concreto tiene ante estos esfuerzos. El comportamiento obtenido con la unión del concreto y el acero es de suma importancia en la construcción de cualquier edificación (Gerdaurcosa, 2005).

Propiedades

- Esfuerzo de fluencia (f_y): es la capacidad última de soportar un esfuerzo antes de que sufra una deformación.

$$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$$

- Módulo de elasticidad (E): Característica que permite obtener la capacidad de deformación antes de que sufra un daño.

$$E = 2 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$$

2.5 Definición de la demanda sísmica

En capítulos anteriores se definió la importancia de los sismos debido a lo que pueden causar si no se les toma en cuenta, por lo que todo Ing. estructurista deberá realizar minuciosos cálculos que permitan contemplar en buena medida lo que las devastadoras fuerzas del sismo pueden provocar en una estructura.

Para entender tales efectos de los sismos y realizar un diseño con altos índices de seguridad, el RCDF estableció un criterio de cálculo para diseñar un espectro de respuesta que permita someter a la estructura a un sismo teórico y mediante el cual se podrá observar el comportamiento de la estructura.

a) Zonificación en el Distrito Federal.

El sismo de 1985 dejó grandes enseñanzas para el pueblo mexicano, entre ellas el de tener un reglamento con mayores índices de seguridad para prevenir este tipo de desastres. Antes de este sismo se aceptaba que el daño más fuerte provocado por un sismo, era en las zonas más cercanas a los lagos de la ciudad de México por el tipo de suelo, zonificación propuesta por Marsal y Mazari (1969). Sin embargo la tragedia que devastó al país entero por el sismo de 1985 nos enseñó que no solo debíamos prestarle atención a las zonas del lago, sino en general a toda la zona pues el suelo puede amplificar o reducir las ondas provocadas por un sismo.

En las normas del RCDF-2004 se le dio importancia principalmente a la zonificación, con el fin de establecer más parámetros de seguridad conforme a la zona de construcción de alguna estructura, dicha zonificación está en función del tipo de suelo de cada región.

El RCDF-2004 establece 3 zonas principales y 4 subzonas de la zona III para fines de diseño sísmico (GDF, 2004).

a.1) Zona I Lomas

Formado por rocas o suelos generalmente firmes que fueron depositados fuera del ambiente lacustre, pero en los que pueden existir, superficialmente o intercalados, depósitos arenosos en estado suelto o cohesivos relativamente blandos. En esta zona, es frecuente la presencia de oquedades en rocas y de cavernas y túneles excavados en suelo para explotar minas de arena (GDF, 2004).

a.2) Zona II Transición

Tiene depósitos profundos a 20 m de profundidad, o menos, y que está constituida predominantemente por estratos arenosos y limo-arenosos intercalados con capas de arcilla lacustre, el espesor de estas es variable entre decenas de centímetros y pocos metros (GDF, 2004).

a.3) Zona III Lago

Integrada por grandes depósitos de arcilla altamente comprensible, separados por capas arenosas con contenido diverso de limo o arcilla. Estas capas arenosas son de consistencia firme a muy dura y de espesores variables de centímetros a varios metros. Los depósitos lacustres suelen estar cubiertos superficialmente por suelos aluviales; es espesor de este conjunto puede ser superior a 50 m (GDF, 2004).

La figura 2.2 muestra la Zonificación para el Distrito Federal publicada en las NTCS-2004 el 6 octubre del 2004 (GDF, 2004).

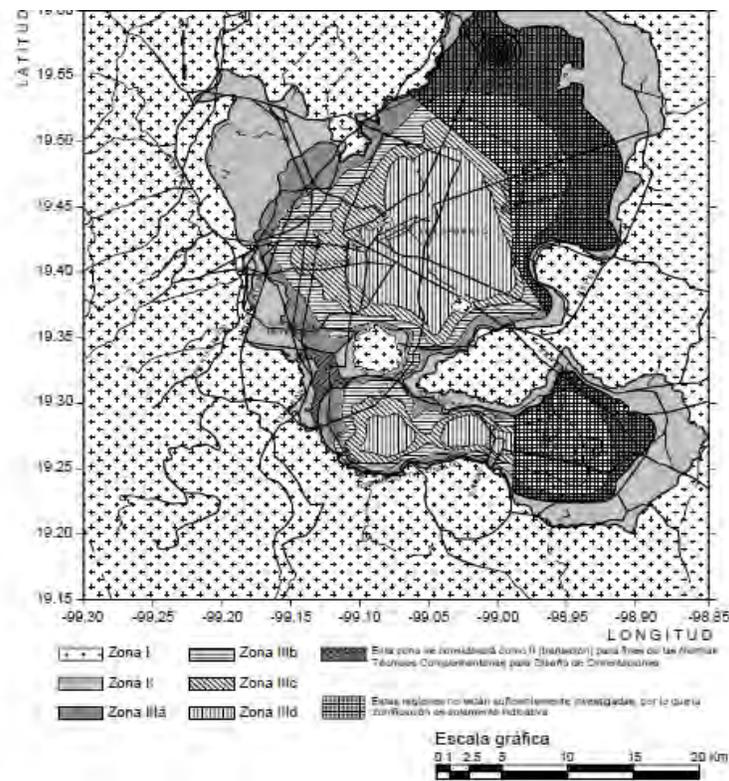


Figura 2.2 Zonificación Sísmica del Distrito Federal (GDF, 2004)

b) Espectro de Respuesta

Los espectros de respuesta fueron inicialmente propuestos por Biot (1935), posteriormente fueron desarrollados por Housner, Newmark y muchos investigadores más (Villafañe, 2002).

El concepto de espectro de respuesta es una herramienta utilizada en la dinámica estructural, y de gran utilidad en el área de diseño sismorresistente. De forma general se puede definir al espectro de respuesta como un gráfico de la respuesta máxima (expresada en términos de desplazamiento, velocidad, aceleración, o cualquier otro parámetro de interés) que produce una acción dinámica determinada en una estructura u oscilador de un grado de libertad. Lo que básicamente se muestra es el periodo o frecuencia contra la respuesta máxima calculada para distintos factores de amortiguamiento (Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 1982).

b.1) Espectro de respuesta inelástica

Representa parámetros de respuesta máximo para un terremoto determinado y usualmente incluyen varias curvas que consideran distintos factores de amortiguamiento, pero a diferencia del espectro de respuesta elástico se asume que el oscilador de una grado de libertad exhibe comportamiento no-lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones de rango plástico por acción del terremoto (Instituto Mexicano del cemento y del concreto, 1982).

2.5.1 Diseño de espectro de respuesta inelástico bajo condiciones de las NTC-2004

Para el reglamento de Construcción de la Ciudad de México establece un criterio que permite realizar el espectro para diseño sísmico.

“Cuando se aplique el análisis dinámico modal, se adoptara como ordenada del espectro de aceleraciones para diseño sísmico, *a*, expresada como fracción de la aceleración de la gravedad, lo que se estipula a continuación” (GDF, 2004).

Ecuaciones para la obtención del espectro de diseño manejadas por las NTCS-2004 (GDF, 2004).

$$a = a_0 + (c - a_0) * \frac{T}{T_a} \quad \text{si } T < T_a \dots\dots\dots \text{Ec. 2.2}$$

$$a = c \quad \text{si } Ta \leq T \leq Tb \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 2.3}$$

$$a = q * c \quad \text{si } T > Tb \quad \dots\dots\dots \text{Ec. 2.4}$$

- ✓ Donde $q = \left(\frac{Tb}{T}\right)^r$.
- ✓ Además Ta y Tb son periodos fundamentales especificados en cada reglamento (para este caso 1977, 1987 y 2004).
- ✓ $T =$ es el periodo fundamental calculado.
- ✓ $a_0 =$ aceleración inicial (valor especificado en cada reglamento).
- ✓ $c =$ coeficiente sísmico con valor especificado en cada reglamento.

2.5.2 Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, RCDF-2004

a) Espectro de respuesta

Las NTCS-2004 establecen un espectro de respuesta que toma en consideración los aspectos manejados en el subtema 2.5, tomando como base las constantes dictaminadas en esas mismas para la construcción gráfica del espectro de diseño.

La tabla 2.1 contiene los coeficientes usados para el espectro de respuesta de diseño sísmico.

Tabla 2.1 Coeficientes para la construcción del periodo de respuesta en el análisis sísmico

Zona	c	a_0	T_a^{-1}	T_b^{-1}	r
I	0.16	0.04	0.2	1.35	1.0
II	0.32	0.08	0.2	1.35	1.33
III _a	0.40	0.10	0.53	1.8	2.0
III _b	0.45	0.11	0.85	3.0	2.0
III _c	0.40	0.10	1.25	4.2	2.0
III _d	0.30	0.10	0.85	4.2	2.0

La figura 2.3 muestra el espectro de respuesta utilizado para el diseño sísmico correspondiente al RCDF-2004, el cual está afectado por un factor de reducción de las fuerzas sísmicas Q' .

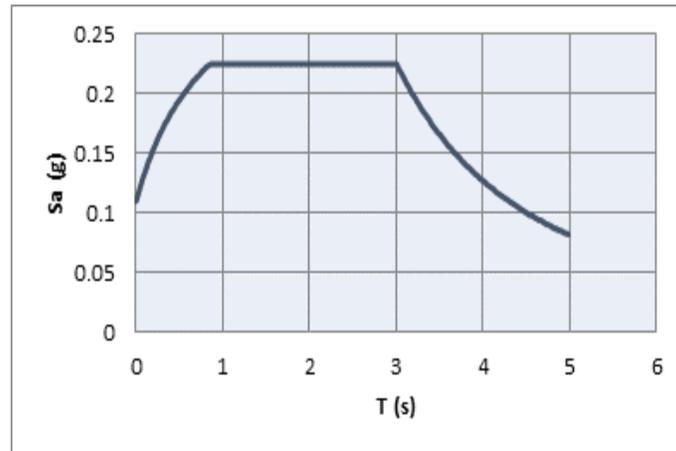


Figura 2.3 Espectro inelástico para diseño sísmico RCDF-2004.

2.5.3 Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, RCDF-1987

a) Espectro de respuesta

Como ya se ha descrito en el diseño de la estructura 2004, la estructura 1987 quedó forjada bajo los parámetros de una zona IIIa, y un factor de comportamiento sísmico $Q=2$.

La figura 2.4 muestra el espectro de respuesta utilizado para el diseño sísmico correspondiente al RCDF-1987, de la misma forma que el espectro de respuesta del 2004, es afectado por un factor de reducción de las fuerzas sísmicas Q' .

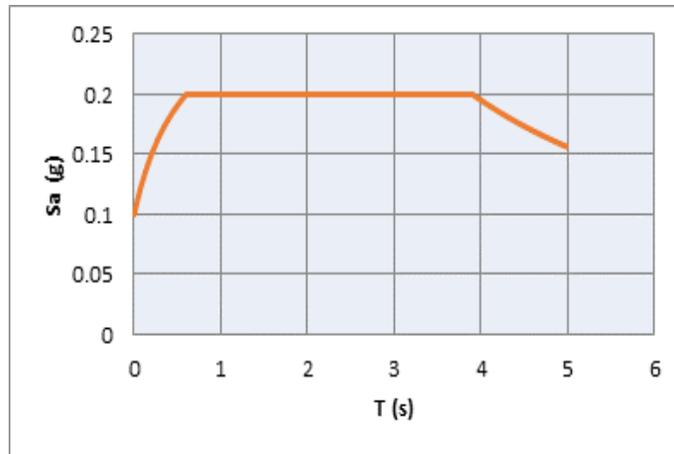


Figura 2.4 Espectro inelástico para diseño sísmico RCDF-1987

2.5.4 Reglamento de construcciones para el Distrito Federal, RCDF-1977

La figura 2.5 muestra el espectro de respuesta utilizado para el diseño sísmico correspondiente al RCDF-1977, el cual es afectado por un factor de reducción de las fuerzas sísmicas Q' .

a) Espectro de respuesta

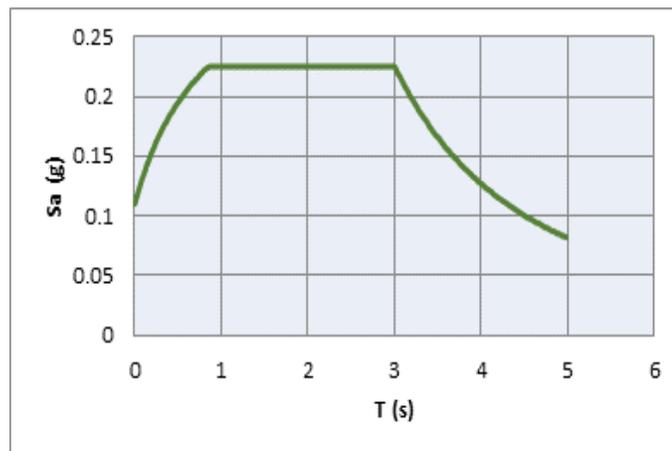


Figura 2.5 Espectro inelástico para diseño sísmico RCDF-1977

2.6 Diseño de elementos estructurales

2.6.1 Acorde al reglamento 2004

El reglamento de construcción del Distrito Federal 2004 publicado el 6 de octubre de 2004 en la gaceta oficial del Distrito Federal tuvo como finalidad establecer una serie de modificaciones a las normas de construcción con el fin de lograr estructuras con mayores índices de seguridad para los distintos tipos de fenómenos que se presentan en la Ciudad (Alcocer, 2008).

Uno de los puntos que se le dio más hincapié es al tema sísmico, ya que esta ciudad tiene un alto índice de sismos registrados cada año, el reglamento tuvo como propósito disminuir la probabilidad de fallas estructurales debido a este fenómeno natural que golpea en cientos de ocasiones al DF.

2.6.1.1 Elementos que conforman la estructura

Como se describe en el tema 2.1 la estructura con uso de escuela se conforma por medio de columnas, vigas y una losa maciza.

Las dimensiones de los elementos estructurales (vigas, columnas) fueron establecidas a través de un análisis modal espectral, tales dimensiones permitieron cumplir con los parámetros que manejan en las NTCS-2004.

2.6.1.2 Masas

Como ya se había descrito, esta tesis se centralizó en el comportamiento sísmico, por lo que la mejor opción fue enfocarse en un sistema de masas en las direcciones x y y.

La tabla 2.2 muestra las masas que se utilizaron sobre cada nodo para el análisis sísmico, resultado del cálculo de la carga muerta y viva.

Tabla 2.2 Masas colocadas en la estructura RCDF-2004. .

Nivel	masa por nodo (kg)
1	1589.9
2	1589.9
3	1239.8

2.6.1.3 Resultados

a) Trabes y Columnas

Como se comentó anteriormente, a través de un análisis modal espectral se establecieron las dimensiones de los elementos tipo trabe y columna, cuyas dimensiones se muestran a continuación.

En la tabla 2.3 se presentan las dimensiones de los elementos estructurales.

Tabla 2.3 Dimensiones de los elementos estructurales

Nivel	elemento	Base	
		(cm)	Peralte (cm)
1	viga en el eje x	40	40
	viga en el eje y	50	55
	Columna	55	55
2	viga en el eje x	40	40
	viga en el eje y	50	55
	Columna	55	55
3	viga en el eje x	40	40
	viga en el eje y	50	55
	Columna	55	55

b) Losa

Debido a que la losa se apoya en sus cuatro lados y la relación largo/ancho es mayo o igual a 2 la losa trabaja en la dirección más corta, por lo que se determinó, debido a esa relación largo/ancho, tomar como base una losa de 14 cm de peralte con la finalidad de que se comportara mejor ante el trabajo unidireccional.

c) Revisión por desplazamientos laterales con el cuerpo del reglamento NTC-2004

Las NTCS-2004 (GDF, 2004) establecen que la diferencia entre desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas cortantes sísmicas divididos entre la altura de entrepiso no debe ser mayor a 0.006.

Los valores de los desplazamientos laterales de entrepisos consecutivos fueron afectados por un factor de seguridad de 1.5 debido al tipo de estructura y el factor de comportamiento sísmico $Q=2$.

La tabla 2.4 muestra el resultado del análisis por desplazamientos que se realizó para la estructura diseñada con el RCDF-2004 (GDF, 2004) y la comparación con los que dictamina ese mismo reglamento. El análisis muestra que cumple para esa revisión.

Tabla 2.4. Desplazamientos

Eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.009	3.5	0.003	0.006	cumple
nivel 1-2	0.013	3.5	0.004	0.006	cumple
nivel 2-3	0.008	3.5	0.003	0.006	cumple

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.011	3.5	0.003	0.006	cumple
nivel 1-2	0.016	3.5	0.005	0.006	cumple
nivel 2-3	0.011	3.5	0.003	0.006	cumple

d) Periodos de vibrar de la estructura

Los periodos de vibrar de la estructura muestran el comportamiento de oscilación que tendrá la estructura ante un fuerza horizontal causad por ejemplo, por un sismo.

La tabla 2.5 muestra 6 periodos fundamentales de vibración cuyo valor más alto pertenece a la crujía en y.

Tabla 2.5. Periodos de vibrar

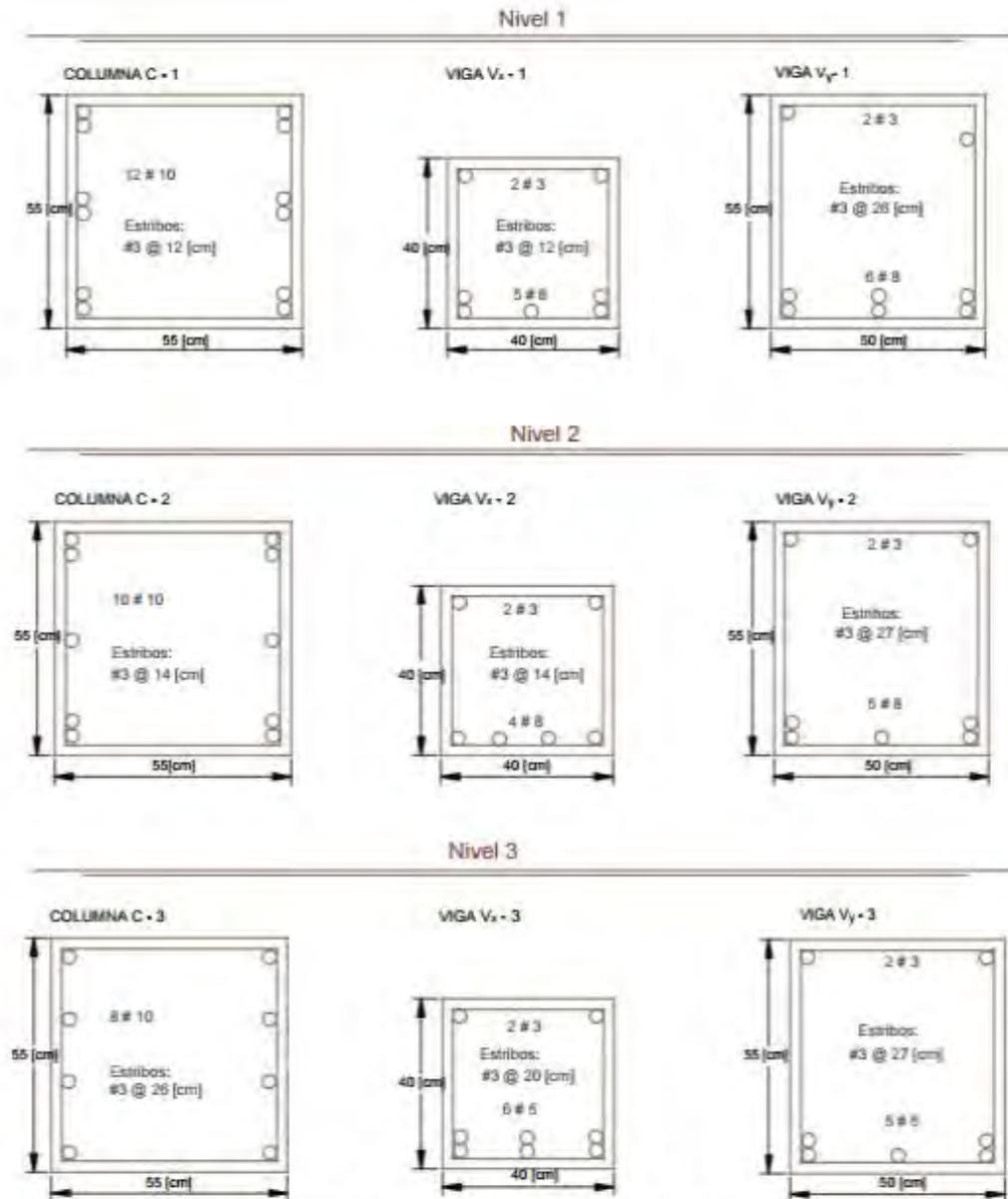
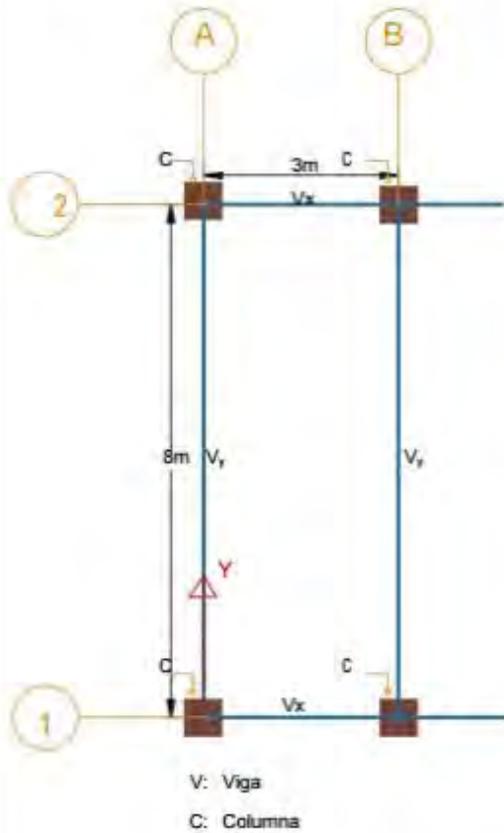
Modo de vibrar	T eje x [s]	T eje y [s]
1		0.44
2	0.41	
3		0.13
4	0.12	
5		0.07
6	0.07	

e) Armados estructurales

La figura 2.6 muestra los armados finales para las columnas y vigas de la estructura diseñada bajo el RCDF-2004, en esta figura se presenta un corte de la vista en planta citada en la figura 2.1, donde todas las vigas en la dirección y (V_y) presentan un mismo armado de acuerdo al nivel en la que se encuentren, como se especifica en la figura 2.6, de igual forma para las vigas en x (V_x) y las columnas C.

El acero utilizado para las columnas se compone de varillas del #10, el número y el arreglo es como se indica en la figura 2.6, mientras que para la viga en y se usó varilla del #8 y del #6 con arreglo y número mostrados en la misma figura. Por último en las vigas en x se utilizaron varilla #8 y #5 con arreglo y número mostrado en la figura 2.6. Para los tres elementos se utilizó acero transversal para resistir el cortante (estribos) compuesto por varillas #3, con separación mostrados en la misma figura.

Corte de la vista en planta



Nota 1. El subíndice en la nomenclatura hace referencia al eje en donde se localiza el elemento (vigas y columnas).

Nota 2. El número que acompaña la nomenclatura hace referencia al nivel en el que se encuentra. Ejemplo: V_x - 2, es la viga en el eje X y en el nivel 2.

Figura 2.6 Armados propuestos.

2.6.2 Acorde al reglamento 1987

El reglamento de construcciones para el Distrito Federal 1977, RCDF-1977 (GDF, 1987), demostró en su aplicación práctica ser un instrumento eficaz para los fines conducentes, sin embargo las experiencias adquiridas durante los sismos ocurridos el 19 y 20 de septiembre de 1985 dieron pausa al surgimiento de un nuevo reglamento que permitiría reducir el riesgo de los habitantes del Distrito Federal (Alcocer, 2008).

El reglamento de construcciones para el Distrito Federal, RCDF-1987 estableció una serie de modificaciones a su predecesor el reglamento de 1977 con la finalidad de dar mejor estabilidad a las estructuras e instalaciones y con ello garantizar un grado óptimo de seguridad.

2.6.2.1 Masas

De forma análoga al diseño en la estructura 2004 se modela una estructura cuyo fin es mostrar el comportamiento sísmico mediante un sistema de masas en la dirección x, y.

La tabla 2.6 muestra el valor de las masas colocadas en la dirección x, y, para el análisis modal espectral empleando el programa SAP2000 (CSI, 2016).

Tabla 2.6. Masas colocadas en la estructura 1987.

Nivel	Masa por nodo (kg)
1	1285.5
2	1285.5
3	1075.2

2.6.2.2 Resultados

a) Trabes y Columnas

Mediante un análisis modal espectral se establecieron las dimensiones de los elementos estructurales para la estructura diseñada bajo el RCDF-1987.

La tabla 2.7 muestra los resultados de las dimensiones de los elementos estructurales (vigas y columnas) para la estructura diseñada bajo el RCDF-1987.

Tabla 2.7 Dimensiones de los elementos estructurales

Nivel	elemento	base (cm)	peralte (cm)
1	viga en el eje x	35	35
	viga en el eje y	45	50
	Columna	50	50
2	viga en el eje x	35	35
	viga en el eje y	45	50
	Columna	50	50
3	viga en el eje x	35	35
	viga en el eje y	45	50
	Columna	50	50

b) Losa

Siguiendo la misma metodología empleada en la estructura diseñada bajo el RCDF-2004 se determinó una losa maciza con un peralte de 14 cm de ancho.

c) Revisión por desplazamientos laterales

El reglamento de 1987 en sus normas técnicas complementarias para diseño sísmico (NTCS-1987), modificó el valor del RCDF-1977 contra el cual se comparaba los desplazamientos laterales, este reglamento estableció que la diferencia entre desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas cortantes sísmicas divididos entre la altura de entrepiso no debe ser mayor a 0.006 (DDF-1987).

Los valores de los desplazamientos laterales de entrepisos consecutivos fueron afectados por un factor de seguridad de 1.5 debido al tipo de estructura y el factor de comportamiento sísmico $Q=2$.

La tabla 2.8 muestra los desplazamientos obtenidos de la estructura diseñada bajo el RCDF-1987 y los permitidos por el mismo reglamento.

Tabla 2.8. Desplazamientos (continua)

Eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.013	3.5	0.004	0.006	cumple
nivel 1-2	0.018	3.5	0.005	0.006	cumple
nivel 2-3	0.012	3.5	0.004	0.006	cumple

Tabla 2.8. Desplazamientos (continuación)

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.013	3.5	0.004	0.006	cumple
nivel 1-2	0.020	3.5	0.005	0.006	cumple
nivel 2-3	0.014	3.5	0.004	0.006	cumple

d) Periodos de vibrar de la estructura

De forma análoga a la estructura 2004, se obtienen los periodos de vibrar para la estructura 1989.

La tabla 2.9 establece los periodos de vibrar obtenidos de la estructura diseñada bajo el RCDF-1987, donde el de mayor valor pertenece al eje y.

Tabla 2.9. Periodos de vibrar.

Modo de vibrar	T eje x (s)	T eje y (s)
1		0.50
2	0.47	
3		0.14
4	0.14	
5		0.08
6	0.07	

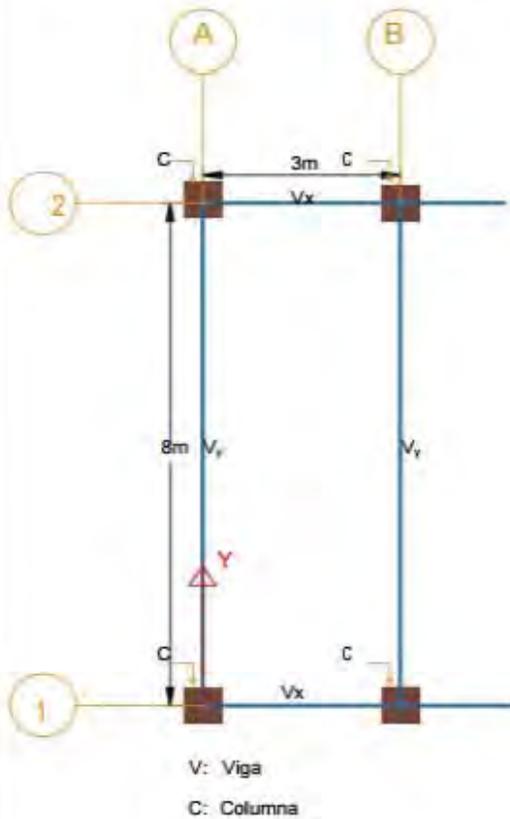
e) Armados estructurales

La figura 2.7 muestra los armados finales para las columnas y vigas de la estructura diseñada bajo el RCDF-1987, en esta figura se presenta un corte de la

vista en planta citada en la figura 2.1, donde todas las vigas en la dirección y (V_y) presentan un mismo armado de acuerdo al nivel en la que se encuentren, como se especifica en la figura 2.7, de igual forma para las vigas en x (V_x) y las columnas C.

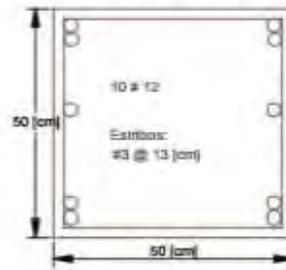
El acero utilizado para las columnas se compone de varillas del #10 y #12, el número y el arreglo es como se indica en la figura 2.7, que para la viga en y se usó varilla del #8 y del #6 con arreglo y número mostrados en la misma figura y por último en las vigas en x se utilizaron varilla #10, #8 y #6 con arreglo y número mostrado en la figura 2.7. Para los tres elementos se utilizó acero transversal para resistir el cortante (estribos), compuestos por varillas #3, con separación mostrados en la misma figura.

Corte de la vista en planta

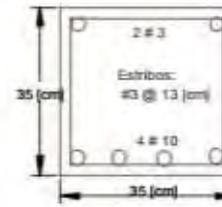


Nivel 1

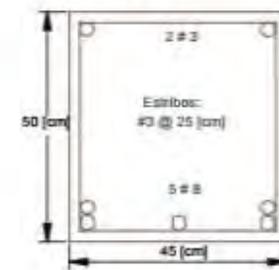
COLUMNA C - 1



VIGA Vx - 1

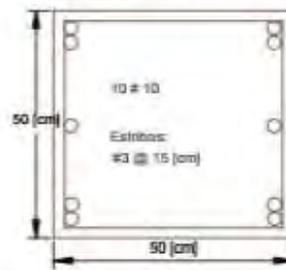


VIGA Vy - 1

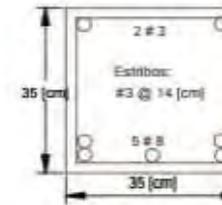


Nivel 2

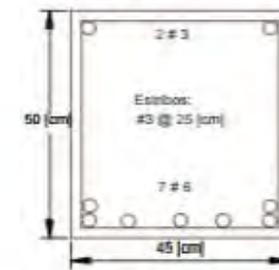
COLUMNA C - 2



VIGA Vx - 2

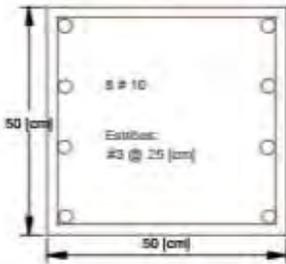


VIGA Vy - 2

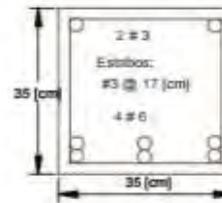


Nivel 3

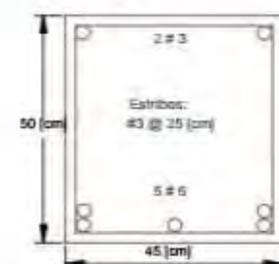
COLUMNA C - 3



VIGA Vx - 3



VIGA Vy - 3



Nota 1. El subíndice en la nomenclatura hace referencia al eje en donde se localiza el elemento (vigas y columnas).

Nota 2. El número que acompaña la nomenclatura hace referencia al nivel en el que se encuentra. Ejemplo, Vx - 2, es la viga en el eje X y en el nivel 2.

2.7 Armados propuestos

2.6.3 Acorde al reglamento 1977

En el reglamento de construcción para el Distrito Federal, RCDF-1977 se establecen los parámetros primordiales que debe guardar una estructura con fines de seguridad sobre todo en la parte sísmica (Alcocer, 2008).

2.6.3.1 Masas

De forma análoga al diseño de la estructura 2004 y 1989.

La tabla 2.10 muestra la masa que se implementó en la dirección x,y para el análisis modal espectral empleando el programa SAP2000 (CSI, 2016).

Tabla 2.10. Masas colocadas en la estructura.

Nivel	Masa por nodo (kg)
1	1116.8
2	1116.8
3	953.2

2.6.3.2 Resultados

a) Trabes y Columnas

Mediante el análisis modal espectral se establecieron las dimensiones de los elementos que componen la estructura.

La tabla 2.11 muestra las dimensiones de los elementos estructurales (vigas y columnas) para la estructura diseñada bajo el RCDF-1977.

Tabla 2.11. Dimensiones de los elementos estructurales

Nivel	Elemento	base (cm)	peralte (cm)
1	viga en el eje x	30	30
	viga en el eje y	30	45
	Columna	45	45
2	viga en el eje x	30	30
	viga en el eje y	30	45
	Columna	45	45
3	viga en el eje x	30	30
	viga en el eje y	30	45
	Columna	45	45

b) Losa

De forma análoga a la estructura del 2004 se establece una losa maciza de 14 cm de espesor.

c) Revisión por desplazamientos laterales

Las normas técnicas complementarias para diseño sísmico (NTCS-1977) establecieron que los desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas cortantes sísmicas divididas entre la altura de entrepiso no deben ser mayor a 0.008 (DDF, 1977).

Los valores de los desplazamientos laterales de entrepisos consecutivos fueron afectados por un factor de seguridad de 1.5 debido al tipo de estructura y el factor de comportamiento sísmico $Q=2$.

La tabla 2.12 muestra los desplazamientos que se obtuvieron de la estructura los cuales se comparan con los permitidos por las NTCS-1977.

Tabla 2.12. Desplazamientos

Eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.013	3.5	0.004	0.008	cumple
nivel 1-2	0.019	3.5	0.005	0.008	cumple
nivel 2-3	0.014	3.5	0.004	0.008	cumple

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.016	3.5	0.004	0.008	cumple
nivel 1-2	0.024	3.5	0.007	0.008	cumple
nivel 2-3	0.019	3.5	0.005	0.008	cumple

d) Periodos de vibrar de la estructura

La tabla 2.13 muestra los periodos de vibrar obtenido a través del análisis modal espectral.

Tabla 2.13. Periodos de vibrar

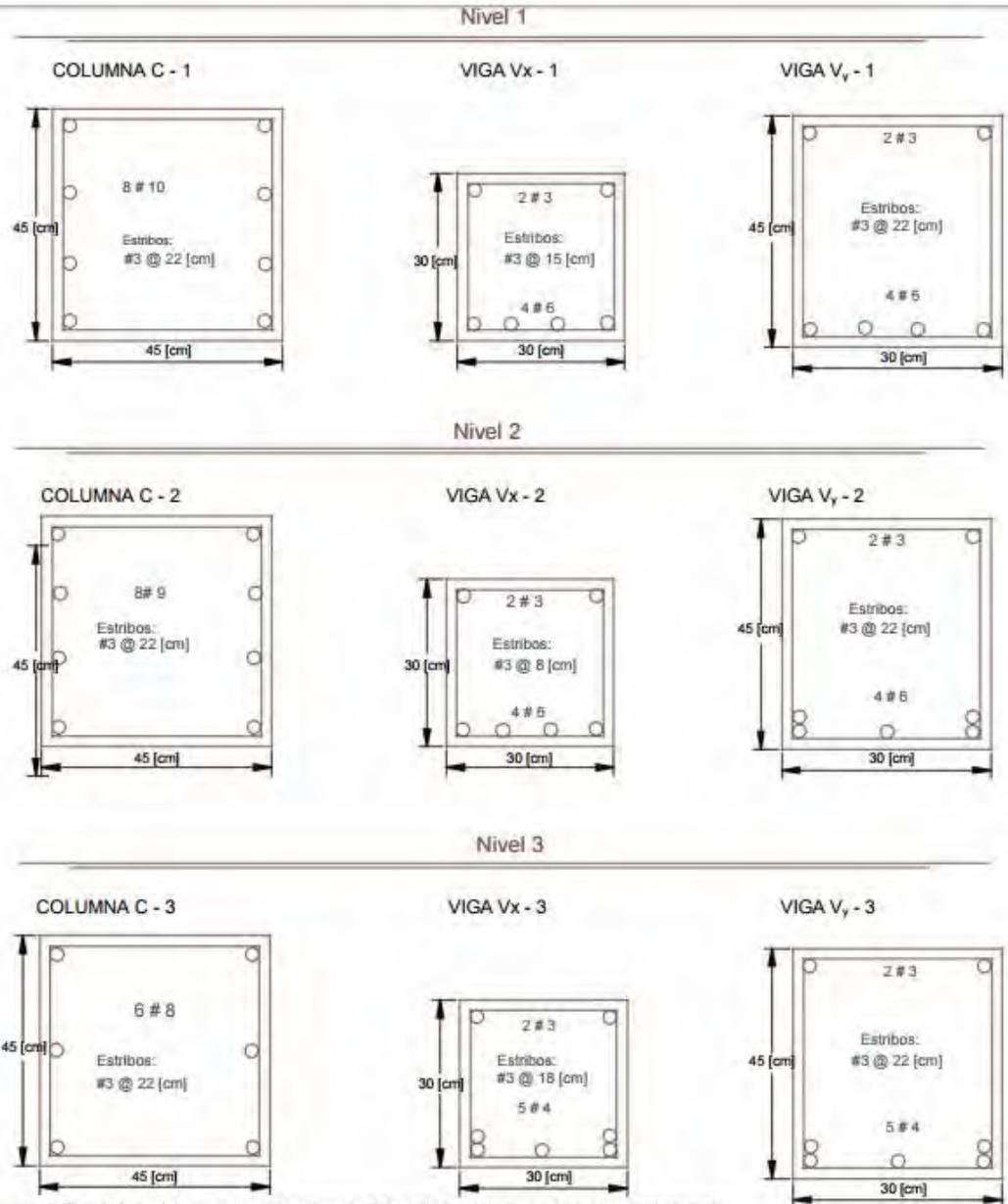
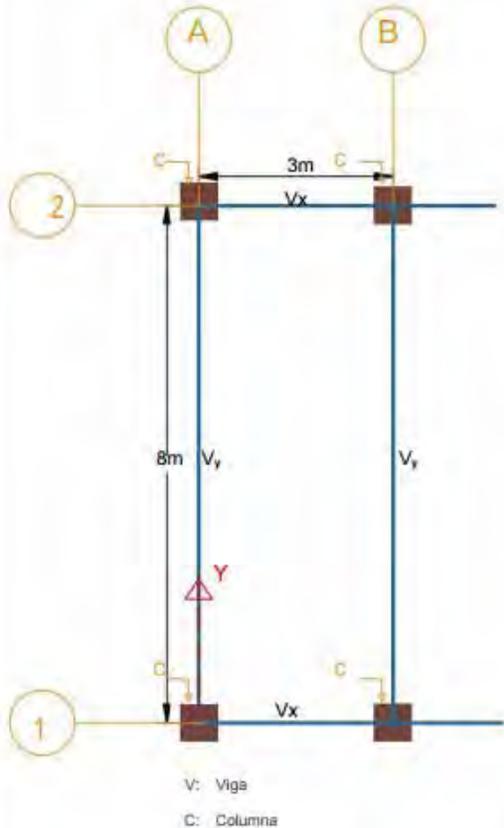
Modo de vibrar	T eje x (s)	T eje y (s)
1		0.62
2	0.57	
3		0.17
4	0.16	
5		0.09
6	0.09	

e) Armados estructurales

La figura 2.8 muestra los armados finales para las columnas y vigas de la estructura diseñada bajo el RCDF-1977, en esta figura se presenta un corte de la vista en planta citada en la figura 2.1, donde todas las vigas en la dirección y (V_y) presentan un mismo armado de acuerdo al nivel en la que se encuentren, como se especifica en la figura 2.8, de igual forma para las vigas en x (V_x) y las columnas C.

El acero utilizado para las columnas se compone de varillas del #10, #9 y #8, el número y el arreglo es como se indica en la figura 2.8, que para la viga en y se usó varillas del #6 y del #4 con arreglo y número mostrados en la misma figura y por último en las vigas en x se utilizaron varillas #6 y #4 con arreglo y número mostrado en la figura 2.8. Para los tres elementos se utilizó acero transversal para resistir el cortante (estribos) compuesto por varillas #3, con separación mostrados en la misma figura.

Corte de la vista en planta



Nota 1. El subíndice en la nomenclatura hace referencia al eje en donde se localiza el elemento (vigas y columnas).
 Nota 2. El número que acompaña la nomenclatura hace referencia al nivel en el que se encuentra. Ejemplo: Vx - 2, es la viga en el eje X y en el nivel 2.

Figura 2.8 armados propuestos

2.7 Costos directos

Uno de los puntos radicales que el trabajo presenta es la factibilidad que tendrá la solución propuesta en función del costo que llevara dicha solución.

El costo directo constituye una parte fundamental del presupuesto, en este se consideran los precios de los materiales, la mano de obra y el precio de la maquinaria y/o equipo que se necesita durante una obra de ingeniería civil (Peurifoy, 1967).

La figura 2.9 muestra la comparación de los costos directos que se obtuvieron para las estructuras diseñadas bajo el RCDF-2004, RCDF-1987 y RCDF-1977 sin rigidizar (originales).

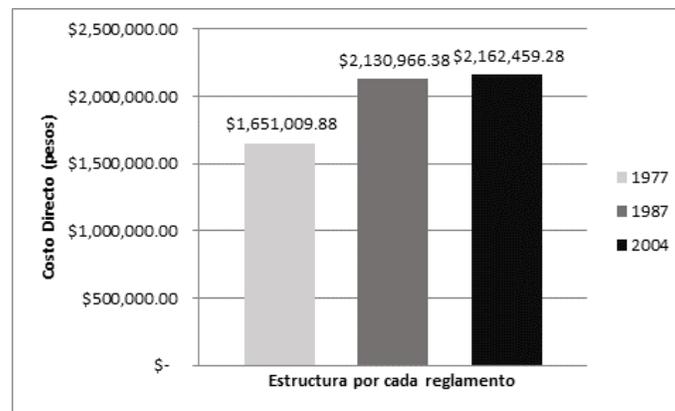


Figura 2.9. Comparación de los Costos Directos obtenidos para cada Estructura.

Podemos observar que la estructura RCDF-1977 demandaba por sus características un menor costo directo, sin embargo luego de las modificaciones al reglamento, la estructura de RCDF-1987 incremento el mismo asimilando en gran medida al que se tiene al realizar una estructura del RCDF-2004.

Es importante mencionar que el costo de la estructura RCDF-2004 es el costo que se generaría en caso de tener que volver a reconstruir una estructura con uso de escuela diseñada bajo los reglamentos RCDF-1977 y RCDF-1987.

Capítulo 3

3 REVISIÓN Y ADECUACIÓN DE LAS ESTRUCTURAS CON LA REGLAMENTACIÓN VIGENTE

El reglamento 2016, próximamente vigente, tendrá la obligación de establecer parámetros que permitan obtener un diseño estructural con mayor índice de seguridad.

Este nuevo reglamento implementará el apéndice que se venía manejando para las NTC-2004.

Es por ello que se somete a las estructuras diseñadas bajo los RCDF-2004, RCDF-1987, y RCDF-1977 con espectro de respuesta reglamentado en las NTCS-2004, y se evalúa con el apéndice de las mismas normas.

3.1 Evaluación estructural 1977 con espectro de respuesta de NTCS-2004

La estructura de 1977 fue diseñada con el fin de que cumpliera con lo establecido en el reglamento de ese mismo año, sin embargo el tiempo ha pasado y diversos sismos han golpeado a la ciudad de México, dejando dolorosas memorias y sobre todo un gran aprendizaje para la ingeniería sísmica mexicana.

La idea principal de este parte radica en ver el comportamiento de las estructuras que aún están construidas bajo el reglamento 1977 con lo que establece el reglamento actual.

a) Análisis por desplazamientos cuerpo NTCS-2004

Mediante el análisis modal espectral se obtuvieron los desplazamientos de entrepisos para finalmente compararlos con los permitidos por el cuerpo de las NTCS-2004.

La tabla 3.1 muestra los desplazamientos obtenidos de la estructura diseñada bajo el RCDF-1977 con el espectro de respuesta del RCDF-2004, los cuales son comparados con el cuerpo de las NTCS-2004.

Tabla 3.1. Desplazamientos

Eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.019	3.5	0.005	0.006	cumple
nivel 1-2	0.028	3.5	0.008	0.006	no cumple
nivel 2-3	0.020	3.5	0.006	0.006	cumple

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.021	3.5	0.006	0.006	no cumple
nivel 1-2	0.034	3.5	0.010	0.006	no cumple
nivel 2-3	0.026	3.5	0.007	0.006	no cumple

Como se puede observar en las tablas, la revisión por desplazamientos bajo lo establecido en el cuerpo de las NTCS-2004 no cumple.

b) Análisis por desplazamientos apéndice NTCS-2004

Las NTCS-2004 establecen que “Las diferencias entre los desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas cortantes sísmicas de entrepiso, calculadas para las ordenadas espectrales reducidas, multiplicadas por el factor $Q \cdot R$ y divididas por la diferencia de elevaciones no será mayor de 0.015” (GDF, 2004)

Donde Q es el factor de comportamiento sísmico con valor=2 y R se calcula mediante.

$$R = \frac{10}{4 + \sqrt{\frac{T}{T_a}}}; \quad \text{si } T \leq T_a \dots\dots\dots \text{Ec. 3.1}$$

$$R = 2; \quad \text{si } T > T_a \dots\dots\dots \text{Ec. 3.2}$$

Donde; T Periodo fundamental obtenido.

Ta periodo característico de los espectros de diseño correspondiente al reglamento de diseño RCDF-2004.

La tabla 3.2 muestra los desplazamientos obtenidos de la estructura diseñada bajo el RCDF-1977 con el espectro de respuesta de las NTCS-2004 los cuales están comparados con el apéndice de las NTCS-2004.

Tabla 3.2. Desplazamientos

Eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.123	3.5	0.035	0.015	no cumple
nivel 1-2	0.183	3.5	0.052	0.015	no cumple
nivel 2-3	0.130	3.5	0.037	0.015	no cumple

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.139	3.5	0.040	0.015	no cumple
nivel 1-2	0.220	3.5	0.063	0.015	no cumple
nivel 2-3	0.167	3.5	0.048	0.015	no cumple

El resultado anterior muestra que los desplazamientos arrojados luego de ser sometida la estructura de 1977 al espectro de respuesta del RCDF-2004, no cumplen con los parámetros del apéndice de las NTCS-2004, en cuestiones de seguridad sísmica.

3.2 Evaluación estructural 1987 con espectro de respuesta de NTCS-2004

De la misma forma que en la estructura de 1977, se somete la estructura diseñada bajo el RCDF-1987 al espectro de respuesta del RCDF-2004 para observar si esta estructura cumple con el reglamento actual.

a) Análisis por desplazamientos cuerpo NTCS-2004

La tabla 3.3 muestra los desplazamientos obtenidos de la estructura diseñada bajo el RCDF-1987 con el espectro de respuesta del RCDF-2004 los cuales son comparados con el cuerpo de las NTCS-2004.

Tabla 3.3. Desplazamientos (continua)

Revisión eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 1	0.013	3.5	0.004	0.006	cumple
nivel 2	0.018	3.5	0.005	0.006	cumple
nivel 3	0.012	3.5	0.003	0.006	cumple

Tabla 3.3. Desplazamientos (continuación)

Revisión eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 1	0.014	3.5	0.004	0.006	cumple
nivel 2	0.021	3.5	0.006	0.006	cumple
nivel 3	0.015	3.5	0.004	0.006	cumple

Los resultados obtenidos muestran que el diseño obtenido en el reglamento 1987 puede cumplir los parámetros exigidos en el cuerpo de las NTCS-2004.

b) Análisis por desplazamientos apéndice NTCS-2004

De forma análoga a la estructura 1977, se procede a calcular los desplazamientos para la estructura diseñada bajo el RCDF-1987 con el espectro de diseño del RCDF-2004 para compararlo con lo que dictamina el apéndice de las NTCS-2004.

La tabla 3.4 muestra los desplazamientos obtenidos de la estructura diseñada bajo el RCDF-1987 con el espectro de respuesta del RCDF-2004 los cuales son comparados con el apéndice de las NTCS-2004.

Tabla 3.4. Desplazamientos (continua)

Eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.051	3.5	0.014	0.015	cumple
nivel 1-2	0.073	3.5	0.020	0.015	no cumple
nivel 2-3	0.049	3.5	0.014	0.015	cumple

Tabla 3.4. Desplazamientos (continuación)

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.055	3.5	0.016	0.015	no cumple
nivel 1-2	0.082	3.5	0.023	0.015	no cumple
nivel 2-3	0.058	3.5	0.017	0.015	no cumple

El comportamiento de la estructura comparado con lo que dictamina el apéndice de las NTCS-2004 para desplazamientos arroja que no cumple.

3.3 Evaluación estructural 2004 con espectro de respuesta de NTCS-2004

Para este caso sabemos que la estructura 2004 cumple con lo que establece el cuerpo de las NTCS-2004 para distorsiones, sin embargo es debido demostrar lo que pasa cuando esta misma estructura se compara a lo que establece el apéndice.

La tabla 3.5 muestra los desplazamientos obtenidos de la estructura diseñada bajo el RCDF-2004 comparados con el apéndice de las NTCS-2004.

Tabla 3.5. Desplazamientos (continua)

Eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.037	3.5	0.011	0.015	cumple
nivel 1-2	0.051	3.5	0.014	0.015	cumple
nivel 2-3	0.033	3.5	0.009	0.015	cumple

Tabla 3.5. Desplazamientos (continuación)

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.042	3.5	0.012	0.015	cumple
nivel 1-2	0.063	3.5	0.018	0.015	no cumple
nivel 2-3	0.044	3.5	0.013	0.015	cumple

Se observa que la estructura 2004 aun diseñada para este reglamento con cuerpo de las NTCS-2004 no cumple con apéndice de las mismas normas en la dirección del marco y.

3.4 Reforzamiento y/o rigidización para cumplir los desplazamientos manejados por las NTC-2004: cuerpo principal y apéndice A

Como ya se ha manejado en capítulos anteriores el reglamento del 2016 entrará en vigor con el apéndice de las NTC-2004, por lo que las estructuras deben cumplir con esos nuevos parámetros.

Por lo que es importante pensar en una solución que permita cumplir con lo que exige el apéndice de las NTCS-2004 pero que además sea una solución integra con las variables técnicas en la mejor disposición, que además sea económica para el cliente y por último que se adapte al medio ambiente sin causar ningún daño.

3.4.1 Soluciones para el reforzamiento

En la ingeniería es de suma importancia contar con alternativas que pueda dar solución a una misma problemática, para ello, el estudio de cada una de las opciones tiene que estar comprendida dentro de un rango técnico, económico y que se pueda adaptar con facilidad al objetivo.

Después de realizar un análisis técnico-económico se dictaminó que la solución más factible para construcciones con uso de escuela eran los tensores a base de acero, ya que es un material con poco peso que no afecta los armados propuestos y tienen una vida útil con mayor alcance.

a) Rigidización estructura 1977 para cumplir distorsiones de cuerpo de las NTCS-2004

La solución para este caso fue rigidizar los marcos de forma simétrica con tensores a base de acero con perfiles L (LI-LD).

La tabla 3.6 muestra las características de los perfiles que se usaron como tensores en la estructura diseñada bajo el RCDF-1977. La figura 3.1 muestra el lugar donde fueron colocados los tensores en la estructura diseñada bajo el RCDF-1977.

Tabla 3.6. Perfiles de los tensores usados

propiedad	L eje y	L eje x	dimensiones
Designación	76x64x9.5	64x64x6.4	mm
Área	12.4	7.68	(cm ²)
W (peso)	9.8	6.1	kg/m

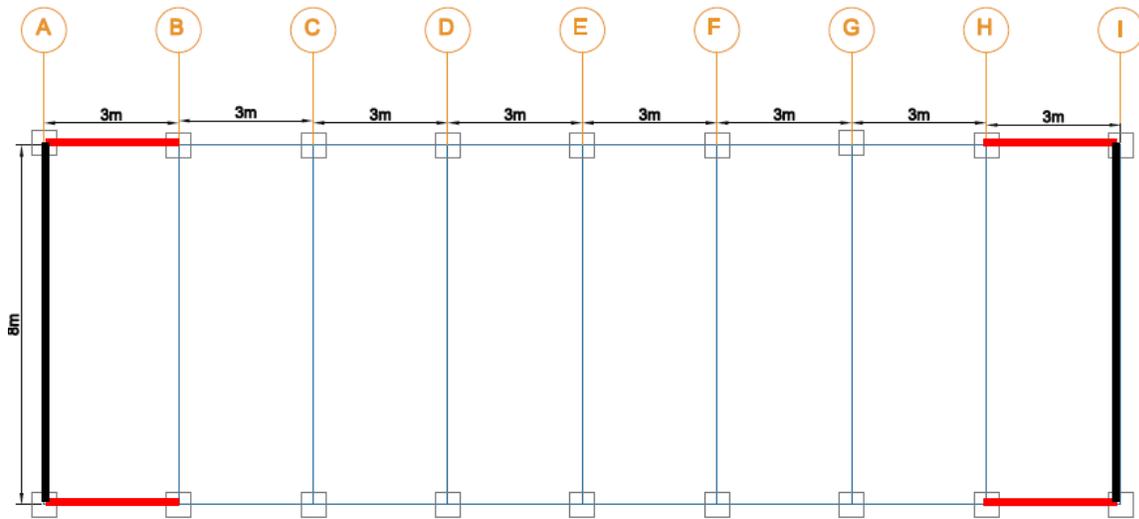


Figura 3.1 Vista en planta de la colocación de sensores tipo L.

.Una vez colocados los sensores se obtuvieron las distorsiones de entrepiso para observar su nuevo comportamiento.

La tabla 3.7 muestra los nuevos desplazamientos obtenidos luego de que se rigidizara la estructura diseñada bajo el RCDF-1977 comparados con los que dicta las NTCS-2004.

Tabla 3.7. Desplazamientos (continua)

Eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.014	3.5	0.004	0.006	cumple
nivel 1-2	0.018	3.5	0.005	0.006	cumple
nivel 2-3	0.012	3.5	0.004	0.006	cumple

Tabla 3.7. Desplazamientos (continuación)

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.016	3.5	0.005	0.006	cumple
nivel 1-2	0.021	3.5	0.006	0.006	cumple
nivel 2-3	0.014	3.5	0.004	0.006	cumple

Por lo tanto la estructura 1977 rigidizada cumple ya con las distorsiones manejadas por el cuerpo de las NTCS-2004

b) Rigidización estructura 1977 para cumplir distorsiones del Apéndice de las NTCS-2004

De la misma forma que se estableció una solución para cumplir las distorsiones del cuerpo de las NTCS-2004, se colocaron tensores a base de acero tipo L (LL-LD) para cumplir el apéndice de las NTCS-2004.

La tabla 3.8 muestra las características de los perfiles que se usaron como tensores en la estructura diseñada bajo el RCDF-1977.

La disposición de los tensores es como se muestra en la figura 3.1

Tabla 3.8. Perfiles de los tensores usados

Propiedad	L eje y	L eje x	dimensiones
Designación	102x102x12.7	76x76x11.1	Mm
Área	24.2	15.7	(cm ²)
W (peso)	19	12.4	kg/m

La tabla 3.9 muestra los nuevos desplazamientos obtenidos luego de que se rigidizara la estructura diseñada bajo el RCDF-1977 comparados con los que dicta el apéndice de las NTCS-2004.

Tabla 3.9. Desplazamientos

Eje x					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.035	3.5	0.010	0.015	cumple
nivel 1-2	0.043	3.5	0.012	0.015	cumple
nivel 2-3	0.030	3.5	0.009	0.015	cumple

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.039	3.5	0.011	0.015	cumple
nivel 1-2	0.046	3.5	0.013	0.015	cumple
nivel 2-3	0.028	3.5	0.008	0.015	cumple

Con los tensores elegidos se puede cumplir con lo que marca, en cuestión de seguridad sísmica, el apéndice de las NTCS-2004.

c) Rigidización estructura 1987 para cumplir distorsiones de apéndice de las NTCS-2004

De forma análoga a lo realizado con la estructura 1977 se analizaron opciones para establecer una solución de carácter técnico-económico que permita cumplir con las distorsiones manejadas por el apéndice de las NTCS-2004, ya que a diferencia de lo que paso con la estructura 1977, la estructura 1987 cumplió con distorsiones permitidas en cuerpo de las NTCS-2004, no así en apéndice de las mismas normas.

La solución radica en tensores con perfil tipo L (LI-LD). La tabla 3.10 muestra las características de los perfiles que se usaron como tensores en la estructura diseñada bajo el RCDF-1987.

Tabla 3.10. Perfiles de los tensores usados

propiedad	L eje y	L eje x	dimensiones
Designación	64x64x9.5	51x51x9.5	Mm
Área	11.2	8.77	(cm ²)
W (peso)	8.7	7	kg/m

La figura 3.2 muestra el lugar donde fueron colocados los tensores en la estructura diseñada bajo el RCDF-1987.

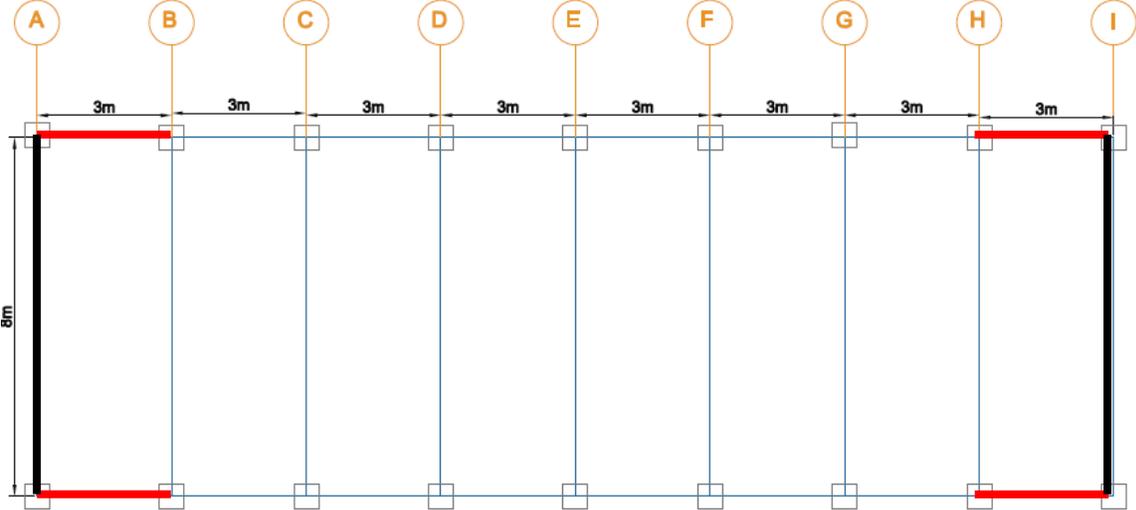


Figura 3.2. Vista en planta de la colocación de tensores tipo L.

De forma análoga a la estructura diseñada bajo el RCDF-1977 se obtuvieron los nuevos desplazamientos para la estructura diseñada bajo el RCDF-1987 rigidizada.

La tabla 3.11 muestra los desplazamientos obtenidos luego de que se rigidizara la estructura diseñada bajo el RCDF-1987 comparados con los que dicta el apéndice de las NTCS-2004.

Tabla 3.11. Desplazamientos

Eje x					
Nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.035	3.5	0.010	0.015	cumple
nivel 1-2	0.045	3.5	0.012	0.015	cumple
nivel 2-3	0.029	3.5	0.008	0.015	cumple

Eje y					
nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.042	3.5	0.012	0.015	cumple
nivel 1-2	0.055	3.5	0.015	0.015	cumple
nivel 2-3	0.036	3.5	0.010	0.015	Cumple

Los resultados arrojan que con los tensores colocados es posible cumplir con lo que establece el apéndice de las NTCS-2004 para distorsiones.

d) Rigidización estructura 2004 para cumplir distorsiones de cuerpo de las NTCS-2004

El diseño de la estructura 2004 cumplió con las distorsiones manejadas por el cuerpo de las NTCS-2004, sin embargo luego de someter esa misma estructura a lo que dice el apéndice de las mismas normas no cumplió por distorsiones.

Lo anterior nos da una importante observación la cual no hace pensar que las estructuras que se han venido construyendo para el RCDF 2004 quizá no cumplan con lo que manejará el reglamento del 2016 próximamente en vigor.

Entonces de forma análoga a las estructuras 1977 y 1987 la solución es rigidizar a base de tensores de acero tipo L (LI-LD).

La tabla 3.12 muestra las características de los perfiles que se usaron como tensores en la estructura diseñada bajo el RCDF-2004. La figura 3.3 muestra el lugar donde fueron colocados los tensores en la estructura diseñada bajo el RCDF-2004.

Tabla 3.12. Perfiles de los tensores usados

propiedad	L eje y	dimensiones
Designación	64x51x9.5	mm
Área	10	(cm ²)
W (peso)	7.9	kg/m

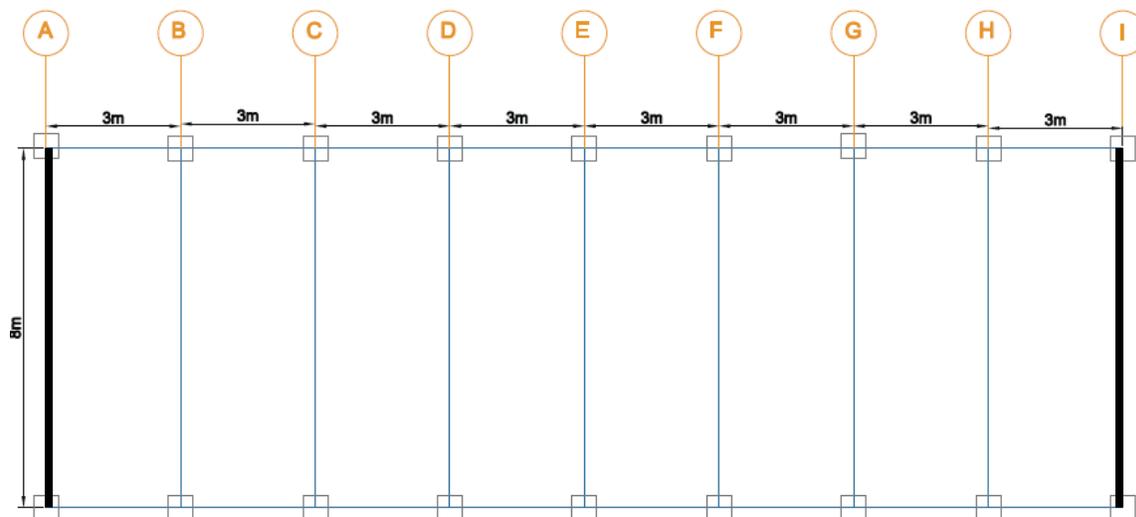


Figura 3.3. Vista en planta de la colocación de tensores tipo L.

En este caso la estructura 2004 solo registro tensores en el eje y debido a que en este eje fue el único que no cumplió las distorsiones del apéndice de las NTCS-2004.

La tabla 3.13 muestra los desplazamientos obtenidos luego de que se rigidizara la estructura diseñada bajo el RCDF-2004 comparados con los que dicta el apéndice de las NTCS-2004.

Tabla 3.13. Desplazamientos

Eje x					
Nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.036	3.5	0.010	0.015	cumple
nivel 1-2	0.049	3.5	0.014	0.015	cumple
nivel 2-3	0.032	3.5	0.009	0.015	cumple

Eje x					
Nivel	Desplazamientos [m]	Hi [m]	Distorsión [1]	Distorsión permitida [1]	Sol
nivel 0-1	0.031	3.5	0.009	0.015	cumple
nivel 1-2	0.042	3.5	0.012	0.015	cumple
nivel 2-3	0.028	3.5	0.008	0.015	Cumple

El resultado es que con esta modificación, la estructura 2004 ya cumple con las distorsiones manejadas en el apéndice de las NTCS-2004

Capítulo 4

4 VULNERABILIDAD ESTRUCTURAL

La vulnerabilidad de una estructura es definida como el grado de pérdida de un elemento o grupo de elementos bajo riesgo, resultado de la probable ocurrencia de un evento de la naturaleza, para este caso un sismo.

Algunos autores mencionan que es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su comportamiento, la cual se da como resultado de la predisposición intrínseca de un elemento o un grupo de elementos expuesto a ser afectado o ser susceptible a sufrir daño, dicha característica puede ser medida en porcentaje.

La vulnerabilidad está definida en función de dos términos de vital importancia: la afectación y el daño que puede tener una estructura. El nivel de daño depende del comportamiento en general de la estructura y de cada uno de los elementos que la conforman, así como de las cargas a soportar, calidad de los materiales, su configuración y su capacidad de resistencia. En la actualidad existen herramientas que permiten predecir el nivel de daño estructural desde un punto de vista cuantitativo, las cuales se fundamentan bajo las: distorsiones de piso, deformación de los elementos, demanda de ductilidad entre otras características, sin embargo aún no existe un criterio unificado por lo que la búsqueda de la vulnerabilidad se vuelve un problema complejo (Clough, 1975).

Para este proyecto la vulnerabilidad sísmica es la parte fundamental, ya que con esta daremos paso a un análisis costo-beneficio. Es por ello que se obtiene la vulnerabilidad sísmica para las estructuras diseñadas bajo el RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004, posteriormente se hace lo mismo con las estructuras diseñadas bajo los mismos reglamentos pero ya con los elementos tipo tensores que le dieron rigidez y que le permitieron cumplir con lo establecido en el apéndice de las NTCS-2004, y finalmente se comparan para establecer una conclusión, tomando también en cuenta el costo directo de cada estructura.

Cabe destacar que la vulnerabilidad estructural tendrá una importancia relativa, para el caso de las estructuras con uso de escuelas que estamos analizando son

estructuras con gran ocurrencia de personas por lo cual la vulnerabilidad toma vital importancia a fin de prevenir pérdidas humanas.

4.1 Estimación de la respuesta y daño de las escuelas diseñadas acorde a los reglamentos 2004, 1987 y 1977.

Es de suma importancia obtener estimaciones de un riesgo sísmico, por ello se debe evaluar la vulnerabilidad sísmica de los elementos expuestos. Edificaciones con gran ocurrencia, como en el caso de la estructura con uso de escuela de este proyecto, se le debe prestar mucha atención al riesgo al que está expuesta ante un sismo, con ello elaborar un plan de contingencia que permita reducir el daño y eventos catastróficos.

Las curvas de vulnerabilidad permiten estimar la probabilidad de exceder un determinado estado límite de daño cuando se produce una determinada acción sísmica.

Debido a lo citado en el párrafo anterior se emplea una forma de calcular el riesgo sísmico de una edificación, la cual utiliza como base primordial el obtener curvas de vulnerabilidad y predecir el daño para eventuales intensidades sísmicas.

En la actualidad podemos establecer 4 criterios que permiten establecer los resultados de vulnerabilidad de una estructura, los cuales se muestran en la figura 4.1.

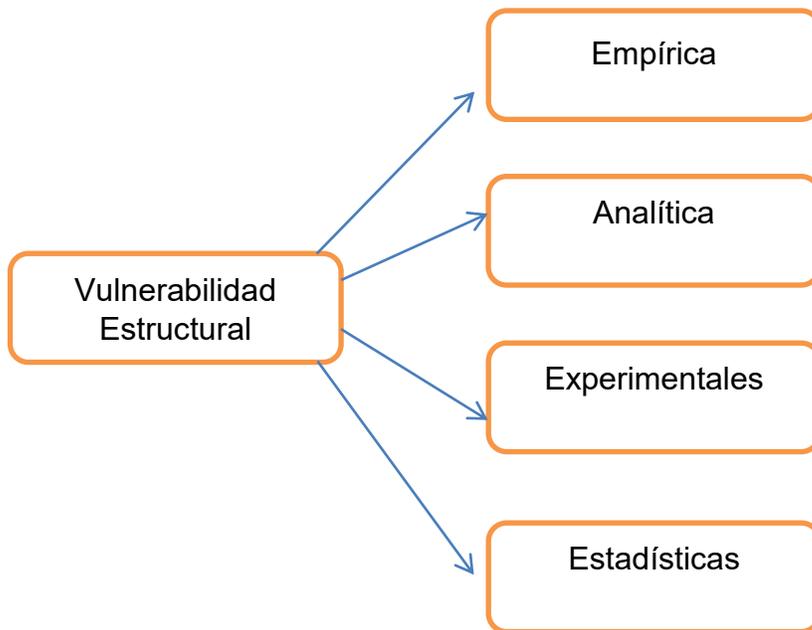


Figura 4.1 Métodos para obtener la vulnerabilidad estructural (Ramírez y Niño, 2004)

Para el presente trabajo se maneja el criterio analítico, con la ejecución de análisis dinámicos incrementales (IDA, por sus siglas en inglés).

El análisis incremental dinámico es una metodología propuesta por Vamvatsikos y Cornell (2002). Su objetivo es definir una curva mediante la relación de nivel de intensidad con la respuesta sísmica máxima posible de la estructura (Pérez y Anny, 2007)

Metodología

La figura 4.2 muestra la metodología usada para obtener las curvas IDA en el presente proyecto.

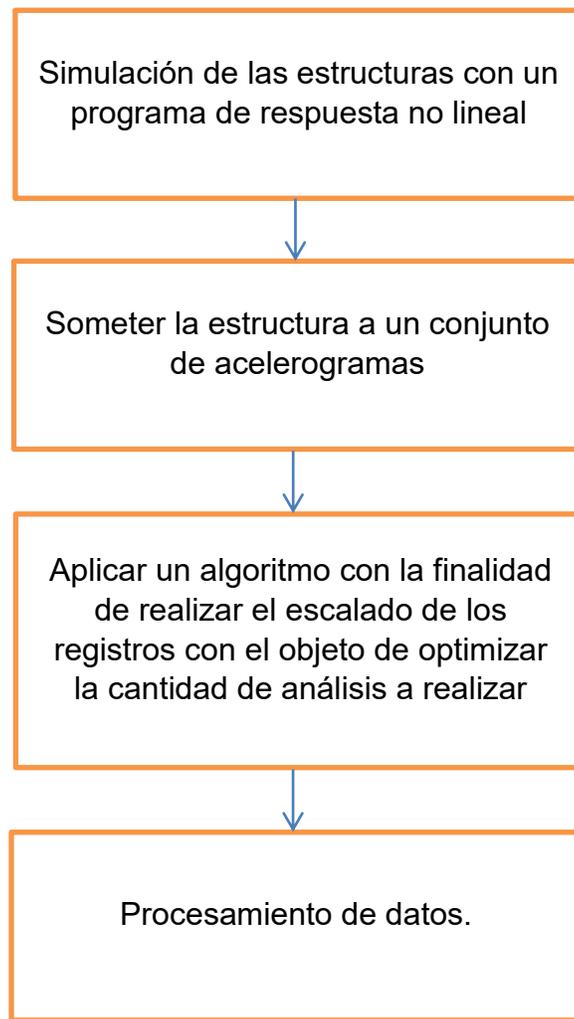


Figura 4.2 Metodología

Para la obtención de las curvas IDA se emplearon 98 registros sísmicos reales obtenidos en la zona de suelo blando del Distrito Federal. Los registros empleados se muestran en la tabla 4.1, donde el nombre está compuesto por la estación, fecha y dirección de registro. Estos registros han sido empleados por otros autores para la definición de la respuesta estructural en zonas de suelo blando (Ruiz-García y Miranda, 2008).

Tabla 4.1 Registros sísmicos del Distrito Federal

REGISTRO	REGISTRO	REGISTRO	REGISTRO	REGISTRO
AL140995EW	CO101294EW	PE140995EW	ROMCS241093EW	TL250489EW
AL140995NS	CO101294NS	PE140995NS	ROMCS241093NS	TL250489NS
AL250489EW	CO140995EW	ROD250489EW	SCT101294EW	UC241093EW
AL250489NS	CO140995NS	ROD250489NS	SCT101294NS	UC241093NS
BA101294EW	CUPJ140995EW	ROM101294EW	SCT190985EW	UC250489EW
BA101294NS	CUPJ140995NS	ROM101294NS	SCT190985NS	UC250489NS
BA241093EW	GA101294EW	ROM140995EW	SCT241093EW	VG250489EW
BA241093NS	GA101294NS	ROM140995NS	SCT241093NS	VG250489NS
BL101294EW	GA140995EW	ROM250489EW	SI250489EW	VM241093EW
BL101294NS	GA140995NS	ROM250489NS	SI250489NS	VM241093NS
BL250489EW	JA101294EW	ROMAS101294EW	TL101294_2EW	VM250489EW
BL250489NS	JA101294NS	ROMAS101294NS	TL101294_2NS	VM250489NS
CA101294EW	JA140995EW	ROMBS101294EW	TL101294EW	XP101294EW
CA101294NS	JA140995NS	ROMBS101294NS	TL101294NS	XP101294NS
CA250489EW	JA241093EW	ROMBS140995EW	TL140995_2EW	XP241093EW
CA250489NS	JA241093NS	ROMBS140995NS	TL140995_2NS	XP241093NS
CJ140995EW	JA250489EW	ROMBS241093EW	TL140995EW	XP250489EW
CJ140995NS	JA250489NS	ROMBS241093NS	TL140995NS	XP250489NS
CJ250489EW	LI250489EW	ROMCS140995EW	TL241093EW	
CJ250489NS	LI250489NS	ROMCS140995NS	TL241093NS	

4.1.1 Curvas de vulnerabilidad para estructuras de un nivel.

Como precedente de este trabajo se tiene la referencia del trabajo realizado por Ramírez y Niño (2014) donde calculan la vulnerabilidad estructural para una misma estructura de un nivel, 1 crujía en el lado y, y 8 crujías en el lado x, diseñada bajo los reglamentos RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004.

La figura 4.3 muestra la comparación de la vulnerabilidad obtenida para las tres estructuras de un nivel, se puede observar que la estructura diseñada bajo el reglamento RCDF-1977 es la que muestra un mayor daño ante una intensidad sísmica, mientras que la estructura diseñadas bajo el reglamento RCDF1987 muestra menos daño comparado con la estructura RCDF-1977, siendo la estructura RCDF-2004 con el menor daño ante una intensidad sísmica dada.

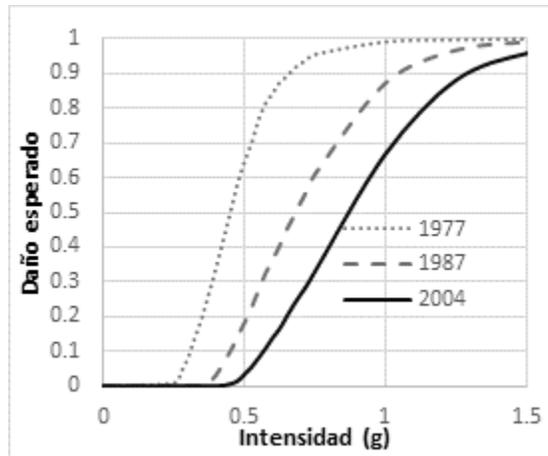


Figura 4.3 Comparación de curvas de vulnerabilidad para un nivel.

4.1.2 Curvas de vulnerabilidad para estructuras de tres niveles.

En esta tesis se emplea la información obtenida por Ramírez y Niño (2014), con la finalidad de establecer curvas de vulnerabilidad para las estructuras diseñadas bajo los reglamentos RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF2004 tanto originales como rigidizadas de tres niveles y predecir el funcionamiento de una estructura tipo escuela ante un eventual sismo.

Es importante recalcar que esta investigación permitirá observar la influencia en la vulnerabilidad estructural de pisos subsecuentes.

Definidas las estructuras RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004 originales se procede a calcular las curvas IDA mediante el software Drain-2DX empleando un comportamiento inelástico considerado dentro del programa como tipo 02, el cual maneja un comportamiento histórico bilineal estable.

La figura 4.4 se puede observar como la estructura diseñada bajo el RCDF-1977 adopta un mayor daño ante una intensidad sísmica menor, mientras que las estructuras diseñadas bajo el RCDF-1987 y RCDF-2004 aceptan un daño similar para una misma intensidad dada, a diferencia de un la estructura de un nivel, la

estructura RCDF-1987 adopta un daño similar a la estructura RCDF-2004 debido a sus propiedades mecánicas y de armado.

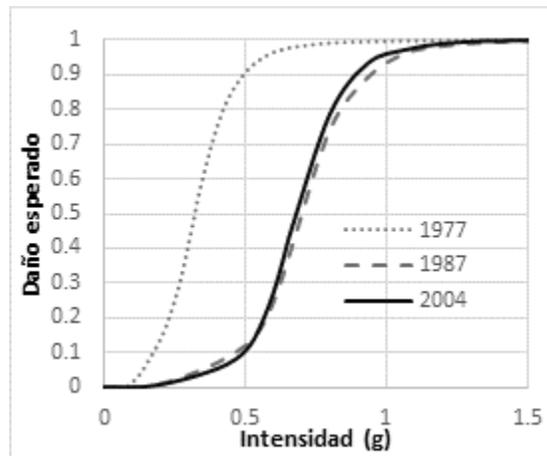


Figura 4.4 Comparación de curvas de vulnerabilidad obtenidas.

4.2 Estimación de la respuesta y daño de las escuelas modificadas acorde al reglamento 2004: apéndice A.

En el sub-capítulo anterior se estimó el daño asociado a la intensidad de un sismo en unidades de **g (gravedad)** para cada una de las estructuras diseñadas bajo los reglamentos RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004 mismas en las cuales se demostró que sometiénolas al espectro de respuesta del RCDF-2004 no cumplían para distorsiones del apéndice de las NTCS-2004, por lo que en este capítulo se analizará esas mismas estructuras ya con los elementos que le dieron rigidez y que les permitieron cumplir las distorsiones permitidas por el apéndice de las NTCS-2004 con el fin de observar su comportamiento y su daño estructural.

De la misma forma que para las estructuras anteriores, el cálculo se realizara por medio del criterio analítico, con la ejecución de análisis dinámicos incrementales.

Las estructuras RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004 se rigidizaron por medio de tensores a base de acero con el objeto de cumplir las distorsiones manejadas por el apéndice de las NTCS-2004, mismas estructuras que se analizaron mediante el software Drain-2DX empleando un comportamiento inelástico

considerado dentro del programa como tipo 02, el cual maneja un comportamiento histérico bilineal estable.

Por medio de los registros citados en la tabla 4.1 se obtuvieron las curvas IDA.

De forma análoga a las estructuras de la sección 4.1.1 y siguiendo la misma metodología se obtuvieron las curvas de vulnerabilidad.

La figura 4.5 muestra la vulnerabilidad de las estructuras RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004 rigidizadas, se puede observar que la estructura RCDF-1977 modificada presente un mayor daño, mientras que para las estructuras RCDF-1987 y RCDF-2004 modificadas presentan un daño similar ante una intensidad sísmica dada.

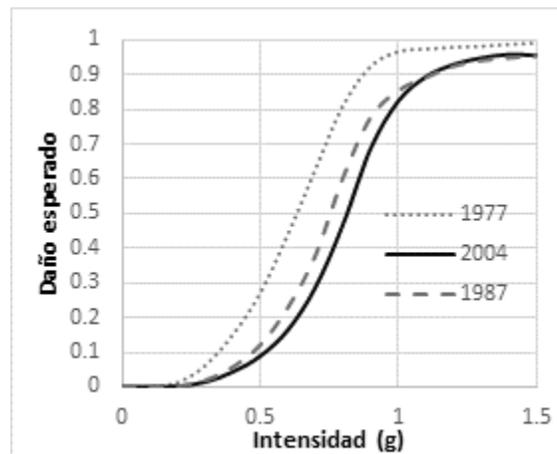


Figura 4.5. Comparación de curvas de vulnerabilidad obtenidas.

Capítulo 5

5 ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO EN FUNCIÓN DEL DAÑO ESPERADO

La ingeniería civil es una ciencia que establece criterios técnicos para la solución de una o varias problemáticas pero, ¿Qué tan factibles son esas soluciones?

Es importante que un ingeniero civil estudie diferentes alternativas a fin de cumplir con un objetivo en especial ya que de ellas se obtendrá la mejor, es decir, que no solo cumpla con la parte técnica, sino que también la factibilidad en función del costo y del beneficio que puede traer esa solución a la problemática planteada.

El análisis costo beneficio-beneficio lleva consigo la siguiente metodología

- Identificar los beneficios y el costo de la solución.
- Cuantificar los beneficios en términos monetarios para realizar una comparación entre dos alternativas.
- Identifique que la relación beneficio entre costo es mayor a la unidad.

Para este trabajo se identifican los costos, beneficios, y se comparan mediante el impacto económico, término que se define en párrafos posteriores.

5.1 Costo directo sobre la rigidización de las estructuras 1977, 1987 y 2004.

En el subcapítulo 2.7 establecimos el costo directo que tendrá la estructura al ser construida bajo los diseños de los Reglamentos de construcción del Distrito Federal año 1977, 1987 y 2004. En este capítulo estableceremos el aumento de ese costo directo al rigidizar las estructuras.

La solución que proponemos a base de tensores de acero permite que las estructuras diseñadas no se les aumenten carga representativa que modifique los armados establecidos, sin embargo la instalación de ellos tiene que ser por especialistas en el tema de tensores lo cual impacta en el costo directo de las estructuras. La figura 5.1 muestra el costo directo por la construcción de las estructuras diseñadas bajo el RCDF-2004, RCDF-1987 y RCDF-2004, mientras que la figura 5.2 muestra el costo directo de los tensores usados para rigidizar a las mismas estructuras.

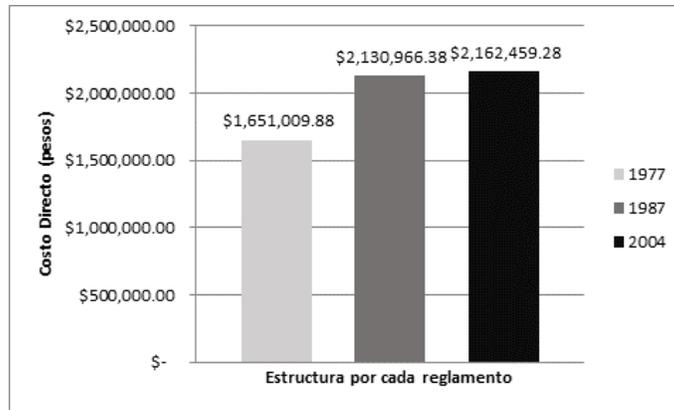


Figura 5.1. Costo directo de la estructuras RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004.

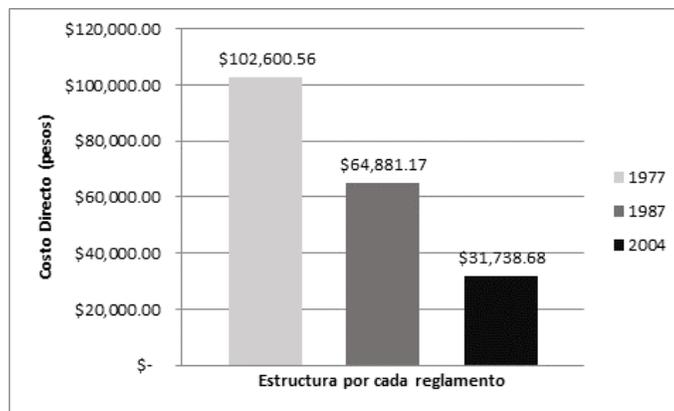


Figura 5.2. Costo directo de los tensores

Podemos observar que la estructura diseñada bajo el RCDF-1977 presenta un mayor costo directo en los tensores que le aportan rigidez debido a que se necesitan tensores con mejores características, mientras que para la estructura del RCDF-1987 y RCDF-2004 el costo directo va disminuyendo siendo esta última la que necesita de tensores con menor costo directo.

5.2 Impacto de rigidizar las estructuras RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004 sobre la vulnerabilidad estructural.

Al momento se ha demostrado que los tensores fueron una solución factible desde el punto de vista económico y técnico ya que con ellos fue posible cumplir con las distorsiones que maneja las NTCS-2004 en cuanto a seguridad se refiere.

Es preciso entonces realizar un análisis que nos permita demostrar cual es el impacto que se tiene al colocar dichos tensores a las estructuras RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004 sobre la vulnerabilidad estructural.

a) Estructura diseñada bajo el RCDF-1977.

La figura 5.3 muestra la comparación del daño esperado para la estructura RCDF-1977 original y rigidizada, podemos observar que el 30% de daño esperado se alcanza con una intensidad de 0.38 de ***g* (gravedad)** para la estructura original, mientras que para la estructura rigidizada con los tensores, ese mismo daño estructural se alcanza con 0.52 de ***g***, si continuamos con el análisis nos damos cuenta que el 50% de daño se alcanza con aproximadamente 0.46 de ***g*** para la estructura original y con 0.66 de ***g*** para la estructura rigidizada.

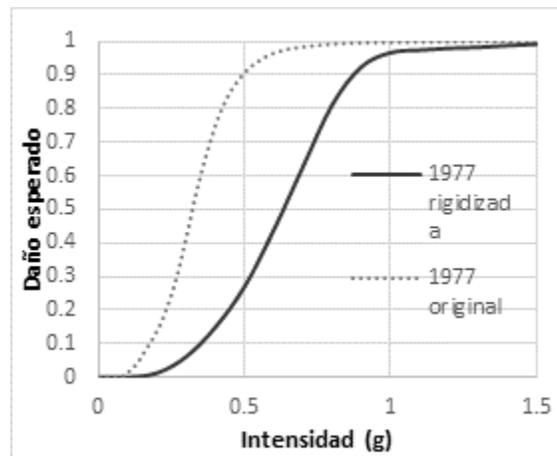


Figura 5.3. Comparación estructura RCDF-1977 original y rigidizada.

a.1) Conclusiones obtenidas para estructura 1977.

- De forma general se obtiene que con el incremento del costo directo en \$102,600.56 debido a los tensores, la estructura RCDF-1977 aumentamos la seguridad estructural en aproximadamente un 20% de ***g***.
- Para la estructura RCDF-1977 original se alcanza un 30% de daño estructural con de 0.38 de ***g* (gravedad)**, lo que significa que si esa

intensidad de sismo se alcanza el impacto sobre la estructura es de un 30% en su costo directo citado en la sección 2.7.

$$\text{Impacto económico} = \% \text{daño} * (\text{Costo Directo}) \dots \text{Ec. 5.1}$$

Por lo tanto mediante la ecuación 5.1 establecemos que el impacto económico sobre la estructura RCDF-1977 con un índice de daño del 30% es de \$495,302.96.

- Para la estructura RCDF-1977 rigidizada el daño alcanzado con 0.38 de **g (gravedad)**, es apenas el 10%. De forma análoga podemos establecer el impacto económico sobre esta estructura con el daño alcanzado.

$$\text{Impacto económico} = \% \text{daño} * (\text{Costo Directo} + \text{tensores}) \dots \text{Ec. 5.2}$$

Con la ecuación 5.2 se puede establecer que el impacto económico debido al 10% de daño esperado es de \$175,361.04.

- Es preciso recalcar que debido a la comparación del impacto económico para las estructuras originadas con las estructuras rigidizadas, concluimos que es conveniente rigidizar las estructuras debido a que se reduce el impacto económico con las estructuras RCDF-1977 rigidizadas.

Retomando el trabajo de Ramírez y Niño (2014) es preciso comparar el impacto sobre la vulnerabilidad estructural al considerar la estructura de un nivel y una estructura con niveles mayores a la unidad para ver su influencia.

Podemos observar en la figura 5.4 que el daño esperado es más alto ante una misma intensidad sísmica para la estructura con tres niveles que para la de un nivel.

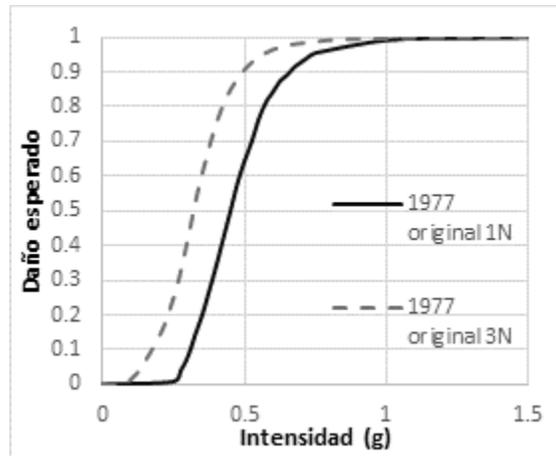


Figura 5.4. Comparación estructura RCDF-1977 uno y tres niveles.

b) Estructura RCDF-1987.

De forma análoga la figura 5.5 muestra la comparación del daño esperado para la estructura RCDF-1987 original y rigidizada, podemos observar que el 30% de daño esperado se alcanza con una intensidad de 0.56 de **g (gravedad)** para la estructura original, con los tensores ese mismo daño estructural se alcanza con 0.66 de **g**, si continuamos con el análisis nos damos cuenta que el 50% de daño se alcanza con aproximadamente 0.66 de **g** para la estructura original y con 0.76 de **g** con tensores.

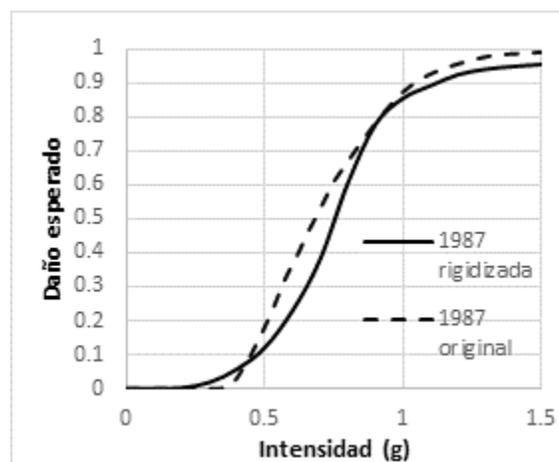


Figura 5.5. Comparación estructura RCDF-1987 original y rigidizada.

b.1) Conclusiones obtenidas para estructura 1987.

- De forma general se obtiene que con el incremento del costo directo en \$64,881.17 debido a los tensores, la estructura RCDF-1987 aumentamos la seguridad estructural en aproximadamente un 10% de ***g***.
- Para la estructura RCDF-1987 original se alcanza un 30% de daño estructural con de 0.56 de ***g (gravedad)***. Mediante la ecuación 5.1 se calcula el impacto económico el cual nos da un valor de \$639,289.91.
- Para la estructura RCDF-1987 rigidizada el daño alcanzado con 0.56 de ***g (gravedad)*** es de 18%. Con la ecuación 5.2 se establece el impacto económico sobre esta estructura con el daño alcanzado, el cual nos arroja un valor de \$395,252.56.
- Con base en la comparación del impacto económico para las estructuras originadas con las estructuras rigidizadas, se establece que es conveniente rigidizar las estructuras debido a que se reduce el impacto económico con las estructuras RCDF-1987 rigidizadas, además de tener en cuenta que se aumenta la seguridad sísmica.

De forma análoga a la estructura RCDF-1977 se realiza la comparación entre la estructura RCDF-1987 de uno y tres niveles, con el fin de observar el impacto a la vulnerabilidad estructural de niveles subsecuentes.

La figura 5.6 muestra dos puntos importantes en los cuales la intensidad ***g*** afecta de distinta forma a las estructuras, es decir hasta 0.45 de ***g*** el daño esperado es mayor para la estructura de tres niveles, mientras que de 0.45 hasta 0.72 de ***g*** aproximadamente, el daño esperado es mayor para la estructura de 1 nivel, esto debido a las propiedades mecánicas y al armado estructural que se está empleando. Posterior a ese valor el daño esperado es mayor para la estructura de 3 niveles.

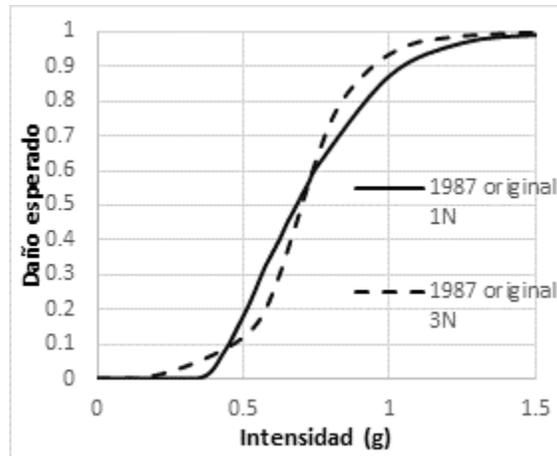


Figura 5.6. Comparación estructura RCDF-1987 uno y tres niveles.

c) Estructura RCDF-2004.

La figura 5.7 muestra la comparación del daño esperado para la estructura RCDF-2004 original y rigidizada, podemos observar que el 30% de daño esperado se alcanza con una intensidad de 0.60 de **g** (**gravedad**) para la estructura original, con los tensores ese mismo daño estructural se alcanza con 0.70 de **g**, si continuamos con el análisis nos damos cuenta que el 50% de daño se alcanza con aproximadamente 0.68 de **g** para la estructura original y con 0.80 de **g** con tensores.

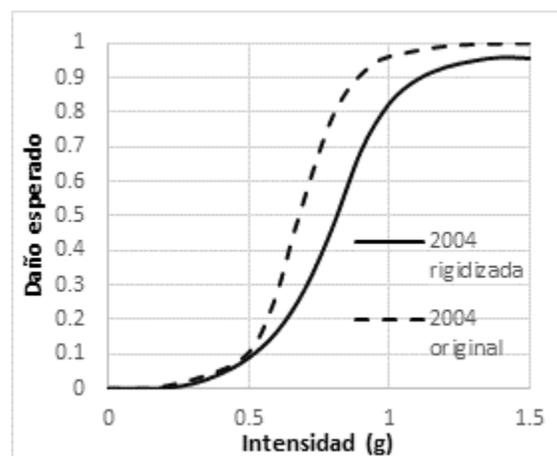


Figura 5.7. Comparación estructura RCDF-2004 original y rigidizada.

c.1) Conclusiones obtenidas para estructura 2004.

- Concluimos que con el incremento del costo directo en \$31,738.68 debido a los tensores, la estructura RCDF-2004 aumentamos la seguridad estructural en aproximadamente un 10% de ***g***.
- Para la estructura RCDF-2004 original se alcanza un 30% de daño estructural con de 0.60 de ***g (gravedad)***. De forma análoga a las estructuras anteriores se calcula el impacto económico mediante la ecuación 5.1 el cual nos da un valor de \$648,737.78.
- Para la estructura RCDF-2004 rigidizada el daño alcanzado con 0.60 de ***g (gravedad)*** es de 20%. Mediante la ecuación 5.2 se establece el impacto económico sobre esta estructura con el daño alcanzado, el cual nos arroja un valor de \$438,839.59.
- Con base en la comparación del impacto económico para las estructuras originadas con las estructuras rigidizadas, se establece que es conveniente rigidizar las estructuras debido a que se reduce el impacto económico con las estructuras RCDF-2004 rigidizadas, además de tener en cuenta que se aumenta la seguridad sísmica.

De igual forma observemos la influencia de pisos subsecuentes sobre la vulnerabilidad estructural, la figura 5.8 muestra que de forma similar a la estructura RCDF-1977, la estructura RCDF-2004 adopta más daño con tres niveles ante una intensidad sísmica dada.

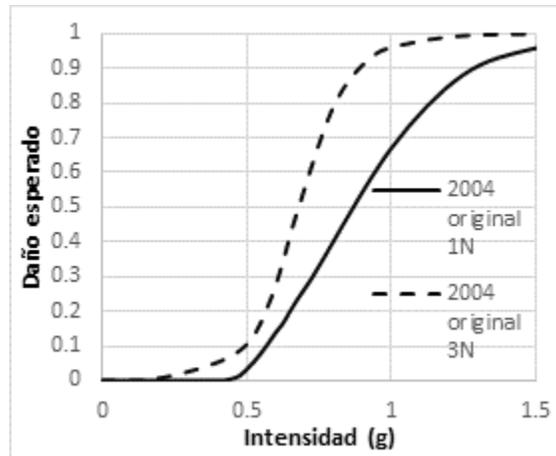


Figura 5.8. Comparación estructura RCDF-2004 uno y tres niveles.

5.3 Análisis costo beneficio de las estructuras rigidizadas RCDF-1977 y RCDF-1987 comparado con la estructura RCDF-2004 original.

Como ya se ha venido manejando en capítulos anteriores, el objetivo de este proyecto es establecer una conclusión acerca que cual es la mejor opción entre rigidizar escuelas diseñadas bajo los reglamentos RCDF-1977 y RCDF-1987, o bien reconstruirlas bajo un diseño reglamentado con el RCDF-2004, mediante el análisis costo beneficio en función de la vulnerabilidad sísmica.

Es por ello que en este subcapítulo se realiza el análisis costo beneficio de las estructuras RCDF-1977 y RCDF-1987 rigidizadas, y la estructura RCDF-2004 original.

La figura 5.9 muestra la comparación entre las curvas de vulnerabilidad sísmica para las estructuras RCDF-2004 original contra las estructuras RCDF-1987 y RCDF-1977 rigidizadas. Se puede observar que el daño esperado para la estructuras RCDF-1977 rigidizada es mayor que la del RCDF-2004 original, mientras que pasa lo contrario con la estructura RCDF-1987 rigidizada ya que adquiere un menor daño comparado con el que recibe la estructura RCDF-2004 original.

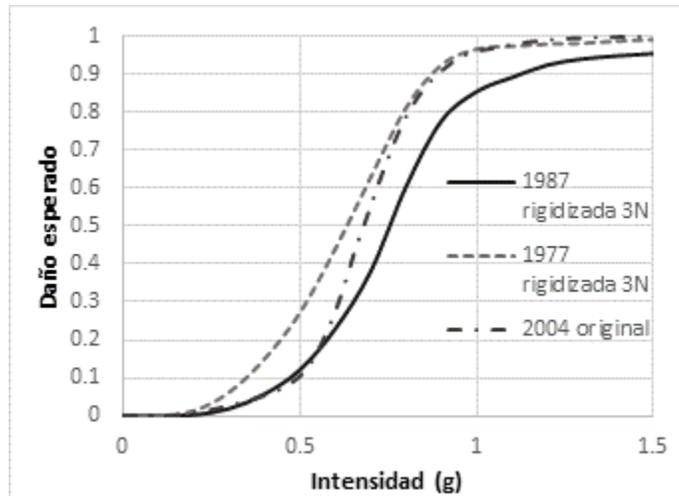


Figura 5.9 Comparación estructura RCDF-2004 original versus RCDF-1987 y RCDF-1977 rigidizadas.

a) Estructura RCDF-1977 rigidizada versus Estructura RCDF-2004 original

Si tomamos como referencia un índice de daño de 30%, observamos en la gráfica 5.9 que la estructura RCDF-1977 rigidiza lo alcanza con 0.54 de **g**, con ese mismo valor de **g** se observa que la estructura RCDF-2004 original alcanza un índice de daño de 15%. Calculando su impacto económico mediante las ecuaciones 5.1 y 5.2.

Estructura RCDF-2004 original

$$\text{Impacto económico} = \$324,368.89$$

Estructura RCDF-1977 rigidizada.

$$\text{Impacto económico} = \$526,083.13$$

Se demuestra que para una misma intensidad **g** se adquiere un índice de daño mayor en la estructura RCDF-1977 rigidizada y por lo tanto desde el punto de vista económico se tiene un mayor impacto. Es decir se estaría perdiendo más, desde el punto de vista económico, al rigidizar una estructura diseñada bajo el RCDF-1977 que al reconstruirla bajo el diseño del RCDF-2004.

b) Estructura RCDF-1987 rigidizada versus Estructura RCDF-2004 original

De forma análoga al inciso a), tomamos como referencia un índice de daño del 30% el cual es alcanzado con un valor de 0.66 de **g** para la estructura RCDF-1987 rigidizada, con ese mismo valor de **g** observamos en la figura 5.9 que el daño esperado para la estructura RCDF-2004 es del 42%. Calculando el impacto económico mediante las ecuaciones 5.1 y 5.2 tenemos que:

Estructura RCDF-2004 original

$$\text{Impacto económico}=\$908,232.90$$

Estructura RCDF-1987 rigidizada.

$$\text{Impacto económico}=\$658,754.27$$

Se observa que bajo una misma intensidad de **g** se alcanza un mayor daño en la estructura RCDF-2004 lo cual se refleja en su impacto económico. Es preciso concluir que es más factible rigidizar una escuela diseñada bajo el RCDF-1987 que reconstruirla bajo el diseño del RCDF-2004.

Capítulo 6

6 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las estructuras tipo escuela son construcciones que deben tener grandes índices de seguridad ya que cuentan con gran ocurrencia poblacional, por lo que es debido realizar un análisis estructural de las mismas y detectar las fallas que se tienen y con base en eso proponer una solución que sea viable tanto técnico como económico. A continuación se enuncian las conclusiones obtenidas en este trabajo:

- Es importante tomar medidas de seguridad para que las escuelas diseñadas bajo el RCDF-1977 cumplan con los parámetros de distorsión de las NTCS-2004 tanto para cuerpo como para apéndice.
- Las estructuras diseñadas bajo los reglamentos RCDF-1987 y RCDF-2004 cumplen con lo establecido para distorsiones del cuerpo de las NTCS-2004 pero no lo hacen para apéndice por lo que se debe tomar una medida que modifique esas estructuras con tal de que cumplan con lo establecido y que tenga mayores índices de seguridad.
- Los tensores resultaron ser una solución viable ya que permitieron que las escuelas construidas bajo el RCDF-2004, RCDF-1987 y RCDF-1977 cumplieran para distorsiones que manejan las NTCS-2004.
- El análisis costo-beneficio realizado demostró que es factible rigidizar las escuelas diseñadas bajo el RCDF-1987, mientras que para las escuelas diseñadas bajo el RCDF-1977 es mejor reconstruirlas bajo el diseño del RCDF-2004.

REFERENCIAS

Alcocer S. M. y Castaño V. M. (2008), "Evolution of codes for structural design in Mexico", Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Querétaro, Mexico.

Villaverde R. (2009), "Fundamental Concepts of Earthquake Engineering", CRC Press

McCormac J. y Elling R. E. (1994), "Estructuras, análisis y diseño, Métodos clásico y matricial", Alfaomega.

Reinoso E. (1997), "Riesgo Sísmico de la Ciudad de México", ai México, Especialidad: Ingeniería civil.

Meli R 1995, "Diseño Estructural", Limusa noriega editores, México.

GDF, Gobierno del Distrito Federal (2004a), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", Gaceta Oficial del Distrito Federal.

CFE 1993., "MANUAL DE DISEÑO POR SISMO", México D.F.

www.gerdaucorsa.com.mx/articulos/Construccion_Compuesta.pdf

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto A.C. (1982), "diseño de estructuras resistentes a sismos".

Peurifoy R.L. (1967), "Estimación de los costos de construcción", Editorial diana.

DDF, Departamento del Distrito Federal (1987), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", Gaceta Oficial del Departamento Distrito Federal.

DDF, Departamento del Distrito Federal (1977), "Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto", Gaceta Oficial del Departamento del Distrito Federal,

www.disaster-info.net/edan/publicaciones/Fundamentos/FundamentosCap2.pdf

Ramírez D. y Niño M. (2014), “Evolución de la vulnerabilidad estructural tomando como base las normas técnicas complementarias para diseño por sismo del reglamento de construcciones para el df”.

Torres A. (2008), “Zonificación sísmica de la zona metropolitana, usando técnicas de análisis no lineal”.

Villafañe E. (2002), “Espectros de respuesta y de diseño” Universidad Nacional de Cuyo, Facultad de Ingeniería.

Vielma J., Anny A. y Barrios A. (2001), “Determinación de curvas de fragilidad mediante análisis incremental dinámico”, ASAAE, Asociación sudamericana de ingeniería estructural.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C. (2004), “Normas para el concreto reforzado”.

Sociedad Mexicana de Ingeniería estructural SMIE, 2004.

Ruiz G. y Miranda (2009), “Registros sísmicos en suelo blando del Distrito Federal”.

Andreas J y Dimitrakopoulos (2006), “Feasibility of pre-earthquake strengthening of buildings based on cost-benefit and life-cycle cost analysis, with the aid of fragility curves”, Nat Hazards.

Kappos J., Stylianidis K., y pitilakis K. (1998), “Development of Seismic Risk Scenarios Based on a Hybrid Method of Vulnerability Assessment”, Nat Hazards.

CSI (2016), “Modelado y Dimensionamiento de Edificios”

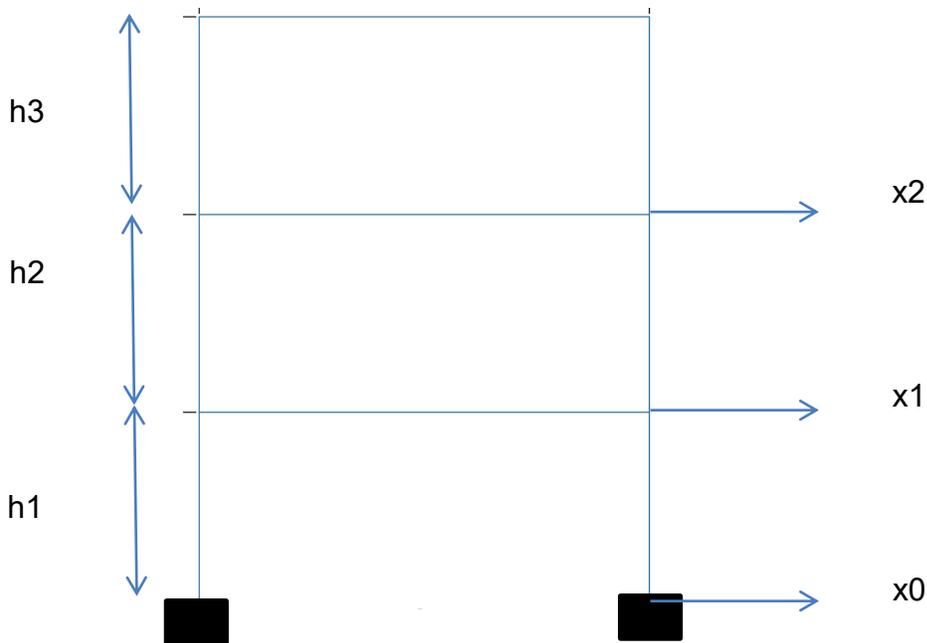
UNAM (2006), “El análisis costo-beneficio y el presupuesto del programa”.

ANEXOS

ANEXO 1

Calculo de las distorsiones de entrepiso.

“Las diferencias entre los desplazamientos laterales de pisos consecutivos producidos por las fuerzas cortantes sísmicas de entrepiso no excederán 0.006 veces la diferencia de elevaciones correspondientes” RCDF-2004



El párrafo anterior basado en lo dictaminado por el reglamento establece que:

$$\left(\frac{X_i - X_{(i-1)}}{h_i}\right) \leq 0.006 \quad (1)$$

Donde X_i es el desplazamiento en el piso i , $X_{(i-1)}$ es el desplazamiento en un piso anterior a él, y h_i es la altura entre estos dos pisos.

La ecuación 1 se usa para calcular las distorsiones de entrepiso, es misma ecuación debe ser afectada por el factor de comportamiento sísmico Q , y un factor debido al tipo de estructura en el caso del presente trabajo correspondiente un factor igual a 1.5.

$$\left(\frac{X_i - X_{(i-1)}}{h_i}\right) * Q * F_s \leq 0.006 \quad (2)$$

Donde Q es el factor de comportamiento sísmico y F_s es el factor de seguridad debido al tipo de estructura.

ANEXO 2

Curvas IDA para las estructuras RCDF-2004, RCDF-1987 y RCDF-1977 rigidizadas.

Mediante un análisis no lineal por medio del software Drain2DX se obtuvieron las curvas IDA. La figura A2.1 muestra las curvas IDA para las estructuras rigidizadas.

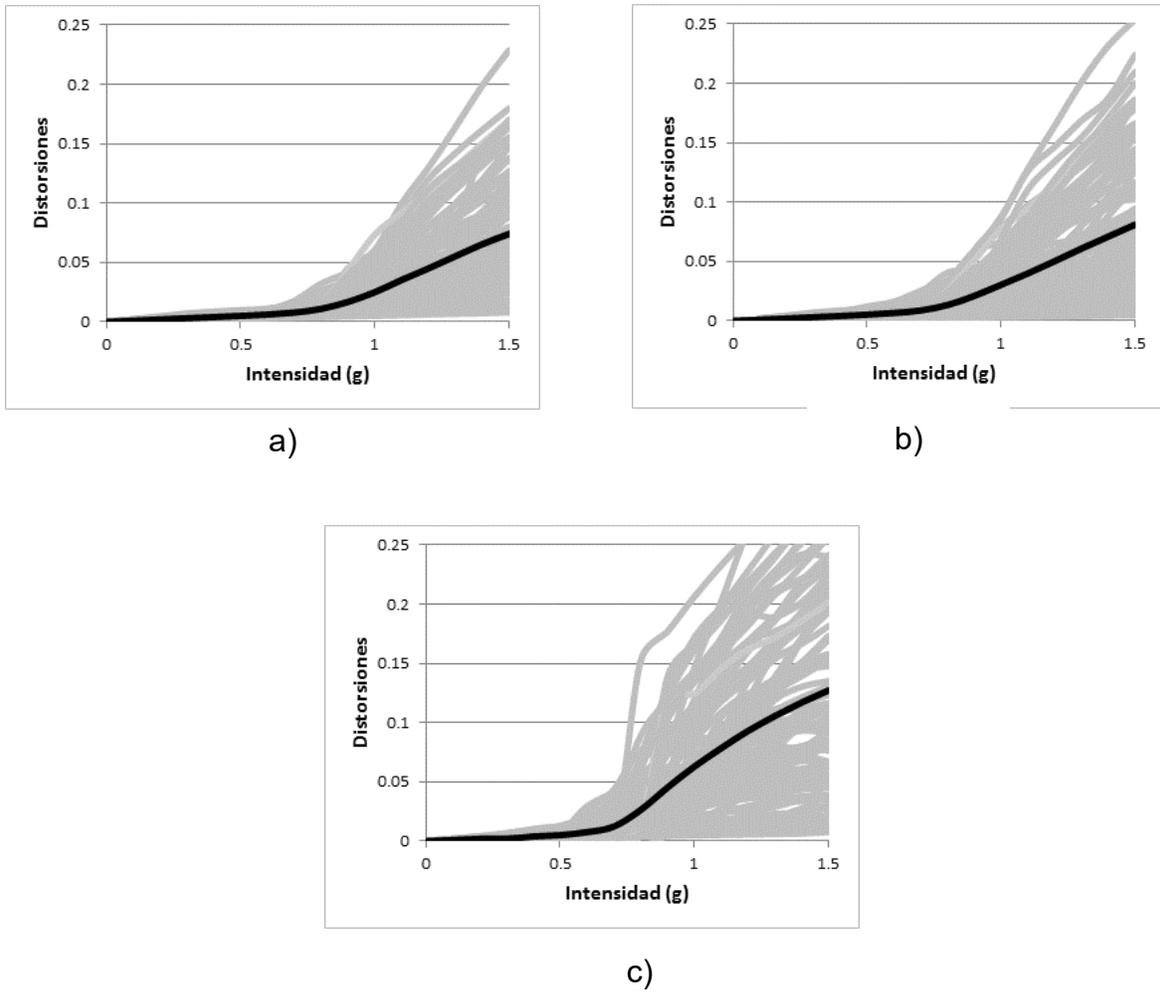


Figura A2.1. a) IDA 2004, b) IDA 1987, c) IDA 1977.

En la figura A2.2 muestra la comparación de las curvas IDA para las estructuras RCDF-1977, RCDF-1987 y RCDF-2004 rigidizadas. Se puede observar como la estructura RCDF-1977 rigidizada es la que más acepta distorsiones para una intensidad **g**.

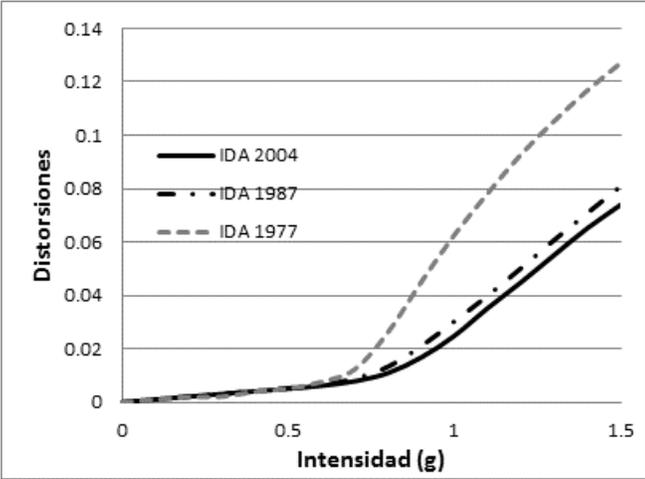


Figura A2.2. Comparación de las curvas IDA para las estructuras rigidizadas.