

# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



***FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL***

***DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO***

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**



## ***ESTUDIO COSTO-BENEFICIO DEL REFUERZO DE SUBESTRUCTURAS DE PUENTES DE PILAS CIRCULARES DE CR***

---

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
MAESTRO EN INGENIERÍA EN EL ÁREA DE ESTRUCTURAS**

**PRESENTA:  
GERARDO GÓMEZ GUTIÉRREZ**

**DIRECTORA DE TESIS  
DRA. BERTHA ALEJANDRA OLMOS NAVARRETE**

***MORELIA, MICHOACAN ABRIL DE 2013***



## DEDICATORIA

### **A Dios,**

Gracias por iluminar mi camino,  
Por guiarme y aconsejarme,  
Por siempre estar conmigo.

### **A Mis Padres,**

Gracias por siempre estar ahí,  
En los buenos y malos días,  
Mil gracias no serían suficientes para expresar mi gratitud,  
Los amo.

### **A Mi Familia,**

Gracias por ser parte de mi vida,  
Gracias también  
A los que me alientan sin decir palabra  
Y a los que me reconfortan sin estar presentes.

### **A Mi Asesora,**

A la Dra. Bertha Alejandra Olmos Navarrete,  
Gracias por guiarme y aconsejarme durante todo este tiempo  
Lo agradezco infinitamente.





## AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mi alma mater a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo por haberme abierto sus puertas.

A la Facultad de Ingeniería Civil por haberme permitido desarrollar mi capacidad, mis habilidades y llegar hasta esta instancia.

Al CONACYT por el apoyo brindado a lo largo de la maestría.

A cada uno de los profesores de la Facultad de Ingeniería Civil y de la Maestría en Ingeniería en el Área de Estructuras que cambiaron mi perspectiva.

A la Dra. Bertha Olmos Navarrete por haberme brindado su apoyo, su consejo y su tiempo.

A cada una de las personas que me brindaron su apoyo.

*“... si Dios es por nosotros, ¿Quién contra nosotros? ...”*

Romanos 8: 31-39





## MOTIVACIÓN

- *Conocer la relación del costo que implica la implementación de sistemas de refuerzo determinados para mejorar la capacidad de las columnas de concreto reforzado (CR) con secciones circulares. Con ello, se tendrá la posibilidad de elegir el sistema de refuerzo más eficiente, al menor costo y con la seguridad de tener un buen comportamiento.*
  
- *Porque maneja tres temas de mi interés:*
  - ◆ *Estructuras.*
  - ◆ *Materiales*
  - ◆ *Y de forma indirecta la práctica profesional.*



Figura I-1 Puente Baluarte el más alto del mundo. Está ubicado en la carretera Mazatlán – Durango, México, Cuenta con 1124m de longitud soportados por 152 tirantes de acero.  
<http://www.bieninformado.mx/Inicio/index.php/nacion/item/126-puente-baluarte-el-m%C3%A1s-alto-del-mundo>





## OBJETIVOS

### OBJETIVO GENERAL

*El objetivo del proyecto es evaluar la relación costo-beneficio del encamisado de acero como sistema de refuerzo de subestructuras de puentes existentes formados por pilas de concreto reforzado de sección transversal circular.*

### OBJETIVOS PARTICULARES

- *Seleccionar la tipología de las subestructuras de interés en México.*
- *Definir los sistemas de refuerzo.*
- *Determinar la demanda sísmica esperada en puentes localizados en la costa del Pacífico de México.*
- *Desarrollar modelos analíticos de las subestructuras de puentes seleccionadas y de los sistemas de refuerzo propuestos.*
- *Proponer una metodología para evaluar el costo-beneficio del sistema de refuerzo.*





## INTRODUCCIÓN

Los sistemas de refuerzo han tenido una evolución pasando desde los cables para retener el movimiento de los elementos conformantes de los puentes hasta los encamisados de diversos materiales (concreto, acero y polímeros reforzados con fibras) y sistemas de aislamiento de base, los cuales por cierto han sido optimizados en varias ocasiones. Lo anterior nos conduce a que el siguiente paso en la evolución de los sistemas de refuerzo es a optimizarlos tomando en cuenta dos aspectos de gran relevancia. Por un lado brindar el mejor comportamiento estructural y por el otro lado el mejor costo. Así, relacionar el costo-beneficio es un aspecto que hasta hace poco tiempo se le ha dado la relevancia que esto requería. Esto debido a que los sistemas de refuerzo no son económicos en lo absoluto, por lo que el conocer el sistema de refuerzo al mejor costo es algo esencial en la ingeniería civil y en nuestros días. El sistema de refuerzo que se desarrolló en este trabajo fueron los encamisados metálicos. Este sistema consiste grosso modo en envolver al elemento (en nuestro caso pilas de puentes) por medio de una camisa de placas metálicas. El encamisado adopta la forma que tenga la columna aunque si bien se puede ajustar la forma final dependiendo de la capacidad que se quiera lograr. Este encamisado metálico fue modelado junto con puentes típicos de México. Todo con el fin de encontrar el modelo que nos definiera el espesor de placa que nos proporciones la mejor relación de costo-beneficio.

Este trabajo está compuesto por siete capítulos, un apartado de conclusiones y trabajo futuro, así como un par de apéndices que muestran resultados de análisis realizados durante la elaboración del mismo. Todo esto con el fin de llevar al lector desde un conocimiento base nulo en el tema a una comprensión lo bastante buena respecto a todo el trabajo realizado.

Así, el capítulo I “*Estado del Conocimiento de Sistemas de Refuerzo de Pilas de Puentes Existentes de CR*” presenta el estado del conocimiento de diversos sistemas de refuerzo como lo son encamisados de concreto, acero y polímeros reforzados con fibras (carbón, vidrio y aramida); además de los sistemas de aislamiento de base.





El capítulo II *“Demanda Sísmica Esperada y Selección de Acelerogramas”* responde a las preguntas siguientes cómo es la composición de la Tierra, en qué consiste la teoría de las placas tectónicas, qué es una falla geológica y cuántos tipos de ellas hay, cómo ocurre un sismo, qué tipos de ondas se generan después de un evento sísmico así como los daños que provoca, cómo se localizan los sismos, qué escalas se utilizan para medir los sismos, cuáles son las características de la sismicidad en México. Además, en este capítulo se muestran los criterios tomados para la selección de los acelerogramas, los cuales conforman la demanda sísmica.

El capítulo III *“Modelos Analíticos de los Puentes y Sistemas de Refuerzo para la Subestructura”* muestra las características de los modelos analíticos de los puentes (longitud de claros, altura de pilas, sección geométrica, entre otras). Además, se describe el sistema de refuerzo empleado (proceso constructivo, espesores de placa de acero).

El capítulo IV *“Capacidad Lateral de las Pilas de los Modelos de Puentes”* indica los tipos de análisis no lineales que se tienen, describe el método Pushover y por último se muestra la aplicación de este método a los modelos analíticos con y sin refuerzo así como los resultados obtenidos.

El capítulo V *“Curvas de Fragilidad de los Modelos de Puentes”* describe qué es una curva de fragilidad, las escalas de los estados límite de daño (ductilidad de curvatura y distorsión angular o drift) y por último se presenta las curvas de fragilidad obtenidas a partir de los resultados obtenidos de los análisis pushover.

El capítulo VI *“Análisis del Costo-Beneficio del Refuerzo de Pilas Mediante Encamisados Metálicos”* presenta el modelo costo-beneficio usado, los costos que intervienen en la obtención del encamisado óptimo y por último se presenta cuál fue la conclusión a la que se llegó.

El capítulo VII *“Discusión de Resultados”* brinda una perspectiva de todos los elementos que intervinieron durante el trabajo y como todos ellos convergieron para llegar al resultado del capítulo VI.

Por último, se abordan las conclusiones producto del trabajo de investigación asimismo de ciertas ideas que pueden complementar esta tesis.





## ÍNDICE

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>I-2</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>I-3</b>
<b>MOTIVACIÓN .....</b>	<b>I-4</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>I-5</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>I-6</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>I-8</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>I-11</b>
<b>LISTA DE TABLAS .....</b>	<b>I-17</b>
<b>NOTACIÓN.....</b>	<b>I-23</b>
<b>I. ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE SISTEMAS DE REFUERZO DE PILAS DE PUENTES EXISTENTES DE CR</b>	<b>I-25</b>
<i>I.1. Introducción .....</i>	<i>I-25</i>
<i>I.2. Reforzar.....</i>	<i>I-26</i>
<i>I.3. Sistemas De Refuerzo En Pilas De Puentes .....</i>	<i>I-30</i>
I.3.1. Encamisado De Columnas De Concreto Reforzado (RC) .....	I-30
I.3.1.1. Encamisado De Columnas Con Concreto Y Acero.....	I-31
I.3.1.1.1. Encamisado A Base De Concreto Y Acero De Refuerzo .....	I-31
I.3.1.1.2. Encamisado Con Láminas De Acero (Rellenadas, Ancladas, Adheridas) .....	I-32
I.3.1.2. Encamisado Con Polímeros Reforzados Con Fibras (FRP).....	I-34
I.3.1.2.1. Polímeros Reforzados Con Fibras (FRP).....	I-34
I.3.1.2.2. Polímeros Reforzados Con Fibras De Carbón (CFRP) .....	I-36
I.3.1.2.2.1. Forma De Aplicación De Los Polímeros Reforzados Con Fibras De Carbón (CFRP).....	I-38
I.3.2. Sistemas De Control .....	I-40
I.3.2.1. Sistemas De Aislamiento De Base .....	I-42
I.3.3. Comentarios .....	I-45
I.3.4. Tendencias En Los Sistemas De Refuerzo .....	I-47
<b>II. DEMANDA SÍSMICA ESPERADA Y SELECCIÓN DE ACELEROGRAMAS .....</b>	<b>II-48</b>
<i>II.1. Introducción .....</i>	<i>II-48</i>
<i>II.2. Sismo .....</i>	<i>II-50</i>







II.3.	<i>Composición De La Tierra</i> .....	II-50
II.4.	<i>Placas Tectónicas</i> .....	II-51
II.4.1.	Tipos De Placas Tectónicas .....	II-53
II.4.2.	Clasificación De Placas Tectónicas.....	II-53
II.5.	<i>Fallas Geológicas</i> .....	II-54
II.5.1.	Elementos De Una Falla .....	II-54
II.5.2.	Características De Una Falla Geológica .....	II-55
II.5.3.	Clasificación De Las Fallas Geológicas .....	II-56
II.6.	<i>Ondas Sísmicas</i> .....	II-58
II.6.1.	Ondas De Cuerpo .....	II-58
II.6.1.1.	Ondas Primarias (P).....	II-59
II.6.1.2.	Ondas Secundarias (S).....	II-59
II.6.2.	Ondas De Superficie.....	II-59
II.6.2.1.	Ondas Love .....	II-60
II.6.2.2.	Ondas Rayleigh .....	II-60
II.7.	<i>Localización De Un Sismo</i> .....	II-61
II.7.1.	Localización De Un Sismo .....	II-62
II.8.	<i>Escalas Sísmicas</i> .....	II-63
II.8.1.	Escalas de Intensidad .....	II-63
II.8.2.	Escalas de Magnitud.....	II-65
II.9.	<i>Sismicidad En México</i> .....	II-66
II.10.	<i>Selección De Registros Sísmicos</i> .....	II-69
II.10.1.	Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF) .....	II-69
II.10.2.	Registros Sísmicos Seleccionados .....	II-70
<b>III.</b>	<b>MODELOS ANALÍTICOS DE LOS PUENTES Y SISTEMAS DE REFUERZO PARA LA SUBESTRUCTURA .....</b>	<b>III-73</b>
III.1.	<i>Introducción</i> .....	III-73
III.2.	<i>Descripción De Los Modelos Analíticos</i> .....	III-74
III.2.1.	Características De Los Modelos De Los Puentes .....	III-74
III.2.2.	Cargas Consideradas Aplicadas En Los Modelos .....	III-83
III.2.2.1.	Carga Muerta .....	III-83
III.2.2.2.	Cargas Vivas.....	III-84
III.2.2.3.	Cargas Accidentales.....	III-84
III.3.	<i>Sistema De Refuerzo</i> .....	III-85
III.3.1.	Encamisado De Acero.....	III-85
III.3.1.1.	Proceso Constructivo Del Encamisado De Acero.....	III-87
III.3.1.2.	Ventajas y Desventajas Del Encamisado De Acero .....	III-90
III.4.	<i>Materiales</i> .....	III-92
III.5.	<i>Modelos Analíticos Con Encamisado De Acero</i> .....	III-92
<b>IV.</b>	<b>CAPACIDAD LATERAL DE LAS PILAS DE LOS MODELOS DE PUENTES .....</b>	<b>IV-94</b>





IV.1.	<i>Introducción</i> .....	IV-94
IV.2.	<i>Métodos De Análisis No Lineales</i> .....	IV-94
IV.2.1.	Clasificación De Los Métodos De Análisis No Lineales .....	IV-95
IV.3.	<i>Curvas De Capacidad</i> .....	IV-98
IV.3.1.	Análisis Pushover .....	IV-98
IV.3.2.	Análisis Pushover De Los Modelos Analíticos.....	IV-98
IV.3.2.1.	Patrón De Cargas .....	IV-98
IV.3.3.	Curvas De Capacidad De Los Modelos Analíticos .....	IV-102
IV.4.	<i>Puntos De Desempeño En Los Modelos Analíticos</i> .....	IV-106
<b>V.</b>	<b>CURVAS DE FRAGILIDAD DE LOS MODELOS DE PUENTES</b> .....	<b>V-109</b>
V.1.	<i>Introducción</i> .....	V-109
V.2.	<i>Estados De Daño</i> .....	V-109
V.2.1.	Distorsión Angular O Drift.....	V-109
V.2.2.	Ductilidad De Curvatura.....	V-111
V.3.	<i>Curvas De Fragilidad</i> .....	V-111
V.3.1.	Curvas De Fragilidad De Los Modelos Analíticos .....	V-113
V.3.2.	Curvas De Fragilidad Como Función De La Ductilidad De Curvatura ( $\mu_{\phi}$ ) .....	V-115
V.3.1.	Curvas De Fragilidad Como Función De La Distorsión Angular o Drift ( $\theta$ ).....	V-130
<b>VI.</b>	<b>ANÁLISIS DEL COSTO-BENEFICIO DEL REFUERZO DE PILAS MEDIANTE ENCAMISADOS METÁLICOS ....VI-144</b>	
VI.1.	<i>Introducción</i> .....	VI-144
VI.2.	<i>Modelo Costo-Beneficio</i> .....	VI-144
VI.2.1.	Costos.....	VI-147
VI.2.1.1.	Costo De Los Puentes Típicos En México .....	VI-147
VI.2.1.2.	Costo Del Encamisado Metálico .....	VI-148
VI.2.2.	Determinación Del Espesor De La Placa De Acero Óptimo .....	VI-150
<b>VII.</b>	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS</b> .....	<b>VII-153</b>
	<b>CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO</b> .....	<b>VII-155</b>
	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>VII-156</b>
	<b>APENDICE A</b> .....	<b>VII-159</b>
	<b>APENDICE B</b> .....	<b>VII-171</b>





## LISTA DE FIGURAS

Figura I-1 Puente Baluarte el más alto del mundo. Está ubicado en la carretera Mazatlán – Durango, México, Cuenta con 1124m de longitud soportados por 152 tirantes de acero.  
<http://www.bieninformado.mx/Inicio/index.php/nacion/item/126-puente-baluarte-el-m%C3%A1s-alto-del-mundo>..... I-4

Figura I-1. Daños causados por el Sismo de Loma Prieta en el Viaducto Cypress en la Interestatal 880 en 1989.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/1989\\_Loma\\_Prieta\\_earthquake](http://en.wikipedia.org/wiki/1989_Loma_Prieta_earthquake) ..... I-26

Figura I-2 Diagrama para conocer si una estructura es apta para ser reforzada.  
<http://mceer.buffalo.edu/research/HighwayPrj/Workshops/Portland/Ia-Buckle.pdf>..... I-28

Figura I-3 Daño por cortante en las columnas de puentes debido al sismo de San Fernando en 1971. <http://antonio-magallon.20fr.com/photo.html> ..... I-29

Figura I-4 Aplicación parcial de los encamisados de concreto a), acero b) y FRP c).  
<http://desroches.ce.gatech.edu/sites/default/files/pubs/seismicroetrofit.pdf> ..... I-30

Figura I-5 Aplicación del encamisado a base de concreto y acero de refuerzo a una columna circular en el puente Hernando DeSoto en Tennessee. <http://desroches.ce.gatech.edu/sites/default/files/pubs/seismicroetrofit.pdf>..... I-32

Figura I-6. Encamisado con malla de acero y concreto o mortero de protección. (Rendón Ospina & Zambrano López, 2007) ..... I-32

Figura I-7 Encamisado en acero para cambiar de una columna rectangular a elíptica y encamisado de acero con una capa previa de concreto para uniformizar el elemento. (Rendón Ospina & Zambrano López, 2007) ..... I-33

Figura I-8 Primer Puente de Materiales Compuestos Construido en España. (De Diego Villalón, et al., 2008)..... I-37

Figura I-9 a) Revestimiento en Forma de U, b) Encamisado de columna y c) Refuerzo en Muros con tiras de CFRP.  
<http://www.constructionssystem.basf-cc.es/ES/productos-sistemas/catalogos/Documents/sistema-integral-refuerzo-estructuras-mbrace.pdf>..... I-38

Figura I-10 Aplicación de FRP a una columna circular manteniendo la sección original.  
<http://rbconspiro.wordpress.com/2009/11/14/reforzamiento-estructural-con-fibras-de-carbono/>..... I-39

Figura I-11 Clasificación de Sistemas o Dispositivos de Control Pasivo (Villanueva Monroy, 2011)..... I-41

Figura I-12 Puente Infiernillo II ubicado en la carretera Nueva Italia – Lázaro Cárdenas en el estado de Michoacan.  
<http://static.panoramio.com/photos/original/6591528.jpg>..... I-41





Figura I-13 apoyo laminado con alma de plomo (LRB).  
[http://bp0.blogger.com/\\_qFJEJ54NBZo/RkcYJMHnoOI/AAAAAAAAAW8/ZVs1fzM-Wog/s1600-h/Imagen9.png](http://bp0.blogger.com/_qFJEJ54NBZo/RkcYJMHnoOI/AAAAAAAAAW8/ZVs1fzM-Wog/s1600-h/Imagen9.png) ..... I-42

Figura I-14 Esquema del problema de control estructural de los sistemas de control activo. Spencer et al (1997) ..... I-43

Figura I-15 Puente “Khor al Batah Omán” que se ubica en el Sur Omán y que consta de un sistema que consta de 3 tirantes activos a cada lado del puente. [http://www.sbp.de/es/build/sheet/1536-Stra%C3%9Fenbr%C3%BCcke\\_Khor\\_al\\_Batah\\_Oman.pdf](http://www.sbp.de/es/build/sheet/1536-Stra%C3%9Fenbr%C3%BCcke_Khor_al_Batah_Oman.pdf). ..... I-44

Figura I-16 Torre Park Shinjuku donde se instaló un sistema de control híbrido con amortiguador de masa.  
<http://www.revista.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1742/11580> ..... I-44

Figura II-1 Vista aérea de Puerto Príncipe. Tras el sismo de Haití en 2010, la ciudad quedó destruida.  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Downtown\\_Port\\_au\\_Prince\\_after\\_earthquake.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Downtown_Port_au_Prince_after_earthquake.jpg) ..... II-49

Figura II-2 Composición de la Tierra. <http://carlosmendezilustra.blogspot.mx/> ..... II-51

Figura II-3 Movimiento de las placas tectónicas comenzando con la Pangea propuesta por Wegener hasta la posición actual de las mismas <http://jesuscarro.wordpress.com/page/3/> ..... II-52

Figura II-4 Principales Placas Tectónicas. .... II-54

Figura II-5 Falla de San Andrés que atraviesa el estado de California en los Estados Unidos y el estado de Baja california en México. <http://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com/ciencias-de-la-tierra/terremotos-tsunamis-y-fallas-geologicas/> ..... II-54

Figura II-6 Características de una falla. Modificada de  
[http://ec.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?anchor=klpcnatun&tipo=imprimir&titulo=Imprimir%20Art%EDculo&xref=20070417klpcnatun\\_194.Kes](http://ec.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?anchor=klpcnatun&tipo=imprimir&titulo=Imprimir%20Art%EDculo&xref=20070417klpcnatun_194.Kes) ..... II-55

Figura II-7 Falla Divergente. La separación de las placas da origen a un valle en rift ubicado inicialmente en el interior de los continentes y que se va transformando en una cuenca oceánica alargada y estrecha. Si el proceso persiste durante un gran periodo de tiempo se pueden llegar a formar océanos.  
<http://platea.pntic.mec.es/~jpascual/geotierra/geotierra2.htm> ..... II-56

Figura II-8 Fenómenos que se producen en una falla de Convergencia. [http://www.iesabdera.com/bg/bgb1/web-5/32\\_lmites\\_convergentes\\_o\\_destructivos\\_subduccion\\_y\\_colisin.html](http://www.iesabdera.com/bg/bgb1/web-5/32_lmites_convergentes_o_destructivos_subduccion_y_colisin.html) ..... II-57

Figura II-9 Esquema de las Fallas de Transformación. <http://www.windows2universe.org/earth/geology/fault.html&lang=sp> ..... II-58

Figura II-10 Esquema de las ondas Primarias (P).  
[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Ondas/Ondas.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html) .. II-59





Figura II-11 Esquema de las ondas Secundarias (S).  
[http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Ondas/Ondas.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html) ..II-59

Figura II-12 Esquema de Ondas Love. [http://servidor-opsu.tach.ula.ve/alum/pd\\_5/sism\\_t/GLOSVII.html](http://servidor-opsu.tach.ula.ve/alum/pd_5/sism_t/GLOSVII.html).....II-60

Figura II-13 Esquema de Ondas Rayleigh. [http://servidor-opsu.tach.ula.ve/alum/pd\\_5/sism\\_t/GLOSVII.html](http://servidor-opsu.tach.ula.ve/alum/pd_5/sism_t/GLOSVII.html).....II-60

Figura II-14 Clasificación del hipocentro según su profundidad.  
<http://www.educarchile.cl/autoaprendizaje/tierra/modulo2/clase2/texto/sismicidad.htm#2> ..... II-61

Figura II-15 Hipocentro y epicentro de un sismo. <http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=16> .....II-61

Figura II-16 Ejemplo de un sismo en las costas de Guerrero, localizado mediante registros de las estaciones: Tacubaya, D.F. (TAC); Presa Infernillo, Mich. (PIM); y Pinotepa Nacional, Oax. (PIO).  
<http://secre.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Sismo85/sismo85-2.htm> ..... II-62

Figura II-17 Sismos que han producido acelerogramas hasta 1999. Tomada de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes .....II-66

Figura II-18 Zonificación del DF para fines de diseño por sismo. <http://cgsservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/739.htm> II-67

Figura II-19 Aceleraciones máximas del terreno (roca). .....II-68

Figura II-20 Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes.....II-69

Figura II-21 Localización de las estaciones sismográficas .....II-70

Figura II-22 Demanda sísmica de los registros sismográficas de la BMDSF.....II-72

Figura III-1 Encamisado de acero aplicado en toda la longitud de la columna. .... III-73

Figura III-2 Diafragmas de sección rectangular en puentes.  
[http://cybertesis.upc.edu.pe/upc/2009/ortega\\_mg/xml/ressources/fig002.jpg](http://cybertesis.upc.edu.pe/upc/2009/ortega_mg/xml/ressources/fig002.jpg) ..... III-75

Figura III-3 Sección transversal de las columnas del Modelo 1. .... III-76

Figura III-4 Cabezales de concreto reforzado. <http://www.cicmexicali.org/socios/publicacion/297> ..... III-77

Figura III-5 Apoyos de neopreno. <http://www.apoyosdepunte.mex.tl/> ..... III-78

Figura III-6 Disposición de los apoyos fijos y móviles en los modelos analíticos. .... III-78

Figura III-7 Sección transversal de los modelos analíticos. (Tíripiti Zacarías, 2012) ..... III-81

Figura III-8 Vista tridimensional de los modelos analíticos 1, 2, 3 y 4 en el programa SAP2000..... III-82

Figura III-9 Elementos considerados en las cargas muertas aplicados en los modelos. (Tíripiti Zacarías, 2012) ..... III-83

Figura III-10 Camión HS-20, T3-S3 y T3-S2-R4. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10680/Capitulo6.pdf>..... III-84

Figura III-11 Confinamiento de columnas por medio de encamisado de acero..... III-85

Figura III-12 Encamisado de acero parcial en la columna. <http://www.wsdot.wa.gov/Projects/I5/SSeattleSeismic/Photos> III-





Figura III-13 Encamisado de acero por zonas en la columna.  
<http://mceer.buffalo.edu/research/HighwayPrj/Workshops/Charleston/07DesRoches.pdf>..... III-86

Figura III-14 Espacio vertical en el encamisado de acero. .... III-87

Figura III-15 Unión de las placas metálicas por medio de conexiones con tornillos.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029604002299> ..... III-90

Figura III-16 Espacio vertical del encamisado de acero. <http://www.wsdot.wa.gov/Projects/I5/SeattleSeismic/Photos> III-91

Figura III-17 Modelo de Columna reforzada con encamisado de acero..... III-93

Figura IV-1 Espectro de capacidad, espectro de demanda y punto de desempeño,..... IV-95

Figura IV-2 Conversión de la curva de capacidad a espectro de capacidad ..... IV-98

Figura IV-3 Patrón de cargas para el análisis pushover. .... IV-99

Figura IV-4 Carga unitaria aplicada en la superestructura para el análisis pushover. .... IV-99

Figura IV-5 Ubicación de articulaciones plásticas en los modelos de los puentes, ..... IV-100

Figura IV-6 Curva de Capacidad para el modelo 1 con casing = 0 y casing = 1. .... IV-102

Figura IV-7 Curva de Capacidad para el modelo 2 con casing = 0 y casing = 1. .... IV-102

Figura IV-8 Curva de Capacidad para el modelo 3 con casing = 0 y casing = 1. .... IV-103

Figura IV-9 Curva de Capacidad para el modelo 4 con casing = 0 y casing = 1. .... IV-103

Figura IV-10 Incremento en la capacidad de los modelos para los diferentes espesores de placa de acero. .... IV-105

Figura IV-11 Incremento en la capacidad de los modelos con camisa de 1". .... IV-105

Figura V-1 Datos necesarios para calcular la distorsión angular o drift..... V-110

Figura V-2 Variabilidad en la demanda y la capacidad esperada. (Mander, 1999) ..... V-113

Figura V-3 Función de densidad de probabilidad acumulada log-normal. (Mander, 1999) ..... V-113

Figura V-4 Curva de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 1 para el caso M1-0. .... V-116

Figura V-5 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1. .... V-116

Figura V-6 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1. .... V-117

Figura V-7 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1. .... V-117

Figura V-8 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 1 para los casos M1-3/4-0 y M1-3/4-1. .... V-118

Figura V-9 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 1 para los casos M1-1-0 y M1-1-1. .... V-118

Figura V-10 Curva de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 2 para el caso M2-0. .... V-119

Figura V-11 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 2 para los casos M2-3/8-0 y M2-3/8-1. .... V-120

Figura V-12 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 2 para los casos M2-1/2-0 y M2-1/2-1. .... V-120

Figura V-13 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 2 para los casos M2-5/8-0 y M2-5/8-1. .... V-121





Figura V-14 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 2 para los casos M2-3/4-0 y M2-3/4-1. .... V-121

Figura V-15 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 2 para los casos M2-1-0 y M2-1-1. .... V-122

Figura V-16 Curva de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 3 para el caso M3-0..... V-123

Figura V-17 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 3 para los casos M3-3/8-0 y M3-3/8-1. .... V-123

Figura V-18 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 3 para los casos M3-1/2-0 y M3-1/2-1. .... V-124

Figura V-19 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 3 para los casos M3-5/8-0 y M3-5/8-1. .... V-124

Figura V-20 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 3 para los casos M3-3/4-0 y M3-3/4-1. .... V-125

Figura V-21 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 3 para los casos M3-1-0 y M3-1-1. .... V-125

Figura V-22 Curva de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 4 para el caso M4-0..... V-126

Figura V-23 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 4 para los casos M4-3/8-0 y M4-3/8-1. .... V-127

Figura V-24 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 4 para los casos M4-1/2-0 y M4-1/2-1. .... V-127

Figura V-25 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 4 para los casos M4-5/8-0 y M4-5/8-1. .... V-128

Figura V-26 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 4 para los casos M4-3/4-0 y M4-3/4-1. .... V-128

Figura V-27 Curvas de fragilidad por  $\mu\phi$  del modelo 4 para los casos M4-1-0 y M4-1-1. .... V-129

Figura V-28 Curva de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para el caso M1-0..... V-131

Figura V-29 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1..... V-132

Figura V-30 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1..... V-132

Figura V-31 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1..... V-133

Figura V-32 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-3/4-0 y M1-3/4-1..... V-133

Figura V-33 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-1-0 y M1-1-1..... V-134

Figura V-34 Curva de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para el caso M2-0..... V-134

Figura V-35 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-3/8-0 y M2-3/8-1..... V-135

Figura V-36 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-1/2-0 y M2-1/2-1..... V-135

Figura V-37 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-5/8-0 y M2-5/8-1..... V-136

Figura V-38 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-3/4-0 y M2-3/4-1..... V-136

Figura V-39 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-1-0 y M2-1-1..... V-137

Figura V-40 Curva de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para el caso M3-0..... V-137

Figura V-41 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-3/8-0 y M3-3/8-1..... V-138

Figura V-42 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-1/2-0 y M3-1/2-1..... V-138





Figura V-43 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-5/8-0 y M3-5/8-1..... V-139

Figura V-44 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-3/4-0 y M3-3/4-1..... V-139

Figura V-45 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-1-0 y M3-1-1..... V-140

Figura V-46 Curva de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para el caso M4-0..... V-140

Figura V-47 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-3/8-0 y M4-3/8-1..... V-141

Figura V-48 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-1/2-0 y M4-1/2-1..... V-141

Figura V-49 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-5/8-0 y M4-5/8-1..... V-142

Figura V-50 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-3/4-0 y M4-3/4-1..... V-142

Figura V-51 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-1-0 y M4-1-1..... V-143

Figura VI-1 Ejemplo de la obtención de las probabilidades de falla para los valores frontera en los estados límite de daño por distorsión angular o drift para el modelo M1-0. .... VI-145

Figura VI-2 Relación de las razones de costo y los estados de daño. (Sircar, et al., 2008) ..... VI-146

Figura VI-3 Comparativa de los costos del encamisado de acero en los diferentes modelos. .... VI-150

Figura VI-4 Cambio en la localización del punto de desempeño de la zona inelástica a la zona elástica por el efecto del aumento del espesor de la placa de acero. .... VI-151

Figura VI-5 Costo total del puente con el sistema de refuerzo (CTPSR) obtenido por medio de la ecuación VI-1..... VI-152







## LISTA DE TABLAS

Tabla II-I Escala de Mercalli Modificada (MMI). <a href="http://cuandolatierrasemueve.blogspot.mx/2009/11/terremotos.html">http://cuandolatierrasemueve.blogspot.mx/2009/11/terremotos.html</a> ...	II-64
Tabla II-II Escala de Richter. <a href="http://cuandolatierrasemueve.blogspot.mx/2009/11/terremotos.html">http://cuandolatierrasemueve.blogspot.mx/2009/11/terremotos.html</a> .....	II-65
Tabla II-III Comparativa entre las escalas de Mercalli y la de Richter. <a href="http://cuandolatierrasemueve.blogspot.mx/2009/11/terremotos.html">http://cuandolatierrasemueve.blogspot.mx/2009/11/terremotos.html</a> .....	II-66
Tabla II-IV Características de los registros obtenidos de la BMDSF .....	II-71
Tabla II-V Características de los registros obtenidos de la BMDSF .....	II-72
Tabla III-I Propiedades de las secciones de vigas AASHTO para puentes. <a href="http://www.mexpresa.com/productos/vigas_p.php">http://www.mexpresa.com/productos/vigas_p.php</a> .....	III-75
Tabla III-II Detalles de los armados de las columnas .....	III-79
Tabla III-III Elementos de la superestructura, subestructura y la interfase entre éstas .....	III-80
Tabla III-IV Dimensiones geométricas de los modelos analíticos .....	III-81
Tabla III-V Pesos de los elementos considerados para la carga muerta .....	III-83
Tabla III-VI Propiedades mecánicas de los materiales .....	III-92
Tabla III-VII Nomenclatura de los Modelos Analíticos con Encamisado de Acero.....	III-93
Tabla IV-I Valores máximos de desplazamiento y cortante en la base de las curvas de capacidad en los modelos analíticos .....	IV-103
Tabla IV-II Parámetros para calcular la distorsión angular o drift ( $\theta$ ) .....	IV-107
Tabla IV-III Parámetros para calcular la ductilidad de curvatura ( $\mu\phi$ ).....	IV-108
Tabla V-I Intervalos para los estados de daño para el parámetro de distorsión angular o drift ( $\theta$ ). (Akbari, 2010).....	V-110
Tabla V-II Intervalos para los estados de daño para el parámetro de ductilidad de curvatura ( $\mu\phi$ ).....	V-111
Tabla V-III Parámetros que definen las curvas de fragilidad en función de la ductilidad de curvatura ( $\mu\phi$ ).....	V-115
Tabla V-IV Probabilidad de falla del modelo 1 para el caso M1-0.....	V-116
Tabla V-V Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1.....	V-116
Tabla V-VI Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-1/2-0 y M1-1/2-1 .....	V-117
Tabla V-VII Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1 .....	V-117
Tabla V-VIII Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1.....	V-118
Tabla V-IX Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-1-0 y M1-1-1 .....	V-118
Tabla V-X Probabilidad de falla del modelo 2 para el caso M2-0 .....	V-119





Tabla V-XI Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-3/8-0 y M2-3/8-1 ..... V-120

Tabla V-XII Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-1/2-0 y M2-1/2-1 ..... V-120

Tabla V-XIII Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-5/8-0 y M2-5/8-1 ..... V-121

Tabla V-XIV Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-3/4-0 y M2-3/4-1 ..... V-121

Tabla V-XV Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-1-0 y M2-1-1 ..... V-122

Tabla V-XVI Probabilidad de falla del modelo 3 para el caso M3-0 ..... V-123

Tabla V-XVII Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-3/8-0 y M3-3/8-1 ..... V-123

Tabla V-XVIII Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-1/2-0 y M3-1/2-1 ..... V-124

Tabla V-XIX Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-5/8-0 y M3-5/8-1 ..... V-124

Tabla V-XX Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-3/4-0 y M3-3/4-1 ..... V-125

Tabla V-XXI Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-1-0 y M3-1-1 ..... V-125

Tabla V-XXII Probabilidad de falla del modelo 4 para el caso M4-0 ..... V-126

Tabla V-XXIV Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-3/8-0 y M4-3/8-1 ..... V-127

Tabla V-XXIII Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-1/2-0 y M4-1/2-1 ..... V-127

Tabla V-XXVI Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-5/8-0 y M4-5/8-1 ..... V-128

Tabla V-XXV Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-3/4-0 y M4-3/4-1 ..... V-128

Tabla V-XXVII Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-1-0 y M4-1-1 ..... V-129

Tabla V-XXVIII Parámetros que definen las curvas de fragilidad en función de la distorsión angular ( $\theta$ ) ..... V-130

Tabla V-XXIX Probabilidad de falla del modelo 1 para el caso M1-0 ..... V-131

Tabla V-XXX Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1 ..... V-132

Tabla V-XXXI Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-1/2-0 y M1-1/2-1 ..... V-132

Tabla V-XXXII Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1 ..... V-133

Tabla V-XXXIII Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1 ..... V-133

Tabla V-XXXIV Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-1-0 y M1-1-1 ..... V-134

Tabla V-XXXV Probabilidad de falla del modelo 2 para el caso M2-0 ..... V-134

Tabla V-XXXVI Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-3/8-0 y M2-3/8-1 ..... V-135

Tabla V-XXXVII Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-1/2-0 y M2-1/2-1 ..... V-135

Tabla V-XXXVIII Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-5/8-0 y M2-5/8-1 ..... V-136

Tabla V-XXXIX Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-3/4-0 y M2-3/4-1 ..... V-136

Tabla V-XL Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-1-0 y M2-1-1 ..... V-137

Tabla V-XLI Probabilidad de falla del modelo 3 para el caso M3-0 ..... V-137

Tabla V-XLII Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-3/8-0 y M3-3/8-1 ..... V-138





Tabla V-XLIII Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-1/2-0 y M3-1/2-1 .....	V-138
Tabla V-XLIV Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-5/8-0 y M3-5/8-1 .....	V-139
Tabla V-XLV Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-3/4-0 y M3-3/4-1 .....	V-139
Tabla V-XLVI Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-1-0 y M3-1-1 .....	V-140
Tabla V-XLVII Probabilidad de falla del modelo 4 para el caso M4-0 .....	V-140
Tabla V-XLVIII Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-3/8-0 y M4-3/8-1 .....	V-141
Tabla V-XLIX Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-1/2-0 y M4-1/2-1 .....	V-141
Tabla V-L Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-5/8-0 y M4-5/8-1 .....	V-142
Tabla V-LI Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-3/4-0 y M4-3/4-1.....	V-142
Tabla V-LII Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-1-0 y M4-1-1 .....	V-143
Tabla VI-I Costo de los Modelos de los Puentes.....	VI-147
Tabla VI-II Costo Del Encamisado Del Modelo 1 .....	VI-148
Tabla VI-III Costo Del Encamisado Del Modelo 2 .....	VI-149
Tabla VI-IV Costo Del Encamisado Del Modelo 3.....	VI-149
Tabla VI-V Costo Del Encamisado Del Modelo 4 .....	VI-149
Tabla A. 1 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-0.....	VII-159
Tabla A. 2 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-3/8-0.....	VII-159
Tabla A. 3 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-1/2-0.....	VII-159
Tabla A. 4 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-5/8-0.....	VII-160
Tabla A. 5 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-3/4-0.....	VII-160
Tabla A. 6 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-1-0.....	VII-160
Tabla A. 7 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-3/8-1.....	VII-160
Tabla A. 8 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-1/2-1.....	VII-161
Tabla A. 9 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-5/8-1.....	VII-161
Tabla A. 10 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-3/4-1.....	VII-161
Tabla A. 11 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-1-1.....	VII-161
Tabla A. 12 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-0.....	VII-162
Tabla A. 13 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-3/8-0.....	VII-162
Tabla A. 14 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-1/2-0.....	VII-162
Tabla A. 15 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-5/8-0.....	VII-162
Tabla A. 16 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-3/4-0.....	VII-163





Tabla A. 17 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-1-0.....	VII-163
Tabla A. 18 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-3/8-1.....	VII-163
Tabla A. 19 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-1/2-1.....	VII-163
Tabla A. 20 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-5/8-1.....	VII-164
Tabla A. 21 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-3/4-1.....	VII-164
Tabla A. 22 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-1-1.....	VII-164
Tabla A. 23 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-0.....	VII-164
Tabla A. 24 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-3/8-0.....	VII-165
Tabla A. 25 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-1/2-0.....	VII-165
Tabla A. 26 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-5/8-0.....	VII-165
Tabla A. 27 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-3/4-0.....	VII-165
Tabla A. 28 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-1-0.....	VII-166
Tabla A. 29 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-3/8-1.....	VII-166
Tabla A. 30 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-1/2-1.....	VII-166
Tabla A. 31 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-5/8-1.....	VII-166
Tabla A. 32 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-3/4-1.....	VII-167
Tabla A. 33 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-1-1.....	VII-167
Tabla A. 34 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-0.....	VII-167
Tabla A. 35 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-3/8-0.....	VII-167
Tabla A. 36 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-1/2-0.....	VII-168
Tabla A. 37 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-5/8-0.....	VII-168
Tabla A. 38 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-3/4-0.....	VII-168
Tabla A. 39 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-1-0.....	VII-168
Tabla A. 40 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-3/8-1.....	VII-169
Tabla A. 41 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-1/2-1.....	VII-169
Tabla A. 42 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-5/8-1.....	VII-169
Tabla A. 43 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-3/4-1.....	VII-169
Tabla A. 44 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-1-1.....	VII-170
Tabla B. 1 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-0.....	VII-171
Tabla B. 2 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-3/8-0.....	VII-171
Tabla B. 3 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-1/2-0.....	VII-172





Tabla B. 4 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-5/8-0.....	VII-172
Tabla B. 5 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-3/4-0.....	VII-172
Tabla B. 6 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-1-0.....	VII-172
Tabla B. 7 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-3/8-1.....	VII-172
Tabla B. 8 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-1/2-1.....	VII-172
Tabla B. 9 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-5/8-1.....	VII-172
Tabla B. 10 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-3/4-1.....	VII-172
Tabla B. 11 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-1-1.....	VII-172
Tabla B. 12 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-0.....	VII-172
Tabla B. 13 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-3/8-0.....	VII-172
Tabla B. 14 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-1/2-0.....	VII-172
Tabla B. 15 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-5/8-0.....	VII-172
Tabla B. 16 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-3/4-0.....	VII-172
Tabla B. 17 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-1-0.....	VII-172
Tabla B. 18 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-3/8-1.....	VII-172
Tabla B. 19 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-1/2-1.....	VII-172
Tabla B. 20 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-5/8-1.....	VII-172
Tabla B. 21 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-3/4-1.....	VII-172
Tabla B. 22 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-1-1.....	VII-172
Tabla B. 23 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-0.....	VII-172
Tabla B. 24 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-3/8-0.....	VII-172
Tabla B. 25 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-1/2-0.....	VII-172
Tabla B. 26 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-5/8-0.....	VII-172
Tabla B. 27 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-3/4-0.....	VII-172
Tabla B. 28 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-1-0.....	VII-172
Tabla B. 29 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-3/8-1.....	VII-172
Tabla B. 30 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-1/2-1.....	VII-172
Tabla B. 31 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-5/8-1.....	VII-172
Tabla B. 32 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-3/4-1.....	VII-172
Tabla B. 33 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-1-1.....	VII-172
Tabla B. 34 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-0.....	VII-172
Tabla B. 35 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-3/8-0.....	VII-172





---

Tabla B. 36 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-1/2-0.....	VII-172
Tabla B. 37 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-5/8-0.....	VII-172
Tabla B. 38 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-3/4-0.....	VII-172
Tabla B. 39 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-1-0.....	VII-172
Tabla B. 40 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-3/8-1.....	VII-172
Tabla B. 41 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-1/2-1.....	VII-172
Tabla B. 42 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-5/8-1.....	VII-172
Tabla B. 43 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-3/4-1.....	VII-172
Tabla B. 44 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-1-1.....	VII-172





## NOTACIÓN

<b>CR</b>	concreto reforzado	<b>D</b>	diámetro de la sección transversal de la columna.
<b>FRP</b>	polímero de fibra reforzada.	<b>f'cc</b>	resistencia máxima a compresión del concreto confinado.
<b>FHWA</b>	Federal Highway Administration.	<b>f<sub>yi</sub></b>	esfuerzo de fluencia del acero.
<b>CFRP</b>	polímero reforzada con fibras de carbón.	<b>ε<sub>sm</sub></b>	deformación al esfuerzo máximo del acero.
<b>LRB</b>	apoyo laminado con alma de plomo.	<b>t</b>	espesor de las placas de acero (mm).
<b>BMSDF</b>	Base Mexicana de Datos de Sismos Fuerte.	<b>f<sub>i</sub></b>	es el esfuerzo provocado en el encamisado de acero. Cuando el módulo del Acero es igual a 200GPa, se tomará f <sub>i</sub> como 200MPa a una deformación de 0.001.
<b>P</b>	ondas primarias.	<b>f<sub>s</sub></b>	esfuerzo de confinamiento requerido en el encamisado de acero.
<b>S</b>	ondas secundarias.	<b>H<sub>pila</sub></b>	altura de pila.
<b>MMI</b>	Escala de Mercalli Modificada.	<b>SIGL</b>	sistema de un grado de libertad.
<b>MSK</b>	Escala Medvedev – Sponheuer – Karnik.	<b>ATC</b>	Applied Technology Council.
<b>M<sub>s</sub></b>	Escala de Magnitud de Onda superficial.	<b>FEMA</b>	Agencia Federal para la Gestión de Emergencias.
<b>M<sub>b</sub></b>	Escala de Magnitud de Ondas de Cuerpo.	<b>ADRS</b>	Acceleration-Displacement Response Spectra.
<b>M<sub>L</sub></b>	Escala de Magnitud Local.	<b>S<sub>a</sub></b>	aceleración espectral.
<b>M<sub>w</sub></b>	Escala de Magnitud de Momento.	<b>S<sub>d</sub></b>	desplazamiento espectral.
<b>CFE</b>	Comisión Federal de Electricidad).	<b>PF<sub>i</sub></b>	factor de participación modal para el primer modo natural.
<b>PGA</b>	pico de aceleración máxima.	<b>α<sub>i</sub></b>	coeficiente de masa modal para el primer modo natural.
<b>R</b>	distancia epicentral.	<b>w/g</b>	masa asignada al nivel i.
<b>NTC</b>	Normas Técnicas Complementarias.		
<b>f'y</b>	esfuerzo de fluencia del acero.		
<b>Ag</b>	área bruta de la sección.		
<b>Φ</b>	diámetro.		
<b>f'c</b>	esfuerzo a compresión máximo en el concreto.		
<b>Υ</b>	peso específico de algún material.		
<b>in</b>	pulgada.		
<b>ε<sub>cm</sub></b>	deformación al esfuerzo máximo del concreto.		

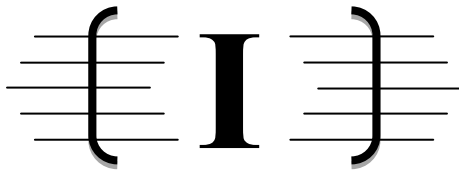




$\emptyset_{i1}$	amplitud del modo 1 en el nivel i.	$P_r$	es la probabilidad que se exceda un estado límite de daño.
N	último nivel.	$D$	es la demanda de la estructura.
V	cortante en la base.	$C$	es la capacidad de la estructura.
W	carga muerta más carga viva probable.	$X$	es una variable aleatoria.
$\Delta_{roof}$	desplazamiento en la azotea.	$\lambda$	es el valor de la media del logaritmo de la variable.
$L_p$	longitud de articulación plástica (in).	$\xi$	es el valor de la desviación estándar del logaritmo de la variable. Es un valor que representa la dispersión del comportamiento de las variables aleatorias, en este caso está relacionada a la base de datos utilizadas para determinar el nivel de desempeño de las estructuras.
L	altura de la columna (in).	N	ningún daño.
$f_{ye}$	esfuerzo de fluencia del acero longitudinal (lb/in <sup>2</sup> ).	L	daño ligero.
$d_{bl}$	diámetro de la varilla longitudinal (in).	M	daño moderado.
$l_p$	longitud de articulación plástica (mm).	E	daño extensivo.
$s_g$	espacio vertical entre las placas de acero a la base o parte superior del elemento, por lo general se toma como 50mm.	C	daño completo.
$\chi$	es un coeficiente que vale 6 para $f_y = 275\text{MPa}$ y 9 para $f_y = 414\text{MPa}$ .	<b>CTPSR</b>	costo total del puente con el sistema de refuerzo.
$d_b$	diámetro de las varillas que corresponden al refuerzo longitudinal (mm).	<b>PF</b>	probabilidad de falla.
V	cortante en la base.	<b>RC</b>	relación de costo de la pérdida esperada.
$\theta$	distorsión angular o drift.	<b>CP</b>	costo de construcción de un puente nuevo por metro cuadrado.
$\mu_\phi$	ductilidad de curvatura.	<b>CSR</b>	costo del sistema de refuerzo.
D	desplazamiento en la parte superior de la columna.		
H	altura de la columna.		
$\phi_m$	es la curvatura máxima que se tiene en la sección transversal del elemento.		
$\phi_y$	es la curvatura a la fluencia.		







## ESTADO DEL CONOCIMIENTO DE SISTEMAS DE REFUERZO DE PILAS DE PUENTES EXISTENTES DE CR

### I.1. Introducción

**E**n Estados Unidos el refuerzo de puentes en carreteras comenzó en California después del sismo de San Fernando en 1971 por el Departamento de Transporte de California (*CALTRANS* por sus siglas en inglés, “California Department of Transportation”) (Jackson, 1992). Los sistemas de refuerzo que se implementaron después de ese sismo fueron cables para sujetar a las vigas, con ello se buscaba que éstas no cayeran de sus soportes por falta de longitud de asiento; y la colocación de barras de alta resistencia dentro de la superestructura para reducir los desplazamientos relativos en las juntas de dilatación (Federal Highway Administration (FHWA), 2006).

Cuando se había pensado que el problema en el refuerzo de puentes estaba controlado llegó el sismo de Whittier Narrows en 1987. Este sismo trajo como experiencia que los puentes que habían sido restringidos en las juntas de dilatación habían alterado el comportamiento global del puente presentando daños severos en las columnas de los puentes (Federal Highway Administration (FHWA), 2006). Es debido a esto, que un segundo programa de refuerzo comenzó. Pero éste estaba enfocado al refuerzo de columnas aisladas (Jackson, 1992). El sistema de refuerzo que se implementó fue el encamisado de acero para aumentar el confinamiento del elemento.

Cuando aún el programa surgido del sismo de Whittier Narrows en 1987 se estaba implementando ocurrió el sismo de Loma prieta en 1989. Tras este trágico suceso, se pudo ver que los cables para sujetar a las vigas no funcionaron, lo cual ya había sido comprobado en pruebas de laboratorio donde se había observado que presentaban una falla no dúctil. El peor desastre en este siniestro fue el colapso del viaducto Cypress en la Interestatal 880 (Figura I-1).



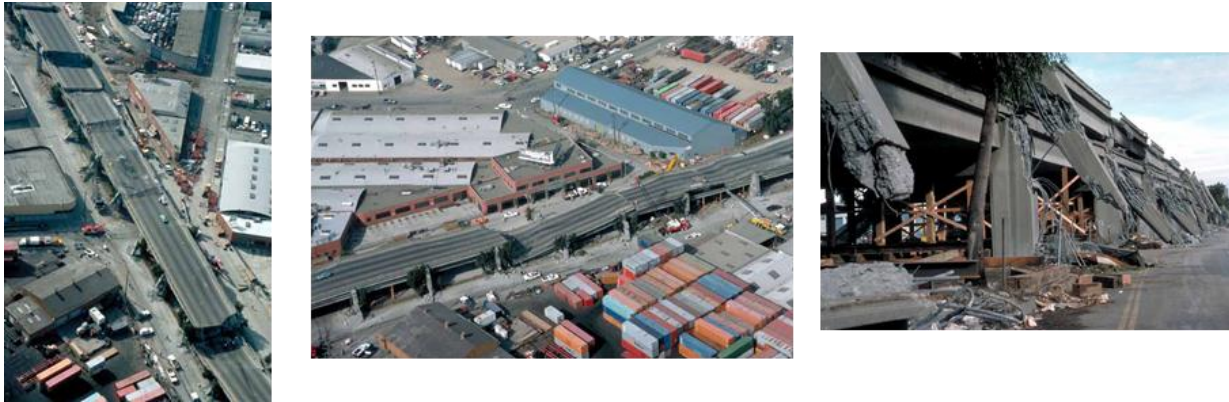


Figura I-1. Daños causados por el Sismo de Loma Prieta en el Viaducto Cypress en la Interestatal 880 en 1989.  
[http://en.wikipedia.org/wiki/1989\\_Loma\\_Prieta\\_earthquake](http://en.wikipedia.org/wiki/1989_Loma_Prieta_earthquake)

A partir de entonces el refuerzo de puentes abrió un campo de investigación enorme que aún hoy no se vislumbra cuando vaya a terminar. Es por esto, que se considera a la implementación de sistemas de refuerzo una práctica común en nuestros días.

## I.2. Reforzar

Reforzar, consiste en mejorar las características generales de una estructura para que presente un mejor comportamiento. Estas características a mejorar son: capacidad a la flexión y al cortante, confinamiento, capacidad a carga axial y ductilidad. Sin embargo, para llegar a tomar la decisión de reforzar una estructura se tuvo que hacer todo un análisis donde intervienen factores *sociales*, *ingenieriles*, *políticos* y *económicos* (Federal Highway Administration (FHWA), 2006). Aunque si bien, se pueden optar por otras medidas tales como clausurar o demoler la estructura para hacer una nueva. Por ejemplo, demoler una estructura es una medida que se produce como resultado del análisis de los factores mencionados donde indicaría que el reforzar tendría un costo más elevado que el de construir una nueva estructura. De esta manera, la nueva estructura tomaría en consideración las demandas y normativa actuales.

Se refuerza una estructura, no porque este dañada sino porque se quiere mejorar el comportamiento de ésta ante las demandas actuales que tiene. Aunque, sí algún elemento aislado (por ejemplo, una columna de concreto reforzado) está dañado severamente en toda su longitud o parte de ella se considera como refuerzo el





reemplazo total o parcial del elemento, agregar uno o varios elementos para que soporten las demandas a las que está sujeta la estructura. O bien, reforzar los elementos para que aumenten sus capacidades a la flexión, al cortante y su ductilidad.

Una buena forma de visualizar si una estructura es indicada para ser reforzada es por medio del diagrama que se ilustra en la Figura I-2 (aunque está aplicado a puentes, el principio puede ser extendido a cualquier otra estructura). Los puntos clave a resaltar son:

- ◆ **Priorizar:** En esta etapa se investiga si la estructura a reforzar tiene un valor histórico, social o económico importante.
  
- ◆ **Evaluar los daños que presenta:** Los daños que presentan las estructuras se deben a diversos factores:
  - **Sismos.** En buena medida es porque es imposible predecir la magnitud y mucho menos conocer a la perfección el comportamiento de las estructuras ante el sismo. Además, se tienen daños importantes en puentes donde se comenzaron a implementar elementos estructurales más esbeltos ya que fueron diseñados con una filosofía que no tomaba en cuenta el efecto de las fuerzas sísmicas mediante un análisis dinámico.
  
  - **Medio Ambiente.** Este factor está en directa relación con el sitio donde se construye la estructura e indirectamente con el proceso constructivo y los materiales usados. Ejemplos de estos sitios son: costas, suelos agresivos como los calcáreos, lugares donde se vierten aguas residuales o industriales, etc. Mientras que los factores de los procesos constructivos y de materiales son: No tener un buen curado de los elementos, no usar concretos con la proporción adecuada de materiales, dejar oquedades por donde se puedan filtrar agentes como cloruros o ácidos y que se presenten reacciones álcali-sílice (producidas por la combinación de cemento y agua “reacción alcalina” con los agregado pétreos). Los cuales provocan principalmente corrosión,





carbonatación, denconchamiento, laminación y desintegración del acero de refuerzo en los elementos de concreto reforzado. En Raina (1996), se pueden encontrar una serie de ejemplos donde explican la formación de la corrosión y carbonatación, el proceso de solución y como se aplica el sistema de refuerzo.

- *Cambios en las Demandas:* La gran mayoría de los puentes dañados en nuestro país y en una gran cantidad de regiones del mundo se debió principalmente al peso actual de los vehículos que transitan por ellos, es decir, los vehículos cada vez son más grandes y por ende más pesados. Con esto se altera el peso original idealizado considerado en la etapa de análisis y diseño.

Para realizar una evaluación de los daños en Buckle et al. (2006). Presenta una serie de pasos que nos pueden servir de guía, los cuales son: Evaluar detalladamente como fue construida la estructura y la condición actual después del sismo, Identificar posibles estrategias de refuerzo, Evaluar estas estrategias de refuerzo, Implicar al dueño y a los especialista que estarán a cargo del proceso de refuerzo para conseguir la estrategia más óptima y documentar la estrategia de refuerzo que se seleccionó.

- ◆ *Es necesario reforzar:* Cuando es necesario un sistema de refuerzo se procede a revisarlo para conocer si es suficiente para satisfacer las necesidades que presenta la estructura. Si no se logra el cometido, se vuelve a seleccionar otro sistema de refuerzo hasta que se obtiene el más efectivo para contrarrestar y mejorar las características sismo resistentes de la estructura. Esta elección también se debe tomar cuando se toman en cuenta ciertos elementos que no están

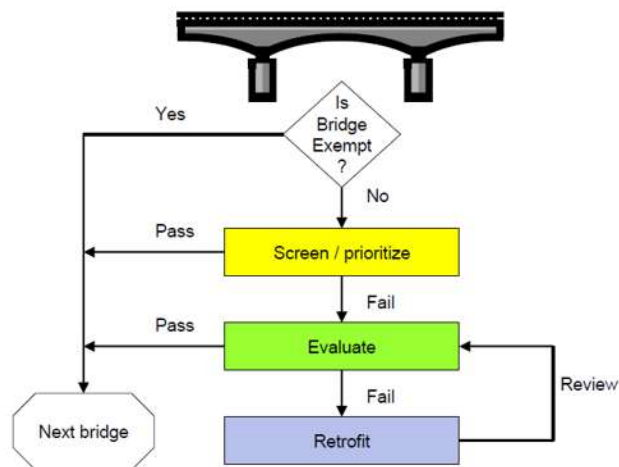


Figura I-2 Diagrama para conocer si una estructura es apta para ser reforzada.  
<http://mceer.buffalo.edu/research/HighwayPrj/Workshops/Portland/Ia-Buckle.pdf>





relacionados con la estructura. Entre los cuales se pueden mencionar: la estética de la estructura, que no se admita el cierre parcial por proceso de refuerzo y que el lugar donde se encuentre la estructura permita la instalación del sistema de refuerzo.

Los sistemas de refuerzo han evolucionado a tal medida, que el día de hoy, podemos encontrar un sinnúmero de sistemas de refuerzos que van desde el encamisado de concreto o materiales compuestos que día con día van evolucionando (Fibras de carbón, vidrio o aramidas) hasta los sistemas de control (disipadores de energía). Así, actualmente lo más importante al momento de planear el refuerzo de una zona dañada (Figura I-3) de un elemento estructural, no es el sistema en sí, sino el sistema que sea óptimo o más próximo para lograrlo al menor costo acompañado del mejor comportamiento estructural, sin que esto influya de manera directa en la calidad final del refuerzo y con ello se consiga el propósito deseado, el cual es aumentar la capacidad de los elementos dañados.

Dentro de esas capacidades podemos nombrar las siguientes:

- ◆ Mejorar la capacidad a la flexión y al cortante.
- ◆ Mejorar el confinamiento.
- ◆ Aumentar la ductilidad.



Figura I-3 Daño por cortante en las columnas de puentes debido al sismo de San Fernando en 1971.  
<http://antonio-magallon.20fr.com/photo.html>





### I.3. Sistemas De Refuerzo En Pilas De Puentes

Los sistemas de refuerzo que se aplican en las pilas de concreto han evolucionado con una gran velocidad a partir del sismo de Loma Prieta en 1989, tanto en las técnicas de aplicación de los sistemas de refuerzo, como en los materiales que los constituyen. Actualmente, se tiene una gran variedad de técnicas para reforzar. Los sistemas de refuerzo que se desarrollan en este capítulo son los encamisados de columnas mediante concreto reforzado, placas metálicas y Polímeros Reforzados con Fibras (FRP) además de los sistemas o dispositivos de control.

#### I.3.1. Encamisado De Columnas De Concreto Reforzado (RC)

El encamisado de columnas es una de las técnicas de refuerzo más utilizadas, la cual, consiste en envolver el elemento parcial o totalmente (Figura I-4). La adherencia del encamisado al elemento dañado se consigue por medio de pernos, anclas o resinas epóxicas. Los materiales que constituyen a los encamisados son diversos. Algunos de ellos son: placas metálicas, morteros, concreto, concreto reforzado, materiales compuestos (este último se ve en el apartado *Encamisado Con Polímeros Reforzados Con Fibras (FRP)*).



a)



b)



c)

Figura I-4 Aplicación parcial de los encamisados de concreto a), acero b) y FRP c).  
<http://desroches.ce.gatech.edu/sites/default/files/pubs/seismicretrofit.pdf>





### *1.3.1.1. Encamisado De Columnas Con Concreto Y Acero*

La forma que el encamisado va a asumir al final del refuerzo estará en relación directa con la sección original del elemento dañado. Esto obedece a que ciertas secciones de columnas de concreto al reforzarse conservando la sección original no presentan las cualidades que se supone que deberían presentar al haber sido reforzadas, como por ejemplo una mayor capacidad a la flexión, un mejor confinamiento, una mayor capacidad a carga axial, una mejor ductilidad. Este es el caso de las secciones rectangulares y cuadradas donde es preferible cambiarlas a secciones que presentan un mejor comportamiento estructural como son las secciones transversales del tipo circular, elíptica u octogonal. Un estudio sobre este comportamiento fue realizado por Tsai et al. (2002). Sin embargo, pueden ser conservadas cuidando la buena fijación de los elementos que se usan (barras) para darle el soporte transversal (Federal Highway Administration (FHWA), 2006). Algo que se debe tomar en cuenta al momento de reforzar la sección de un elemento rectangular cambiando su sección a una elíptica, es que se debe tener cuidado con el lado corto de la sección, ya que ésta en ocasiones tiene poco espesor, y el cambio de sección no es suficiente para lograr el objetivo del refuerzo, por lo que en ese caso se deben colocar elementos que proporcionen la capacidad necesaria (Jackson, 1992). El concreto y el acero a menudo son combinados y a partir de ello han dado origen a diversos tipos de encamisado para columnas de concreto reforzado. Estos sistemas son descritos a continuación.

#### *1.3.1.1.1. Encamisado A Base De Concreto Y Acero De Refuerzo*

Es un método que nos ayuda a incrementar la capacidad a la flexión del elemento. El proceso del encamisado se lleva a cabo colocando acero de refuerzo, el cual, puede ser varillas unidas con estribos o malla. Para después adherirle el concreto. Este método es preferible hacerlo a columnas con secciones circulares (Figura I-5). Sin embargo, puede aplicarse en secciones rectangulares teniendo especial cuidado en la fijación de las varillas que se incrustan a la columna para asegurar el soporte de los estribos. Este proceso se hace taladrando la columna rectangular sólo en las esquinas para luego colocar las varillas. Una vez dentro, se aplica una lechada de cemento para asegurar una buena trabazón. En la Figura I-6 puede verse el método aplicado a una columna rectangular usando malla.





Figura I-5 Aplicación del encamisado a base de concreto y acero de refuerzo a una columna circular en el puente Hernando DeSoto en Tennessee.  
<http://desroches.ce.gatech.edu/sites/default/files/pubs/seismicretrofit.pdf>

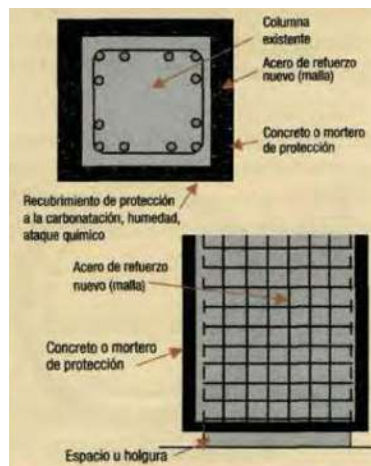


Figura I-6. Encamisado con malla de acero y concreto o mortero de protección.  
(Rendón Ospina & Zambrano López, 2007)

#### I.3.1.1.2. Encamisado Con Láminas De Acero (Rellenadas, Ancladas, Adheridas)

Al implementar este encamisado el elemento puede llegar a tener un aumento considerable en su capacidad axial, ductilidad y en la capacidad a la flexión. Este tipo de encamisado nos brinda la oportunidad de forzar la fluencia en las varillas lejos de zona de traslapes o donde las varillas fueron cortadas abruptamente (Federal Highway Administration (FHWA), 2006). Siendo esto una de las mejores aplicaciones que le puede dar a este método.







Son tres las alternativas que presenta este tipo de encamisado, las cuales son:

- ◆ La primera alternativa consiste en la colocación de láminas de acero dejando una pequeña holgura con la columna, la cual, será rellena con concreto o mortero con consistencia fluida o con un adhesivo como se muestra en la columna de abajo en la Figura I-7.
- ◆ La segunda alternativa es una modificación de la primera, la cual consiste en colocar una capa de concreto para uniformizar la superficie del elemento. Sobre esta capa se colocan las láminas de acero ya sea usando adhesivos o fijándolas por medio de pernos o grapas a ésta.
- ◆ La tercera alternativa consiste en hacer un cambio de sección en la columna cuando esta es cuadrada o rectangular. Cambiando la primera a una sección circular y la segunda a una sección elíptica. El material de relleno es concreto. Como se puede ver en la parte alta de la Figura I-7.

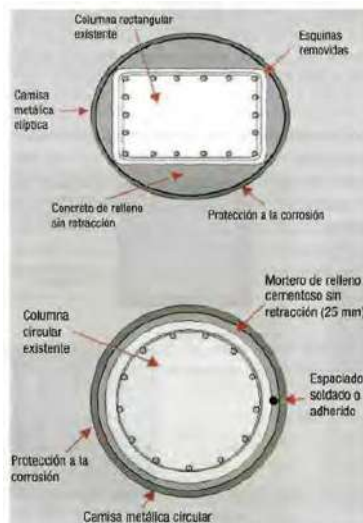


Figura I-7 Encamisado en acero para cambiar de una columna rectangular a elíptica y encamisado de acero con una capa previa de concreto para uniformizar el elemento. (Rendón Ospina & Zambrano López, 2007)





### *1.3.1.2. Encamisado Con Polímeros Reforzados Con Fibras (FRP)*

#### **1.3.1.2.1. Polímeros Reforzados Con Fibras (FRP)**

Los *Polímeros Reforzados con Fibras* (FRP, por sus siglas “Fiber-Reinforced Plastic” en inglés y tal como será designado de ahora en adelante) o *Materiales Compuestos (Composites)*, son fibras embebidas en una matriz polimérica. Las fibras proporcionan las propiedades mecánicas (resistencia y deformación), las cuales, dependen básicamente de su orientación frente a la carga impuesta, esto es, si son cargadas en forma paralela a la fuerza trabajarán correctamente mientras que si son colocadas en sentido perpendicular a ésta tendrá un desempeño deficiente al esperado; y la matriz polimérica le da el cuerpo al material. La matriz contribuye a la distribución de los esfuerzos entre las fibras y las protege de acciones ambientales y de posibles daños mecánicos.

Los FRP fueron investigados a principios del siglo pasado formalizándose en la década de 1930 y ya para 1970 se había establecido como una industria competitiva con una producción mayor que el acero (The Wikimedia Foundation, Inc., 2011). Sus primeras aplicaciones fueron en la aviación y la navegación. Sin embargo no paso mucho tiempo cuando se observó la aplicabilidad de este material en la industria de la construcción, como primer uso en 1980 en Japón fue implementado para dar confinamiento a columnas (Nova Ágora, S.L, 2011), posteriormente fue usado en el refuerzo de elementos dañados por el sismo de Loma Prieta en Estados Unidos, por ser considerado un material de bajo costo y rápido proceso constructivo. En nuestros días los FRP ya son ampliamente usados en la rehabilitación de estructuras de concreto, y desde hace un par de décadas se han hecho investigaciones para su implementación en estructuras de acero cuidando particularmente la adherencia entre el FRP al acero (Colombi & Carlo, 2005); y madera.

Los tipos de fibras que se utilizan en la elaboración de los FRP para uso de refuerzo en elementos de concreto dañados son:

- ◆ De carbón.
- ◆ De vidrio.
- ◆ Aramidas.





Mientras que los materiales que se usan para conformar la matriz polimérica son los siguientes:

- ◆ Resinas Epoxi (en general es la más usada para formar la matriz).
- ◆ Poliéster.
- ◆ Viniléster.

Junto a estos materiales, se llegan a usar aditivos para propiciar una mejor adhesión a los elementos de concreto, o para mejorar alguna característica en específico que se desee que posea el refuerzo.

Los FRP presentan características muy especiales sobre otros procedimientos. Estas propiedades son:

- ◆ Gran capacidad de resistencia a esfuerzos de tensión.
- ◆ Ligeros.
- ◆ Resistencia a la corrosión.
- ◆ Buen comportamiento a la fatiga.
- ◆ Rapidez constructiva.
- ◆ Bajo costo en la mano de obra que lo aplica.
- ◆ Reemplazo fácil del material cuando ha pasado su vida útil.

Estas propiedades sólo se alcanzan cuando:

- ◆ Se logra una precisa adherencia entre el FRP y la columna de concreto. Ya que esta unión es esencial para un perfecto refuerzo, varios investigadores han realizado trabajos experimentales y teóricos en este tema (Karsten & Werner, 2007), donde su estudio consistió en la realización de un modelo de elemento finito para evaluar la capacidad de adherencia entre los FRP y los elementos de concreto. Esto se llevó a cabo mediante la prueba de 5 corridas formadas por 37 pruebas con losas de concreto agrietadas y reforzadas mediante CFRP (Polímero Reforzado con Fibras de Carbón) y simuladas con un modelo 3D para efectuar los cálculos numéricos, lo





anterior tenía como fin estudiar la correlación entre los resultados experimentales y los teóricos.

- ◆ Se toman medidas para prevenir los cambios químicos o físicos de la matriz, la falta de adherencia entre las fibras y la matriz, la humedad, la temperatura (ciclo de hielo y deshielo) y la presencia de materiales químicos tales como sales o álcalis.

Los sistemas de refuerzo a base de FRP en nuestros días tienen un gran campo de aplicación en el refuerzo de elementos dañados, no sólo de columnas sino también de vigas, muros, mampostería y losas. Por lo que tiene un gran número de empresas que fabrican productos con este material. Lo que se necesita es una regulación para la correcta aplicación de este material.

#### **1.3.1.2.2. Polímeros Reforzados Con Fibras De Carbón (CFRP)**

*Los Polímeros Reforzados con Fibras de Carbón (CFRP, "Carbon-Fiber-Reinforced Plastic", por sus siglas en inglés y tal como será designado de ahora en adelante).* Dentro de los FRP, el CFRP es en general el más utilizado en el refuerzo de estructuras de concreto y por ende de los más investigados y modificados para cumplir con las necesidades de refuerzo actuales. En el mercado se pueden encontrar en forma de: *tejidos con orientación de fibras unidireccional o bidireccionalmente*, los cuales se usan a menudo para prevenir daños por movimientos sísmicos y para refuerzo a cortante; y en *Laminados* que son producidos por un proceso de pultrusión, mediante este proceso obtiene un material con propiedades más homogéneas tanto en composición como en comportamiento. Son empleadas fundamentalmente para el refuerzo por flexión y cortante en estructuras sometidas a cargas dinámicas, tales como puentes.

Sin embargo, no es un material perfecto, presenta ciertos defectos que en ocasiones son factores que influyen en la elección del tipo fibra (de vidrio o aramida, usualmente las usadas en la ingeniería civil) al momento de reforzar un elemento. Existen otros factores que influyen en la elección del material compuesto a implementar entre los cuales se tienen: alto costo (principal motivo), baja resistencia al impacto de baja energía y puede llegar a corroerse ya que la fibra de carbón presenta la diferencia de potencial al contacto con otros metales (sólo en caso de que se encuentre expuesta).





Aún con ello los CFRP tienen propiedades que las hacen atractivas para ser implementadas en el refuerzo de estructuras, entre las cuales se encuentran:

- ◆ Módulo de elasticidad elevado.
- ◆ Gran resistencia a la tensión.
- ◆ No presenta plasticidad (límite de rotura igual al límite elástico)
- ◆ Alta resistencia a temperaturas elevadas.
- ◆ Buena conductividad eléctrica y térmica.
- ◆ Peso bajo del material.

Por esto y su versatilidad para ser implementados, los FRP son materiales muy utilizados, a tal grado que podemos encontrarlos en la industria de la construcción como perfiles estructurales, tendones de pretensados, sistemas estructurales (Figura I-8) (De Diego Villalón, et al., 2008) y principalmente como refuerzo para elementos de concreto armado.



Figura I-8 Primer Puente de Materiales Compuestos Construido en España.  
(De Diego Villalón, et al., 2008)



*1.3.1.2.2.1. Forma De Aplicación De Los Polímeros Reforzados Con Fibras De Carbón (CFRP)*

Los CFRP son usados en la industria de la construcción principalmente como refuerzo en edificios, puentes, silos, túneles de concreto y tuberías en los elementos dañados, tales como losas, muros o paredes, columnas y vigas. Los CFRP pueden encontrarse en el mercado ya sea en forma de láminas, barras o en sus dos componentes básicos el polímero y la fibra en forma de tejido. Esta última combinación forma al CFRP en situ, es decir, se va colocando la resina y sobre esta se coloca el tejido de la fibra repitiéndose tantas veces como el número de vueltas haya resultado del cálculo efectuado. Los modos de aplicar este material principalmente son colocarlos en forma de tiras de CFRP (como en las losas o trabes) o revestir parcial o totalmente el elemento (en trabes se procede hacer el revestimiento en forma de U mientras que en columnas se hace el revestido en zonas dañadas o completamente).



a)



b)



c)

Figura I-9 a) Revestimiento en Forma de U, b) Encamisado de columna y c) Refuerzo en Muros con tiras de CFRP.  
<http://www.constructionssystemsbasf-cc.es/ES/productos-sistemas/catalogos/Documents/sistema-integral-refuerzo-estructuras-mbrace.pdf>





La práctica común en el refuerzo de columnas de puentes es aplicar el CFRP en forma de encamisado. Con este procedimiento se obtiene un aumento considerable en la capacidad a la flexión y al cortante, en el confinamiento y ductilidad del elemento. Este encamisado puede aplicarse por medio de una o varias capas de CFRP (dicha cantidad obedece al resultado del análisis que se realiza) y presenta dos variantes. La primera es dejar la forma de la sección original y la segunda es cambiar la sección, es decir, las secciones rectangulares y cuadradas se cambian a una forma circular o elíptica, las cuales, son las mejores formas al momento de reforzar el elemento (Yan, et al., 2008).

La forma en cómo se aplica este material es hasta cierto punto fácil e intuitiva. El procedimiento consiste en la limpieza de la zona donde se va aplicar el CFRP por medio de procesos químicos o mecánicos (técnica de chorro de arena o agua), después de ello se coloca una capa de resina epóxica procediendo a colocar el tejido de fibra (a este proceso se le llama “*wet lay-up*” o fabricado in situ) o la lámina de CFRP, siendo esta etapa crucial para el buen funcionamiento del sistema de refuerzo.



Figura I-10 Aplicación de FRP a una columna circular manteniendo la sección original.  
<http://rbconspro.wordpress.com/2009/11/14/reforzamiento-estructural-con-fibras-de-carbono/>





### I.3.2. Sistemas De Control

Los sistemas o dispositivos de control al ser instalados en las estructuras, tales como puentes, edificios, monumentos históricos, torres de transmisión, etcétera tienen como principal objetivo reducir las aceleraciones que llegan a la estructura por parte de la fuerza externa (viento o sismo principalmente). Esto se hace cambiando el periodo de vibración de la estructura y absorbiendo la energía de la fuerza externa que afecta a ésta, esto es, desarticular las fuerzas que producen el movimiento para que el sistema de control tome toda o un gran porcentaje de la energía y el resto lo tome la estructura. Con lo cual, se logra que no se presenten fuerzas que pueden dañar de manera significativa a la estructura o de llegarse a presentar estén por debajo de las fuerzas con las que la estructura fue diseñada. Estas fuerzas que afectan a los edificios y puentes son principalmente el sismo y el viento; las cuales nos sirven de referencia para realizar el análisis o diseño de la misma. El desarrollo del modelo analítico de los sistemas de control lo podemos encontrar en el trabajo de Oviedo et al. (2006)

En la actualidad los sistemas de control pueden ser clasificados en tres tipos básicamente: pasivos, activos y semi-activos (híbridos) (Olmos, et al., 2010). La clasificación detallada de los sistemas de control y sus principales aplicaciones dentro de los edificios la podemos encontrar en el trabajo hecho por Montanaro (2002) o en el trabajo de Oviedo et al. (2006). Los sistemas de control son colocados entre la cimentación y la superestructura en caso de edificios mientras que en puentes son colocados entre la subestructura y la superestructura.

*Los Sistemas o Dispositivos De Control Pasivo* se caracterizan por no usar alguna fuente de energía externa ni mecanismo electrónico para que funcionen. Sino que responden automáticamente cuando las fuerzas externas (sismo o viento) comienzan a producir el movimiento. Los sistemas de control pasivo son en general los más usados por su bajo costo, fácil mantenimiento, eficacia y sencillez. Estos dispositivos de control pasivo se pueden clasificar como se presenta en la Figura I-11. Se tomó como guía el trabajo de Villanueva (2011). Aunque no es una clasificación definitiva nos proporciona los sistemas más utilizados.







El Puente Infiernillo II ubicado en la carretera Nueva Italia – Lázaro Cárdenas en el estado de Michoacán, que se ilustra en la Figura I-12, es un ejemplo de puente que posee un sistema de control pasivo. El sistema con el que cuenta es un sistema deslizable multidireccional con disipador de energía.

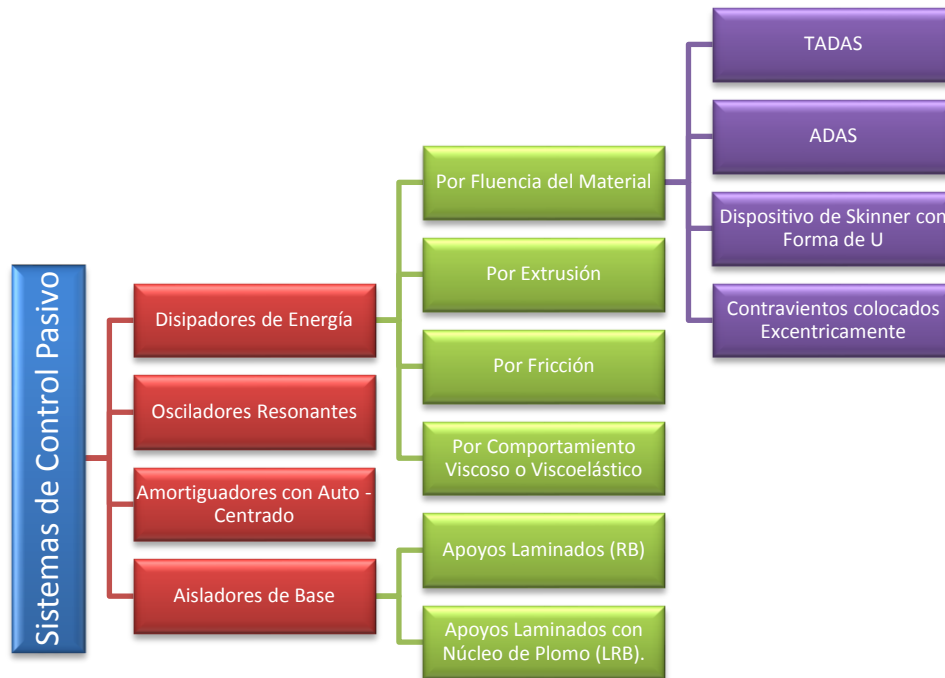


Figura I-11 Clasificación de Sistemas o Dispositivos de Control Pasivo (Villanueva Monroy, 2011).



Figura I-12 Puente Infiernillo II ubicado en la carretera Nueva Italia – Lázaro Cárdenas en el estado de Michoacan.  
<http://static.panoramio.com/photos/original/6591528.jpg>





### 1.3.2.1. Sistemas De Aislamiento De Base

De los sistemas de control que se mencionaron el más utilizado son las variantes del sistema de aislamiento de base como el de *apoyo laminado con alma de plomo* (LRB) (Figura I-13) que pertenece a los sistemas de control pasivos, los cuales, tienen como objetivo llevar a la estructura a un periodo tal que éste no sea igual al periodo dominante del sismo, además su instalación aumenta el amortiguamiento y limita las fuerzas que se transmiten de la superestructura a la subestructura. La aplicación de este sistema se debe a que es un sistema económico tanto en la instalación, mantenimiento y reparación o remplazo.

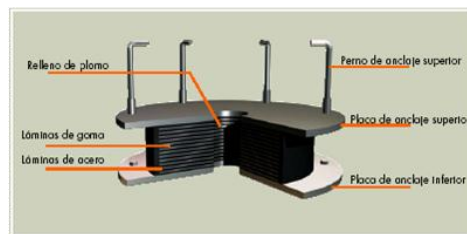


Figura I-13 apoyo laminado con alma de plomo (LRB).

[http://bp0.blogger.com/\\_qFJEJ54NBZo/RkcYJMHnoOI/AAAAAAAAAW8/ZVs1fzM-Wog/s1600-h/Imagen9.png](http://bp0.blogger.com/_qFJEJ54NBZo/RkcYJMHnoOI/AAAAAAAAAW8/ZVs1fzM-Wog/s1600-h/Imagen9.png)

Estos sistemas por lo general son instalados en puentes que se encuentran en suelos firmes. Sin embargo en el estudio de Olmos et al. (2010), comprueban que pueden ser usados en suelos de flexibilidad intermedia mejorando con ello la respuesta dinámica del puente.

Los beneficios que se obtienen al instalar los sistemas de disipación son:

- ◆ Disminución en la demanda de los desplazamientos a través de la disipación de energía desarrollada en los disipadores (amortiguamiento).
- ◆ Modificar el periodo de vibración del puente. Esto resulta en una respuesta de baja demanda de aceleración (sólo se debe tener cuidado que al hacer el cambio no se produzcan desplazamientos muy grandes en la base que resulten inadmisibles)
- ◆ Se produce la disipación de energía por comportamiento histerético reduciendo aún más la respuesta del sistema.





Los sistemas de aislamiento de base no son una panacea. Sino que tienen que ser usados en los casos siguientes tal y como lo menciona Jara et al (2010):

- ◆ Regiones donde se esperan movimientos del terreno con frecuencias dominantes altas.
- ◆ Estructuras que se ubican cerca de fallas potenciales. Esto debido a que en estas circunstancias no se permite la disipación de energía histérica por la existencia de pulsos de velocidad muy grandes y pocas oscilaciones.
- ◆ Un puente con pilas muy esbeltas. En este caso en particular ya no es tan necesario puesto que ya está aislado naturalmente por lo que la ventaja de implementarlo sería poca. Siendo la única ventaja al colocar el sistema de base es uniformizar la rigidez del subsistema pila-aislador si existe.

**Los Sistemas o Dispositivos De Control Activo** a diferencia de los sistemas de control pasivo necesitan de una fuente de alimentación externa ya que su respuesta está en función de las señales que envían los sensores que se colocan en la estructura y que son enviados a una computadora que convierte estas señales para que los actuadores puedan contrarrestar la fuerza que produce el sismo. Este proceso se muestra en la Figura I-14. Sin embargo, esta forma de actuar tan automática hace que sea su principal defecto ya que si llega a faltar la energía eléctrica o los sensores no envían la información correcta (por fallas en el sensor o por no ser un número adecuado de sensores) el sistema dejará de funcionar o simplemente responderá de manera inadecuada frente al sismo. Un ejemplo de la aplicación de los sistemas de control activo lo posee el puente colgante con cables atirantados “*Khor al Batah Omán*”, que se puede ver en la Figura I-15. Está ubicado en el Sur Omán en medio oriente. Tiene una longitud de 204m y un ancho de 10m. El sistema activo consta de 3 tirantes activos a cada lado del puente, esto con el fin de evitar oscilaciones debidas al viento. Ejemplos de edificios donde se aplican los sistemas activos se pueden observar en Spencer et al. (1997).

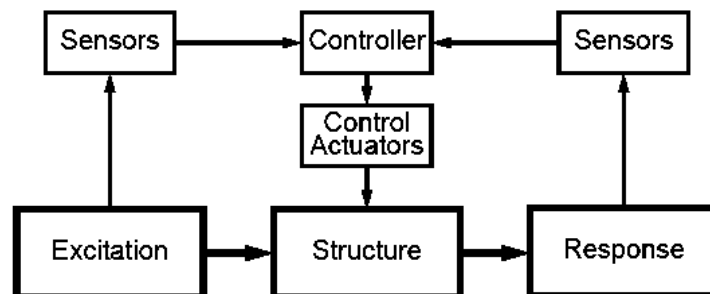


Figura I-14 Esquema del problema de control estructural de los sistemas de control activo. Spencer et al (1997)





Figura I-15 Puente “Khor al Batah Omán” que se ubica en el Sur Omán y que consta de un sistema que consta de 3 tirantes activos a cada lado del puente.  
[http://www.sbp.de/es/build/sheet/1536-Stra%C3%9Fenbr%C3%BCcke\\_Khor\\_al\\_Batah\\_Oman.pdf](http://www.sbp.de/es/build/sheet/1536-Stra%C3%9Fenbr%C3%BCcke_Khor_al_Batah_Oman.pdf).

*Los Sistemas o Dispositivos de Control Híbridos* como su nombre lo indica son una mezcla de los dos sistemas anteriores, el pasivo y el activo. Por ejemplo en Molinares (2003) propuso un sistema híbrido en un edificio y lo comparo con un sistema pasivo y comento que “Mediante un amplio estudio numérico se muestra que el sistema propuesto mejora el comportamiento global del edificio, especialmente para excitaciones con frecuencias dominantes, para los cuales la respuesta de la estructura con control pasivo es máxima” (p. 60). Además presenta el cálculo que se efectuó para el sistema híbrido y el sistema pasivo. Algunos de los sistemas más representativos de este tipo son descritos en Spencer et al. (1997). Un ejemplo de la aplicación de estos sistemas es la Torre Park Shinjuku donde se instaló un sistema de control híbrido con amortiguador de masa (Figura I-16).



Figura I-16 Torre Park Shinjuku donde se instaló un sistema de control híbrido con amortiguador de masa.  
<http://www.revista.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/1742/11580>





### I.3.3. Comentarios

Actualmente el desarrollo de los sistemas de refuerzo ha llegado a tal grado, que se ha creado alrededor de éste todo un mercado a nivel mundial. Aunque exista reglamentación en países como Estados Unidos, Japón, etcétera. Desafortunadamente, la reglamentación no va al ritmo con el avance tecnológico de estos sistemas de refuerzo. Por lo que la mayoría de las guías de consulta son producidas por los fabricantes de los sistemas de refuerzo.

Como se ha visto en el subcapítulo de los FRP son materiales muy nobles, los cuales pueden ser ajustados de acuerdo al diseño del proyecto de refuerzo. Además, por las propiedades actuales que posee este material y las nuevas que se están generando a raíz de la investigación que se lleva a cabo a nivel mundial. Se ha podido observar en muy poco tiempo que los FRP son materiales idóneos para el refuerzo de elementos dañados. A pesar del costo de los FRP, se ha observado que cuando se realiza una buena investigación de los daños, una buena programación del proyecto de refuerzo y teniendo en cuenta el mantenimiento a largo plazo, se ha llegado a la conclusión que la inversión en la utilización de este tipo de materiales es razonablemente buena. Esto debido a que el mantenimiento no es tan costoso, puesto que no es necesario contar con un personal tan grande ni equipo sofisticado, además no es necesario interferir en el funcionamiento de la estructura y no es un sistema de refuerzo invasivo.

En la actualidad el sistema de refuerzo a base de FRP ha ido desplazando a los encamisados de concreto y acero. Las principales causas por las que sucede esto son (Elementa Soluciones Estructurales, 2005):

- ◆ Todas las partes metálicas se pueden remplazar por una única sección equivalente de material compuesto (o composite). (*Capacidad para remplazar cualquier pieza de acero*).
- ◆ Los composites tienen un alto módulo elástico. Tienen un módulo más elevado que el acero y sólo pesan una quinta parte que este. (*Mayor resistencia*).
- ◆ El acero entra en fatiga cuando se le somete al 50% de su resistencia a la tensión. Los composites no muestran fatiga hasta, como mínimo, el 90% de su resistencia a tensión. (*Mejor comportamiento a la fatiga*).





- ◆ Los composites no se oxidan. El acero se oxida ante la presencia de agua y aire, y precisan de un cuidado especial, siendo obligado el uso de pinturas protectoras (alto costo en mantenimiento y reparación). La matriz polimérica de un composite protege las fibras de refuerzo. *(No presenta oxidación).*
- ◆ El coeficiente de expansión térmica de los composites es muy próximo a cero. Debido a ello, ofrecen una gran estabilidad dimensional frente a los refuerzos metálicos. *(Permanecen sus dimensiones ante cambios de temperatura).*
- ◆ Los composites se fabrican en grandes longitudes, permitiendo cubrir grandes luces sin necesidad de ejecutar juntas, soldaduras, mecanizar piezas, etc. Todo ello deriva en un menor tiempo de fabricación, de instalación y de costes. *(Practicidad).*
- ◆ Para la aplicación de un composite, se requiere de herramientas ligeras de mano. Los refuerzos metálicos se deben instalar mediante maquinaria pesada, puntales, soldaduras, etc. Los costes de instalación de un refuerzo de material compuesto son muy bajos y reducen el coste global de un refuerzo. *(Fácil instalación, no es necesario un gran número de trabajadores ni equipo sofisticado para su instalación).*

La reglamentación para el uso de los sistemas de refuerzo con base en materiales FRP es otro punto importante que se tiene que tomar en cuenta. Si bien, existe una normativa en casi todos los países donde se desarrollan estos sistemas como es el caso de Estados Unidos y Japón. El inconveniente reside en que esta normativa no se actualiza al ritmo que lo hacen los productos en el mercado. Es por esto que la mayoría de las guías de consulta son las que te proporcionan los fabricantes.

En cuanto a los sistemas de control, los del tipo pasivo son lo que más se aplican. Esto debido a las ventajas que éste presenta sobre los demás tipos de sistemas de control por ventajas tales como: costo, sencillez de instalación y reparación, bajo costo de mantenimiento y en caso de ser removidos no es tan complicado el proceso para realizarlo. En la actualidad debido al avance en las investigaciones de cómo funcionan los sistemas de control activo y la nueva tecnología en cuanto a procesamiento de información y fuentes de alimentación se ha podido aplicar este tipo de sistema de control más ampliamente en edificios, los cuales, ahora son llamados Edificios Inteligentes (EI). Cabe señalar que para que sea definido como tal necesita poseer otras características,





las cuales son mencionadas en (Grupo Solides, s.f.). Al igual que otros sistemas de refuerzo el costo es un factor decisivo para la toma de decisión al momento de instalarlos. Sin embargo, la inversión que se puede llevar inicialmente la obra, rehabilitación o refuerzo no se compara con las pérdidas que un sismo puede causar, tales como: la deficiencia que puede llegar a presentar la estructura en sus acabados o en los sistemas no estructurales (los cuales en ocasiones superan el costo de la estructura) y sobretodo las pérdidas humanas, que al fin de cuentas es lo más importante cuando se idealiza una construcción.

#### I.3.4. Tendencias En Los Sistemas De Refuerzo

Como todo proceso que se aplica en la industria de la construcción los sistemas de refuerzo están siguiendo ciertas tendencias, las cuales, se citan a continuación:

- ◆ Las investigaciones en encamisados de concreto y acero están más orientadas a la optimización del uso de los materiales que componen al sistema.
- ◆ Los encamisados de FRP comienzan a desplazar a los encamisados de acero porque tienen *capacidad para remplazar cualquier pieza de acero, mayor resistencia, mejor comportamiento a la fatiga, no presenta oxidación, permanecen sus dimensiones ante cambios de temperatura, practicidad y fácil instalación (ya que no es necesario un gran número de trabajadores ni equipo sofisticado para su instalación).*
- ◆ Revisar las guías de consulta y técnicas de instalación para aplicar los FRP a puentes y estructuras de acero, una de ellas esta propuestas por Schnerch et al. (2007).
- ◆ Uso de materiales FRP con fibras pretensadas.
- ◆ Realizar análisis costo-beneficio de los diferentes sistemas de refuerzo.
- ◆ Buscar mejores formas de adherir los FRP a los elementos de concreto.
- ◆ Estudiar el comportamiento y la durabilidad de los FRP con el tiempo y en diversos climas.
- ◆ Aplicar los avances tecnológicos en sistemas de control activos e híbridos para suprimir los defectos que estos tienen. Como lo son: el uso de fuentes externas y una mejor red de sensores.





## DEMANDA SÍSMICA ESPERADA Y SELECCIÓN DE ACELEROGRAMAS

### II.1. Introducción

**E**l sismo (del griego  $\sigma\epsilon\iota\sigma\mu\acute{o}\varsigma$ : temblor o temblor de tierra) es un evento natural donde ocurre una reorganización brusca de los materiales que componen la corteza terrestre al superar el estado de equilibrio mecánico por la liberación de energía producida por el movimiento de las placas tectónicas. Sin embargo, esta no es la única forma en la que se pueden generar los sismos. Otras fuentes que generan sismos están relacionadas con la actividad volcánica, por ejemplo del ascenso de magma hacia la superficie de la Tierra, y la detonación de explosivos químicos o dispositivos nucleares (Kramer, 1996).

Debido a que los eventos sísmicos de gran intensidad producen daños en las estructuras y con ello se han presentado un sinnúmero de pérdidas humanas, este tema siempre ha sido de interés, por lo que investigadores especialistas en el área han dedicado gran parte de sus vidas en tratar de entender y predecir su ocurrencia, comportamiento y efectos durante varios miles de años. Es así, que podemos encontrar registros antiguos que datan desde hace 3000 años en China, 1600 años en Japón, mientras que en los Estados Unidos se tienen registros desde hace 350 años (Kramer, 1996). Sin embargo, si comparamos los registros de los sismos que se han obtenido durante un periodo de tres mil años con la cantidad de sismos que se han suscitado en la Tierra durante un periodo que comprenda millones de años, y aunado a esto que los registros sísmicos con los que se trabajan en las investigaciones científicas son una fracción mínima de los recabados hace tres mil años podemos ver que los registros sismográficos con los que se cuenta hoy en día son un porcentaje muy pequeño para tratar de responder a los cuestionamiento de cómo y cuándo sucederá un evento sísmico.







A cada instante están ocurriendo miles de sismos en el planeta, algunos de ellos son imperceptibles para nosotros los seres humanos mientras que otros se pueden observar por los desastres que generan (Figura II-1). Estos desastres dependen principalmente de la magnitud y la localización del sismo, así como de las características del sitio (Kramer, 1996); además, los sismos son la causa por la que se originan otros fenómenos naturales tales como maremotos, licuefacción del suelo, incendios, rupturas de suelo, deslizamientos y corrimientos de tierra (deslaves).

A pesar de los avances científicos y tecnológicos que se han desarrollado hasta nuestros días (Kramer, 1996), aún el comportamiento de los sismos sigue siendo un rompecabezas para todas las personas que se dedican a tratar de entender y predecir su comportamiento. Esto se debe principalmente a dos razones, a que no se puede predecir con certeza el lugar exacto donde va a ocurrir el próximo sismo, y a que se desconoce con precisión la magnitud que tendrá. Como respuesta a esto y para tener una idea de donde se puede esperar la ocurrencia de un evento sísmico, se hace uso de la estadística de los datos sismográficos con que se cuenta para conocer al menos las zonas con mayor susceptibilidad de ocurrir tales eventos.

Con base en las ideas antes expresadas, se observa la necesidad de conocer la demanda sísmica esperada con un grado de aproximación aceptable porque de ella va a depender la estabilidad y buen comportamiento de la infraestructura existente y de la que se piense construir. Y si hablamos de obras importantes como hospitales, presas, escuelas, plantas nucleares y en nuestro caso particular de puentes, hace que el interés en conocer la demanda sísmica aumente exponencialmente porque de no considerarlo, se pueden presentar fallas o el colapso total de las estructuras, lo cual representa un costo monetario elevado y la invaluable pérdida de vidas humanas. Siendo esto en nuestra normativa actual inaceptable.



Figura II-1 Vista aérea de Puerto Príncipe. Tras el sismo de Haití en 2010, la ciudad quedó destruida.  
[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Downtown\\_Port\\_auprince\\_after\\_earthquake.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Downtown_Port_auprince_after_earthquake.jpg)





El tema fundamental de este trabajo de tesis es acerca del refuerzo de columnas de concreto reforzado en puentes localizados en zonas sísmicas, razón por la que es necesario estimar previamente la demanda sísmica a la que se pueden ver sometidas las estructuras de interés. En este capítulo se presenta una descripción de los acelerogramas seleccionados para estudiar el comportamiento dinámico del refuerzo de pilas de CR con los que se va a desarrollar el trabajo de los siguientes capítulos. Los registros sísmicos seleccionados se obtuvieron de la *Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF)*, la cual es emitida por la *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica A.C.* Los registros se seleccionaron con base a ciertos requisitos, entre los que se tienen la zona sísmica, la cual corresponde a la Costa del Pacífico, la distancia epicentral y la magnitud (mayores detalles de selección se pueden ver en la sección correspondiente a la selección de registros). Sin embargo, antes de llegar a ese punto, se considera pertinente recordar algunos conceptos básicos acerca de la formación de los sismos, con el afán de tener una mejor comprensión de los resultados que se analizarán y discutirán al final del capítulo.

## II.2. Sismo

Como se mencionó en la sección previa un sismo es un evento natural donde ocurre una reorganización brusca de los materiales que componen la corteza terrestre al superar el estado de equilibrio mecánico por la liberación de energía producida por el movimiento de las placas tectónicas. La fuerza y duración, que va desde algunos segundos hasta algunos minutos, dependen del tamaño y localización del sismo, así como de las características del sitio (Kramer, 1996). En las secciones siguientes se da una idea acerca de cómo está compuesta la Tierra y del porque se originan y transmiten las ondas a través ésta.

## II.3. Composición De La Tierra

La Tierra se formó aproximadamente hace 4530 millones de años y tiene una forma parecida a un esferoide oblato, siendo el diámetro del ecuador mayor que el diámetro que se tiene de un polo a otro. Es un planeta rocoso y muy denso a diferencia de otros planetas que están compuestos por gases, tal es el caso del planeta Júpiter.





La Tierra tiene una masa aproximada de  $5.98 \times 10^{24}$  kg. Su composición química está constituida por hierro, oxígeno, silicio, magnesio, azufre, níquel, calcio, aluminio y de otros elementos en un menor porcentaje.

La estructura interna de la Tierra se clasifica principalmente por dos criterios. El primero de ellos corresponde a su composición química, el cual divide a la Tierra en corteza (continental y oceánica), manto y núcleo externo e interno. Mientras que la segunda clasificación es de acuerdo a su composición física, la cual se clasifica en litosfera (de lo que están compuestas las placas tectónicas), astenosfera, mesosfera y el núcleo externo e interno. La clasificación de la Tierra en estas capas se ha hecho con base en el tiempo que tardan en viajar las ondas sísmicas reflejadas y refractadas, generadas por la ocurrencia de sismos.

En la Figura II-2 se muestra la composición de la Tierra. En esta imagen se puede observar la composición de cada una de las capas y sus respectivas profundidades.

### II.4. Placas Tectónicas

Las placas tectónicas son fragmentos de litosfera que se mueven como cuerpos rígidos sin que ocurra una deformación interna sobre la astenósfera de la Tierra.

La teoría de Tectónica de Placas fue propuesta por Wegener a principios del siglo XX y establecida formalmente a finales de la década de los 60's con la ayuda de numerosas investigaciones hechas por geólogos y

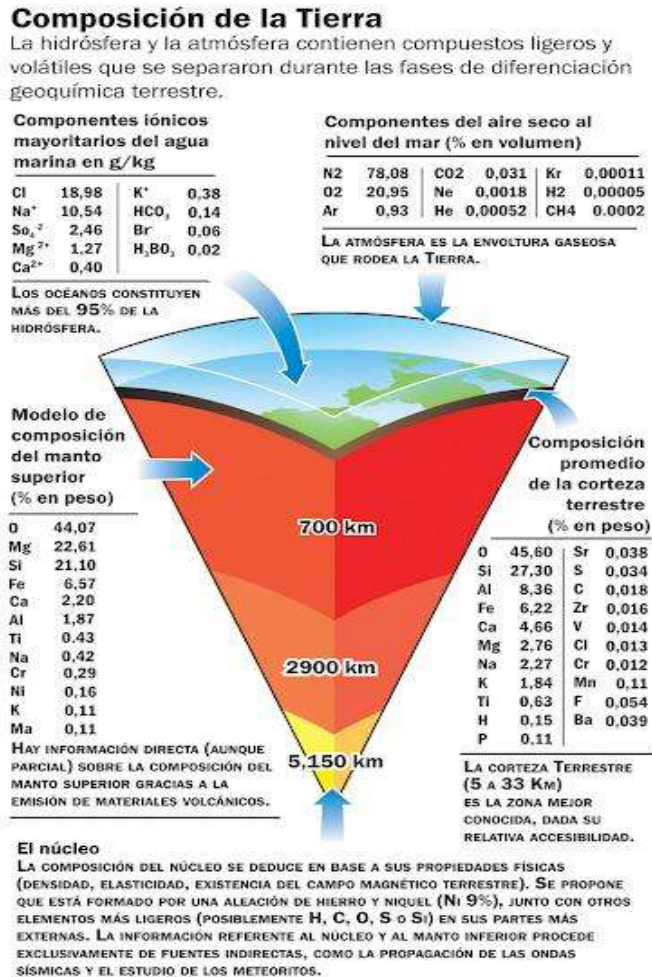


Figura II-2 Composición de la Tierra.  
<http://carlosmendozailustra.blogspot.mx/>



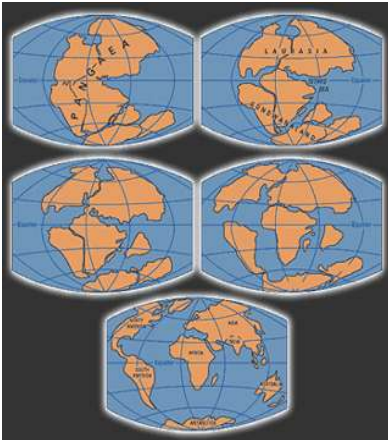


Figura II-3 Movimiento de las placas tectónicas comenzando con la Pangea propuesta por Wegener hasta la posición actual de las mismas [http://jesuscarro.wordpress.com/pag e/3/](http://jesuscarro.wordpress.com/pag/e/3/)

geofísicos. Tuvo como base la observación que en 1960 hizo el inglés Sir Francis Bacon, en la cual él se percató de las coincidencias que se habían encontrado entre continentes que algún día se pensaba que estuvieron unidos. Un ejemplo de esto se presenta entre la costa oriental de Sudamérica y la costa occidental de África.

Wegener creía que los continentes que conocemos hoy en día estuvieron unidos en el pasado formando un solo continente al que denominó Pangea, el cual se fue separando por el movimiento de las placas tectónicas hasta quedar dividido en varios continentes con la posición que conocemos actualmente, tal proceso se puede ver en la Figura II-3.

La teoría de Tectónica de Placas postula que la litosfera está fragmentada en piezas rígidas conocidas como placas, las cuales están en continuo movimiento, es decir, es un ciclo dinámico que tiene una velocidad aproximada de 2 a 12 cm/año. El desplazamiento de las placas se desarrolla en la astenosfera, la cual está constituida por un estrato de roca líquida del manto. El movimiento de las placas tectónicas se fundamenta primordialmente en la teoría de donde se menciona que este movimiento depende del equilibrio térmico de los materiales de la Tierra (Kramer, 1996). Las placas convergen o divergen a lo largo de áreas de gran actividad sísmica, las cuales están plenamente identificadas y muy bien definidas sus delimitaciones.

Como conclusión podemos decir que la teoría de Tectónica de Placas ha venido a revolucionar la comprensión de la dinámica de la Tierra.





#### II.4.1. Tipos De Placas Tectónicas

Las placas tectónicas están divididas en dos tipos fundamentalmente, de acuerdo a la clasificación en función del tipo de corteza que forma la superficie. Como se mencionó antes, la corteza se clasifica en oceánica y continental, de tal forma que los tipos de placas tectónicas son:

- ◆ **Placas Oceánicas:** Como su nombre lo indica las placas oceánicas están compuestas solamente por corteza oceánica. Es por esto, que este tipo de placa es delgada y su composición está formada principalmente por hierro y magnesio. Ejemplos de este tipo de placas las tenemos en el Pacífico, las cuales se conocen con los nombres de placa del Pacífico, placa de Nazca, placa de Cocos y la placa de Filipinas.
- ◆ **Placas Mixtas:** Este tipo de placa está formada principalmente por corteza continental y en un menor porcentaje por corteza oceánica. Como ejemplos se tienen a las placas Sudamericana y la Euroasiática.

#### II.4.2. Clasificación De Placas Tectónicas

Las placas tectónicas se dividen en primarias, secundarias, otras placas, microplacas y placas antiguas. A continuación mencionaremos por su importancia solamente las placas primarias y secundarias, las cuales podemos observar en la Figura II-4.

- ◆ **Placas tectónicas primarias:** Placa Sudamericana, Placa Norteamericana, Placa Euroasiática, Placa Indoaustraliana, Placa Africana, Placa Antártica y Placa Pacífica.
- ◆ **Placas Tectónicas Secundarias:** Placa de Cocos, Placa de Nazca, Placa Filipina, Placa Arábica, Placa Escocesa, Placa Juan de Fuca y Placa del Caribe.



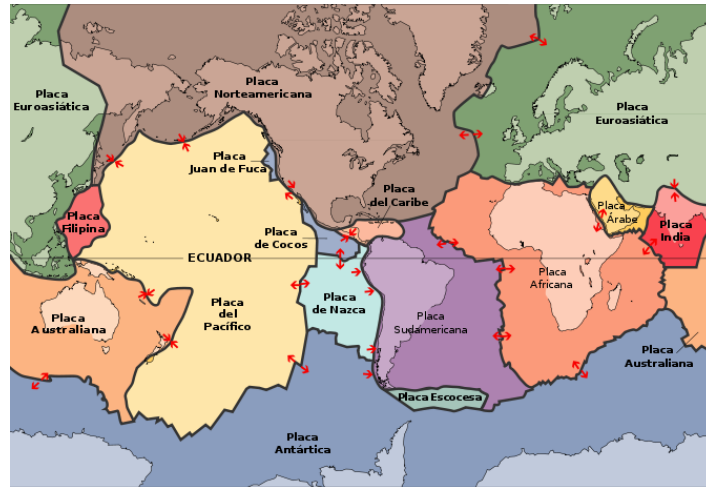


Figura II-4 Principales Placas Tectónicas.

[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Placas\\_tectonicas\\_es.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Placas_tectonicas_es.svg)

## II.5. Fallas Geológicas

Cuando las placas tectónicas se mueven y chocan entre sí, se generan los sismos. La zona donde ocurre este fenómeno se conoce con el nombre de falla. La Figura II-5 muestra la falla de San Andrés que es un ejemplo muy mencionado en nuestro país. Las fallas se forman como resultado de que las fuerzas tectónicas superaron la resistencia de las rocas, por lo que esas zonas son más susceptibles de presentar fenómenos telúricos.

### II.5.1. Elementos De Una Falla

Las partes que integran una falla se conocen como:

- **Plano de falla:** Plano o superficie a lo largo de la cual se desplazan los bloques que se separan en la falla. Este movimiento puede ser horizontal, vertical u oblicuo. Con frecuencia el plano de



Figura II-5 Falla de San Andrés que atraviesa el estado de California en los Estados Unidos y el estado de Baja California en México.

<http://bibliotecadeinvestigaciones.wordpress.com/ciencias-de-la-tierra/terremotos-tsunamis-y-fallas-geologicas/>





falla presenta estrías, que se originan por el rozamiento de los dos bloques.

- **Labios de Falla:** Los labios de falla son los dos bordes o bloques que se han desplazado. Cuando se produce un desplazamiento vertical, los bordes reciben los nombres de *labio hundido o interior* y *labio elevado o superior*, dependiendo de la ubicación de cada uno de ellos con respecto a la horizontal relativa.
- **Salto de falla:** Es el espacio o distancia vertical existente entre dos estratos que originalmente formaban una unidad, medida entre los bordes del bloque elevado y el hundido. Esta distancia puede ser de tan sólo unos pocos milímetros (cuando se produce la ruptura), hasta varios kilómetros; éste último caso suele ser resultado de un largo proceso geológico en el tiempo.

## II.5.2. Características De Una Falla Geológica

Para poder describir una falla se hace el uso de las siguientes características que se presentan en forma esquemática en la Figura II-6:

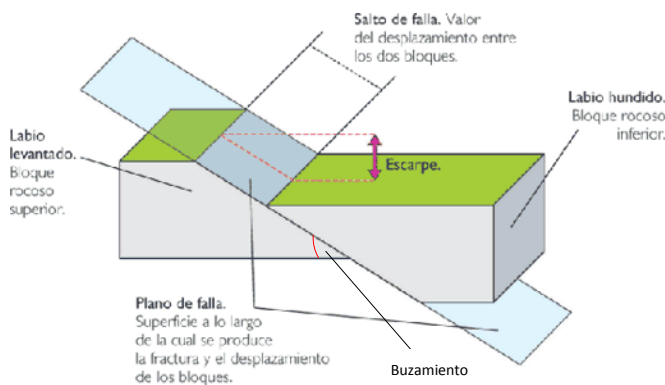


Figura II-6 Características de una falla. Modificada de [http://ec.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?anchor=klpcnatun&tipo=imprimir&titulo=Imprimir%20Art%EDculo&xref=20070417klpcnatun\\_194.Kes](http://ec.kalipedia.com/popup/popupWindow.html?anchor=klpcnatun&tipo=imprimir&titulo=Imprimir%20Art%EDculo&xref=20070417klpcnatun_194.Kes)

superficies de los dos labios, tomada en vertical.

- **Espejo de falla:** es la superficie plana aunque con declive, que se produce a lo largo del escarpe de falla

➤ **Dirección:** Ángulo que forma una línea horizontal contenida en el plano de falla con el eje norte-sur.

➤ **Buzamiento:** Ángulo que forma el plano de falla con la horizontal.

➤ **Salto de falla:** Distancia entre un punto dado de uno de los bloques y el correspondiente en el otro, tomada a lo largo del plano de falla.

➤ **Escarpe:** Distancia entre las





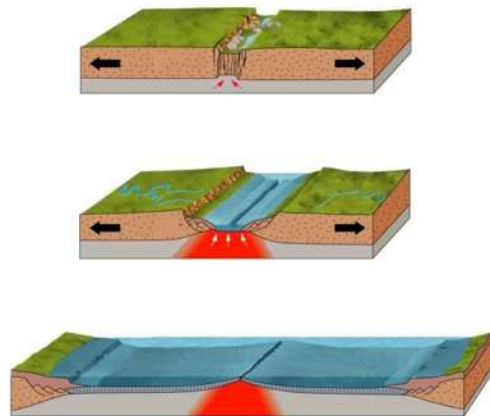
- **Facetas triangulares:** son espejos de fallas que muestran el corte producido en una fila montañosa cuando la falla se presenta en forma perpendicular a la dirección de dicha fila montañosa. Tanto la parte hundida como el propio espejo de falla tienen aspecto triangular, de aquí su nombre.

### II.5.3. Clasificación De Las Fallas Geológicas

En primera instancia se puede clasificar a las fallas en activas e inactivas. Las fallas activas son aquellas que han presentado movimiento en los últimos 1.8 millones de años, mientras que las fallas inactivas son aquellas que se formaron en eras geológicas pasadas y que se conservan hoy en día en forma de fósiles; además, este último tipo de falla no representa un peligro para los habitantes que se encuentran cerca de ellas.

Las fallas se pueden clasificar en función de los esfuerzos que los originan y del movimiento relativo de los bloques como se describe a continuación:

- **Fallas Divergentes:** En este tipo de falla las placas se van separando entre 2 a 18 cm/año dando origen a un rifting o valle en rift. Se considera que es un tipo de falla de formación. Debido al tipo de movimiento que presenta este tipo de falla se produce una expulsión de material magmático proveniente de capas inferiores de la corteza terrestre dando lugar a grandes cadenas montañosas. La lava expulsada al momento de enfriarse se magnetiza. La polaridad que adopta depende de la dirección del campo magnético de la Tierra en el momento del



**Figura II-7 Falla Divergente.** La separación de las placas da origen a un valle en rift ubicado inicialmente en el interior de los continentes y que se va transformando en una cuenca oceánica alargada y estrecha. Si el proceso persiste durante un gran periodo de tiempo se pueden llegar a formar océanos.  
<http://platea.pntic.mec.es/~jpascual/geotierra/geotierra2.htm>







enfriamiento. Gracias a este fenómeno es que se ha podido verificar y aceptar la teoría de las placas tectónicas (Kramer, 1996).

➤ **Fallas Convergentes o de Subducción:** Este tipo de falla se produce por el choque de dos placas formando una zona de subducción o un cinturón orogénico. Se considera que este tipo de falla es de destrucción. El choque o deslizamiento no es un fenómeno que suceda en forma continua, sino que este se presenta hasta que las tensiones almacenadas en esta zona sobrepasan el equilibrio que tienen las dos placas. Cuando esto sucede se libera una gran cantidad de energía en forma de presión o movimiento generando sismos de diferentes magnitudes.

A su vez este tipo de falla da origen a las formaciones que se describen a continuación y que se pueden observar en la Figura II-8:

- ◆ *Formación de una fosa oceánica en el agua y grupo de montañas en tierra:* Sucede cuando choca una placa oceánica más densa que una placa continental.
- ◆ *Formación de extensas cordilleras dando lugar a un borde de subducción:* Sucede cuando chocan dos placas continentales. Ejemplo de esto son la cadena del Himalaya.
- ◆ *Formación de un arco de islas:* Sucede cuando dos placas oceánicas colisionan. Ejemplo de esto son las islas de Japón.

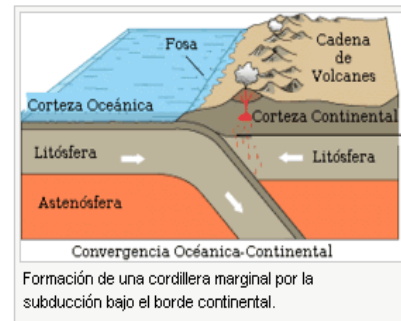
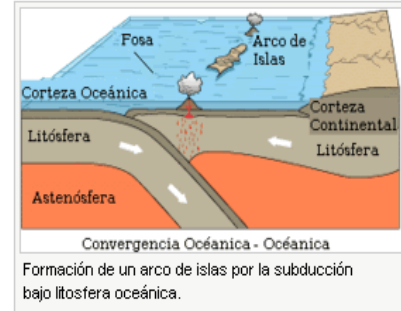


Figura II-8 Fenómenos que se producen en una falla de Convergencia.

[http://www.iesabdera.com/bg/bgb1/web-5/32\\_lmites\\_convergentes\\_o\\_destructivos\\_subduccion\\_y\\_colisin.html](http://www.iesabdera.com/bg/bgb1/web-5/32_lmites_convergentes_o_destructivos_subduccion_y_colisin.html)





➤ **Falla de Transformación:**

Este tipo de falla ocurre con el desplazamiento lateral de las placas, como se muestra en la Figura II-9. Se considera que este tipo de falla no es destructivo ni constructivo; sin embargo causa grandes

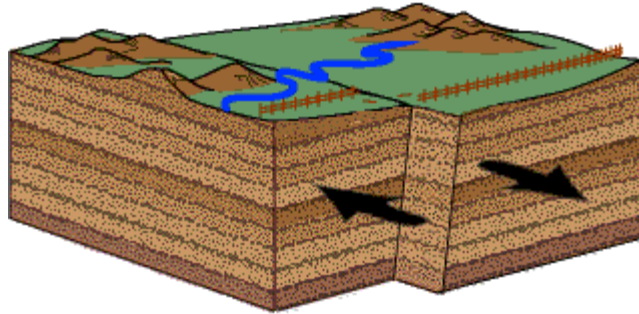


Figura II-9 Esquema de las Fallas de Transformación.  
<http://www.windows2universe.org/earth/geology/fault.html&lang=sp>

cambios en la superficie. Este tipo de fallas no tienen una gran profundidad pero presentan grandes extensiones en el sentido horizontal. Un ejemplo de este tipo de falla en nuestro país lo podemos encontrar en la falla de San Andrés (Figura II-5). La generación de los sismos se produce al igual que en las fallas convergentes por acumulación de energía y liberación de energía en forma de presión o movimiento. En este tipo de falla se produce una gran actividad sísmica.

## II.6. Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas son ondas elásticas que se generan durante la ocurrencia de un sismo o producidas por eventos artificiales generados por explosivos o camiones vibradores. Las ondas sísmicas que se generan se conocen como ondas de cuerpo y de superficie.

### II.6.1. Ondas De Cuerpo

Como su nombre lo indica este tipo de onda viaja en el interior de la Tierra y la trayectoria que sigue es del tipo curvo, y son función de la variada densidad y composición interna de la Tierra. Este fenómeno es similar al de la refracción de la luz. Las ondas de cuerpo se dividen en ondas primarias (P) y ondas secundarias (S). Además, este tipo de onda no tiene un gran poder destructivo.





**II.6.1.1. Ondas Primarias (P)**

Las ondas P son ondas longitudinales o de compresión (Figura II-10), lo cual significa que el suelo es altamente comprimido y dilatado en la dirección de propagación. Estas ondas viajan a una velocidad de 1.73 veces que las ondas S, y pueden viajar a través de cualquier tipo de material, ya sea líquido o sólido.

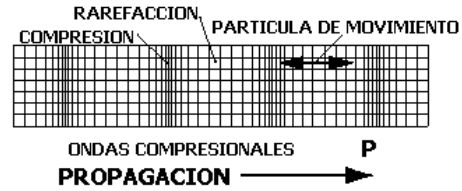


Figura II-10 Esquema de las ondas Primarias (P). [http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Ondas/Ondas.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html)

**II.6.1.2. Ondas Secundarias (S)**



Figura II-11 Esquema de las ondas Secundarias (S). [http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing\\_ond\\_1/trabajos\\_06\\_07/io3/public\\_html/Ondas/Ondas.html](http://www.lpi.tel.uva.es/~nacho/docencia/ing_ond_1/trabajos_06_07/io3/public_html/Ondas/Ondas.html)

Las ondas S son ondas transversales o de corte, lo cual significa que el suelo es desplazado perpendicularmente a la dirección de propagación, alternadamente hacia un lado y hacia el otro. Estas ondas se transmiten solamente a través de sólidos debido a que los líquidos no resisten fuerzas cortantes.

La velocidad de este tipo de onda es un poco mayor que la mitad de la velocidad a la que se transmiten las ondas P, como se mencionó en el párrafo anterior. Por tal motivo las ondas S llegan un poco después que las ondas P. Esta velocidad es constante para cualquier material sólido. Además, las ondas S suelen tener una amplitud mayor que las ondas P por lo que su efecto se siente con más fuerza, y son las que producen las oscilaciones durante el movimiento sísmico y las que generan la mayor parte de los daños.

**II.6.2. Ondas De Superficie**

Las ondas de superficie se producen cuando las ondas de cuerpo llegan a la superficie terrestre, y se propagan por la superficie de discontinuidad de la interfase de la superficie terrestre (tierra – aire y tierra - agua). Debido a que tienen una baja frecuencia provocan resonancia en edificios con mayor facilidad que las ondas de





cuerpo, lo que causa grandes daños en las construcciones. La velocidad a la que se transmiten estas ondas es menor que las ondas P y S. Las ondas superficiales se clasifican en ondas Love y ondas Rayleigh.

### II.6.2.1. Ondas Love

Las ondas Love (Figura II-12) producen un movimiento horizontal de corte en superficie. Su denominación se debe al matemático neozelandés A.E.H. Love quien en 1911 desarrollo un modelo matemático de estas ondas. Las ondas Love se propagan con movimiento de las partículas perpendicular a la dirección de propagación, de manera similar a como se propagan las ondas S, solo que polarizadas en el plano de la superficie de la Tierra, es decir sólo poseen la componente horizontal a superficie. Su velocidad es ligeramente menor que las ondas S y un poco mayor que las ondas Rayleigh. Cabe mencionar que la amplitud de este tipo de onda decrece con la profundidad.

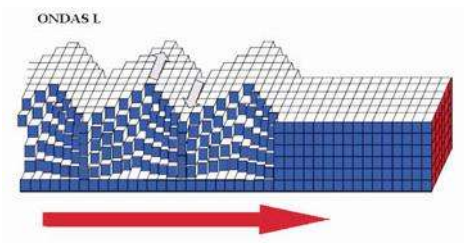


Figura II-12 Esquema de Ondas Love.  
[http://servidor-opsu.tach.ula.ve/alum/pd\\_5/sism\\_t/GLOSVII.html](http://servidor-opsu.tach.ula.ve/alum/pd_5/sism_t/GLOSVII.html)

### II.6.2.2. Ondas Rayleigh

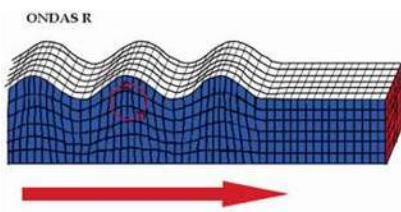


Figura II-13 Esquema de Ondas Rayleigh. [http://servidor-opsu.tach.ula.ve/alum/pd\\_5/sism\\_t/GLOSVII.html](http://servidor-opsu.tach.ula.ve/alum/pd_5/sism_t/GLOSVII.html)

Las ondas Rayleigh (Figura II-13) son ondas superficiales que producen un movimiento elíptico retrogrado del suelo. Su nombre es en honor a Lord Rayleigh, quien predijo su existencia en 1885. Presentan su máxima amplitud en la superficie libre y al igual que las ondas Love su amplitud decrece como función de la profundidad. La velocidad de este tipo de ondas es menor que las ondas de cuerpo.





## II.7. Localización De Un Sismo

Previo a explicar cómo se localiza un sismo es necesario conocer dos conceptos fundamentales conocidos con los nombres de hipocentro y epicentro.

El punto donde se origina el sismo dentro de la Tierra se le llama *foco sísmico o hipocentro*. Este se puede clasificar de acuerdo a la profundidad donde ocurre, como se indica en la Figura II-14:

- Superficial si ocurre a una profundidad menor de 70 km.
- Intermedio si ocurre entre los 70 – 300 km.
- Profundo si ocurre más allá de 300 km.

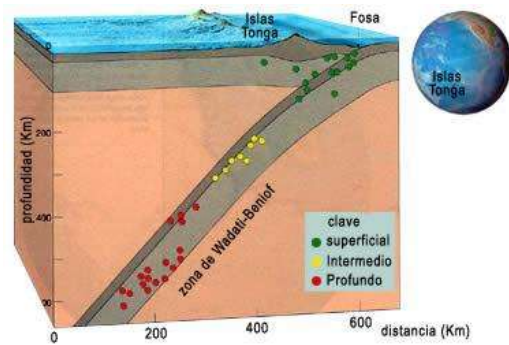


Figura II-14 Clasificación del hipocentro según su profundidad.

<http://www.educarchile.cl/autoaprendizaje/tierra/modulo2/clase2/texto/sismicidad.htm#2>

La proyección del hipocentro en la superficie terrestre se llama *Epicentro*, lugar donde repercuten con mayor intensidad las ondas sísmicas.

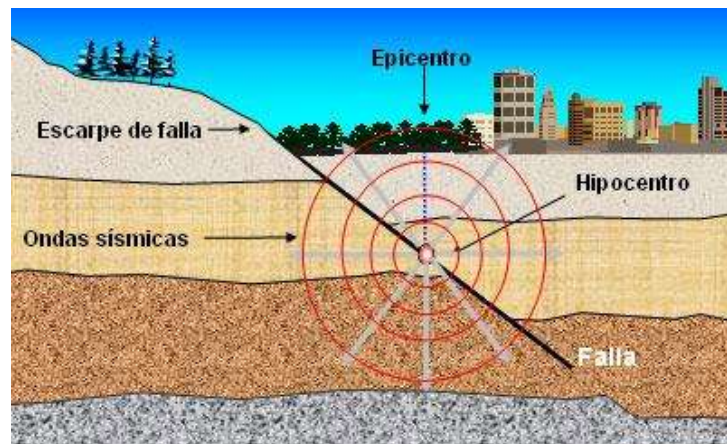


Figura II-15 Hipocentro y epicentro de un sismo.

<http://www.lis.ucr.ac.cr/index.php?id=16>





### II.7.1. Localización De Un Sismo

El método para localizar el epicentro de un sismo se basa en la propiedad que tienen las ondas sísmicas de viajar a velocidades diferentes en un mismo medio (las ondas P son más veloces que las ondas S), y de los registros que se obtienen de las redes sísmicas que están compuestas por estaciones acelerográficas. Para determinar la localización del epicentro de un terremoto se sigue el proceso siguiente:

- ◆ Se parte de la idea de que las ondas P llegan primero a las estaciones sismológicas y después las ondas S, lo cual está en función de la distancia entre la estación y el epicentro.
- ◆ Se identifican los distintos grupos de ondas de un sismo determinado y de fuente conocida en los diferentes sismogramas de numerosas estaciones.
- ◆ Se tabulan los recorridos hechos por las ondas P y S para posteriormente crear gráficos en función de tiempo y distancia.
- ◆ Finalmente se requieren los registros de las estaciones sísmicas para triangular la ubicación del epicentro. Para ello, primero se ubican las estaciones en un mapa y se trazan para cada una de ellas un círculo cuyo radio es la distancia calculada de la estación al epicentro, como se muestra en la Figura II-16. El punto donde se intercepten estos círculos será la ubicación del epicentro. La precisión de tales resultados estará en función directa del modelo seleccionado para determinarlo y del número de estaciones usadas para determinarlo, se recomienda un número mayor o por lo menos igual a tres estaciones.

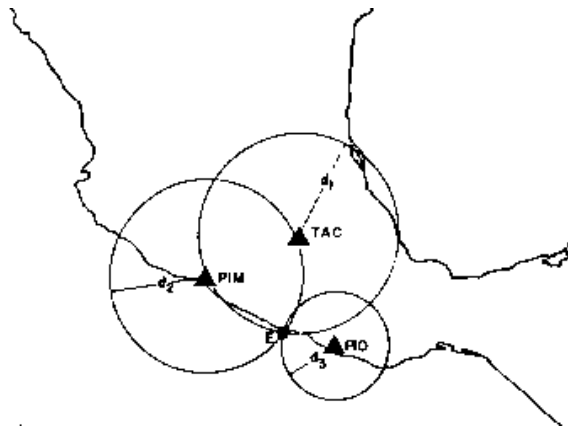


Figura II-16 Ejemplo de un sismo en las costas de Guerrero, localizado mediante registros de las estaciones: Tacubaya, D.F. (TAC); Presa Infernillo, Mich. (PIM); y Pinotepa Nacional, Oax. (PIO).  
<http://secre.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Sismo85/sismo85-2.htm>





## II.8. Escalas Sísmicas

Cuando ocurre un sismo, uno de los datos relacionados a éste que es de interés tanto para el investigador como para el público en general, además del lugar donde ocurrió, es sin duda el tamaño que tuvo. Esto debido a que esta información nos dice directamente la fuerza que el sismo generó e indirectamente el posible daño que tuvieron las construcciones en las inmediaciones donde se generó éste (epicentro).

El inicio de la medición de un sismo se hizo en primera instancia considerando los efectos que éste causaba directamente en el entorno; es decir, la escala que se usaba tenía como criterio una cruda descripción cualitativa del efecto de los sismos en las personas, animales y la infraestructura del entorno de interés. Sin embargo, en la actualidad se cuenta con modernos sismógrafos que proporcionan de una manera cuantitativa y no cualitativa el tamaño que tuvo un sismo. Con base en los conceptos antes descritos se tienen principalmente dos escalas para medir los efectos de un sismo conocidas como intensidad, medida cualitativa, y la magnitud, medida cuantitativa. Estas escalas se explican en las siguientes secciones.

### II.8.1. Escalas de Intensidad

Las escalas de intensidad son aquellas que describen cualitativamente el efecto de los sismos y fueron empleadas desde antes del desarrollo de sismógrafos. Estas miden los daños que propició el sismo en la región, es decir en las estructuras (edificios, presas, puentes, hospitales, viviendas, etc.), y la percepción que tuvo la población en el lugar por donde se sintió el sismo. Por lo tanto, estos tipos de escalas son imprecisas ya que es una medición local del daño que está en función de la distancia relativa que se tiene entre el poblado y el observador respecto al epicentro del sismo, así como de la energía liberada, condiciones geológicas y del tipo y calidad de las construcciones. Por lo que habrá una intensidad diferente para cada poblado donde se sintió el mismo evento sísmico. Es por esta razón que es una escala es subjetiva.

Las escalas de intensidad son expresadas en números romanos. Cada grado de las escalas de intensidad representa los movimientos sentidos y los daños que se observan tras la ocurrencia de un sismo. Los grados en la





escala de intensidad van desde el escenario donde no sucede nada hasta el daño total. Las escalas de intensidad que se tienen actualmente son: *Escala de Rossi – Forel*, primera escala de este tipo y desarrollada en la década de 1980, *Escala de Mercalli Modificada (MMI)*, *Escala Medvedev – Sponheuer – Karnik*, conocida como escala MSK o MSK-64, y la *Escala Japonesa*.

Como se observa en el párrafo anterior hay varias escalas de intensidad y cada país generalmente utiliza una diferente. En México la escala de intensidad que se usa es la de Mercalli Modificada (MMI), la cual, se puede ver en la Tabla II-I.

Tabla II-I Escala de Mercalli Modificada (MMI).  
<http://cuandolatierrasemueve.blogspot.mx/2009/11/terremotos.html>

Grado	Descripción
I. Muy débil	No se advierte sino por unas pocas personas y en condiciones de perceptibilidad especialmente favorables.
II. Débil	Se percibe sólo por algunas personas en reposo, particularmente aquellas que se encuentran ubicadas en los pisos superiores de los edificios.
III. Leve	Se percibe en los interiores de los edificios y casas.
IV. Moderado	Los objetos colgantes oscilan visiblemente. La sensación percibida es semejante a la que produciría el paso de un vehículo pesado. Los automóviles detenidos se mecen.
V. Fuerte	La mayoría de las personas lo percibe aun en el exterior. Los líquidos oscilan dentro de sus recipientes y pueden llegar a derramarse. Los péndulos de los relojes alteran su ritmo o se detienen. Es posible estimar la dirección principal del movimiento.
VI. Bastante Fuerte	Lo perciben todas las personas. Se siente inseguridad para caminar. Se quiebran los vidrios de las ventanas, la vajilla y los objetos frágiles. Los muebles se desplazan o se vuelcan. Se hace visible el movimiento de los árboles, o bien, se le oye crujir.
VII. Muy Fuerte	Los objetos colgantes se estremecen. Se experimenta dificultad para mantenerse en pie. Se producen daños de consideración es estructuras de albañilería mal construidas o mal proyectadas. Se dañan los muebles. Caen trozos de mampostería, ladrillos, parapetos, cornisas y diversos elementos arquitectónicos. Se producen ondas en los lagos.
VIII. Destructivo	Se hace difícil e inseguro el manejo de vehículos. Se producen daños de consideración y aun el derrumbe parcial en estructuras de albañilería bien construidas. Se quiebran las ramas de los árboles. Se producen cambios en las corrientes de agua y en la temperatura de vertientes y pozos.
IX. Ruinoso	Pánico generalizado. Todos los edificios sufren grandes daños. Las casas sin cimentación se desplazan. Se quiebran algunas canalizaciones subterráneas, la tierra se fisura.
X. Desastroso	Se destruye gran parte de las estructuras de albañilería de toda especie. El agua de canales, ríos y lagos sale proyectada a las riberas.
XI. Muy Desastroso	Muy pocas estructuras de albañilería quedan en pie. Los rieles de las vías férreas quedan fuertemente deformados. Las cañerías subterráneas quedan totalmente fuera de servicio.
XII. Catastrófico	El daño es casi total. Se desplazan grandes masas de roca. Los objetos saltan al aire. Los niveles y perspectivas quedan distorsionadas.







## II.8.2. Escalas de Magnitud

Son escalas cuantitativas y representan como lo indica su nombre la magnitud de la energía liberada, dicha magnitud se obtiene a través de mediciones instrumentales en las instalaciones sismológicas. La magnitud a diferencia de la intensidad es un parámetro que no depende de la observación de los habitantes de la zona o los daños en las estructuras, sino simplemente de la energía que se libera durante el sismo, es por esto que un evento sísmico tiene sólo una magnitud.

Las escalas de magnitud con las que se cuenta actualmente son: *Escala de Magnitud de Onda Superficial* ( $M_s$ ), *Escala de Magnitud de las Ondas de Cuerpo* ( $M_b$ ), *Escala Sismológica de Richter*, conocida como *Escala de Magnitud Local* ( $M_L$ ), y la *Escala Sismológica de Magnitud de Momento* ( $M_w$ ). De las escalas de magnitud nombradas anteriormente la más usada es la escala de Richter. Sin embargo, actualmente se comienza a usar con mayor frecuencia la Escala Sismológica De Magnitud De Momento, esto es porque la escala coincide y continua con los parámetros de la escala de Richter.

En México la escala de magnitud que más se utiliza es la Escala de Richter. Esta escala representa la energía liberada en un sismo y se basa en registros sismográficos. Es una escala que crece en forma exponencial o semilogarítmica. De esta manera, un sismo de magnitud 4 no es el doble de un sismo de magnitud 2, sino que el sismo de magnitud 4 equivale a 100 veces el sismo de magnitud 2. La escala de Richter se puede ver en la Tabla II-II.

Tabla II-II Escala de Richter.  
<http://cuandolatierrasemueve.blogspot.mx/2009/11/terremotos.html>

Magnitud en Escala Richter	Efectos del terremoto
Menos de 3.5	Generalmente no se siente, pero es registrado.
3.5 - 5.4	A menudo se siente, pero sólo causa daños menores.
5.5 - 6.0	Ocasiona Daños ligeros a edificios.
6.1 - 6.9	Puede ocasionar daños severos en áreas muy pobladas.
7.0 - 7.9	Terremoto mayor. Causa graves daños.
8 o mayor	Gran terremoto. Destrucción total a comunidades cercanas.





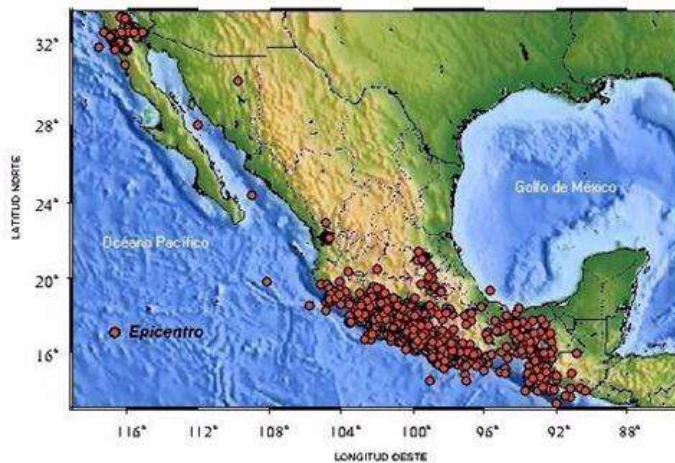
Las escalas para medir los sismos que más se utilizan a nivel mundial, particularmente en México, son la escala de Mercalli para intensidad y la escala de Richter para magnitud. En la Tabla II-III se muestra la comparativa de ambas escalas.

**Tabla II-III Comparativa entre las escalas de Mercalli y la de Richter.**  
<http://cuandolatierrasemueve.blogspot.mx/2009/11/terremotos.html>

Escala de Mercalli	Escala de Richter
<b>I.</b> Casi nadie lo ha sentido.	<b>2,5</b> En general no sentido, pero registrado en los sismógrafos.
<b>II.</b> Muy pocas personas lo han sentido.	<b>3,5</b> Sentido por mucha gente.
<b>III.</b> Temblor notado por mucha gente que, sin embargo, no suele darse cuenta de que es un terremoto.	
<b>IV.</b> Se ha sentido en el interior de los edificios por mucha gente. Parece un camión que ha golpeado el edificio.	
<b>V.</b> Sentido por casi todos; mucha gente se despierta. Pueden verse árboles y postes oscilando.	
<b>VI.</b> Sentido por todos; mucha gente corre fuera de los edificios. Los muebles se mueven, pueden producirse pequeños daños.	<b>4,5</b> Pueden producirse algunos daños locales pequeños.
<b>VII.</b> Todo el mundo corre fuera de los edificios. Las estructuras mal construidas quedan muy dañadas; pequeños daños en el resto.	
<b>VIII.</b> Las construcciones especialmente diseñadas dañadas ligeramente, las otras se derrumban.	<b>6,0</b> Terremoto destructivo.
<b>IX.</b> Todos los edificios muy dañados, desplazamientos de muchos cimientos. Grietas apreciables en el suelo.	
<b>X.</b> Muchas construcciones destruidas. Suelo muy agrietado.	<b>7,0</b> Terremoto importante.
<b>XI.</b> Derrumbe de casi todas las construcciones. Puentes destruidos. Grietas muy amplias en el suelo.	<b>8,0</b> Grandes terremotos.
<b>XII.</b> Destrucción total. Se ven ondulaciones sobre la superficie del suelo, los objetos se mueven y voltean.	<b>o más</b>

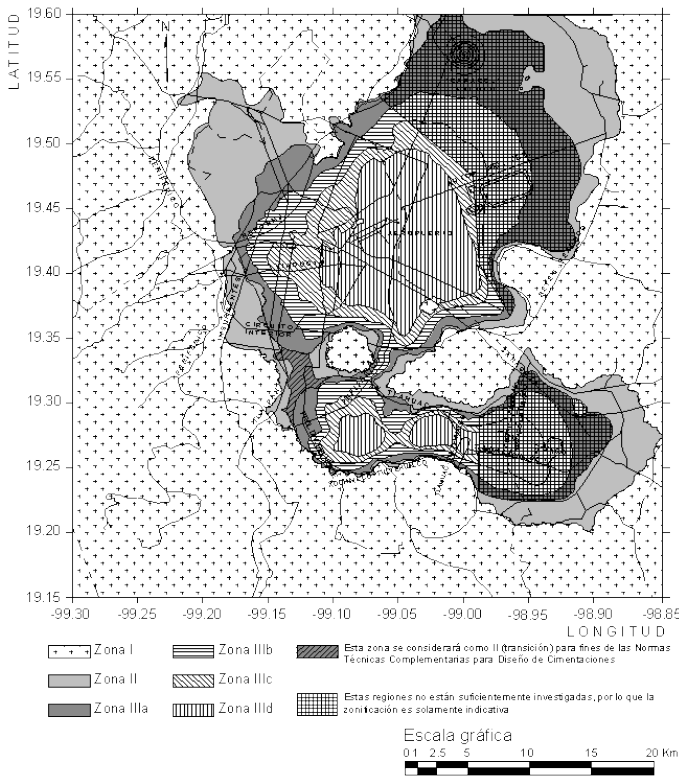
## II.9. Sismicidad En México

México es un país con alta sismicidad, ya que está rodeado por cuatro placas tectónicas: placa Norteamericana, placa del Pacífico, placa de Cocos y la placa del Caribe (Figura II-4). La principal zona del país donde se presentan eventos sísmicos se conoce como el Cinturón



**Figura II-17 Sismos que han producido acelerogramas hasta 1999.**  
 Tomada de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes





**Figura II-18 Zonificación del DF para fines de diseño por sismo.**  
<http://cgsestados.df.gob.mx/prontuario/vigente/739.htm>

Circumpacífico, y está constituido por la zona de subducción entre la placa de Cocos y la placa de Norteamérica en la costa del Pacífico de México (Figura II-17). Sin embargo, existen otras zonas sísmicas como son la de Baja California Norte donde se ubica la falla de San Andrés.

Los principales tipos de sismos que ocurren en la república mexicana son los generados por el proceso de subducción que se presentan en la frontera entre la placa Norteamericana y las placas de Cocos y Rivera; los sismos de fallamiento normal y de profundidad intermedia ocurren a una profundidad entre 30 y 100 km y son debidos

al rompimiento de la litósfera oceánica subducida; los sismos superficiales de la corteza continental son aquellos que como su nombre lo indica se producen dentro de la placa continental, y aunque son muy poco comunes pueden ser perjudiciales para asentamientos humanos cercanos, éstos llegan a tener magnitudes menores o iguales a 7 en la escala de Richter; los sismos del sistema de fallas Polochic–Motagua que ocurren en la frontera entre la placa del Caribe y la placa Norteamericana, aunque es una franja muy pequeña de aproximadamente 120 km se han presentado sismos con una magnitud de hasta 7.5 en la escala de Richter.

A través de estudios que se han realizado sobre el comportamiento de las ondas sísmicas y de los efectos locales (condiciones geológicas, topográficas y de rigidez del suelo) en el país se propusieron zonificaciones de riesgo así como microzonificaciones de lugares que presentan ciertas particularidades en los efectos locales del sitio, un ejemplo de microzonificación es la ciudad de México. Esta zonificación está dividida en cuatro zonas mientras que el terreno es dividido en tres tipos (Figura II-18).





Recientemente la CFE (*Comisión Federal de Electricidad*) publicó en el Manual de Diseño de Obras Civiles una nueva regionalización para considerar el peligro sísmico del país (Figura II-19). Esta zonificación considera por un lado la probabilidad de ocurrencia de un evento sísmico, y por el otro la forma aleatoria en que se propagan las ondas sísmicas, es decir, considera las condiciones de los efectos locales. Además, la CFE considera en este trabajo otros avances que se han alcanzado en las últimas décadas como un mejor conocimiento en la geometría de la placa de cocos (principalmente la zona de subducción que tiene con la placa norteamericana) y leyes de atenuación.

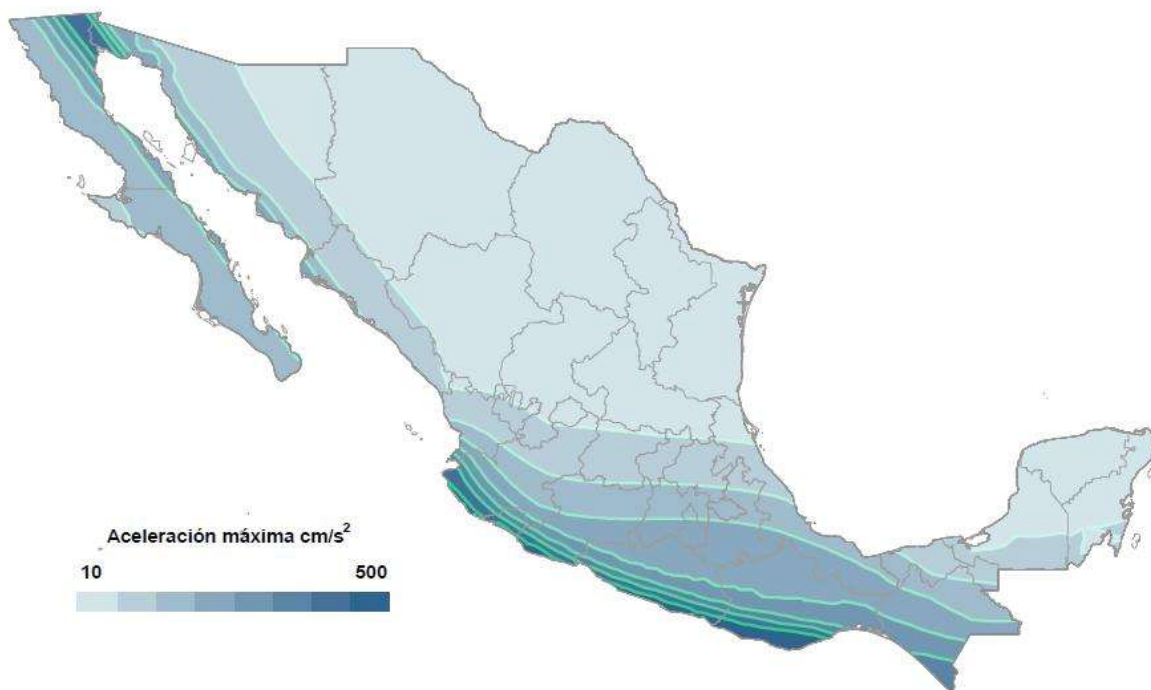


Figura II-19 Aceleraciones máximas del terreno (roca).  
Tomada del Manual del Manual de Diseño de Obras Civiles la CFE.





## II.10. Selección De Registros Sísmicos

Los registros sísmicos o acelerogramas son la representación gráfica de la aceleración del suelo contra el tiempo durante la ocurrencia de un evento sísmico. En esta investigación los registros sísmicos que se utilizaron fueron obtenidos de la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF).

### II.10.1. Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF)

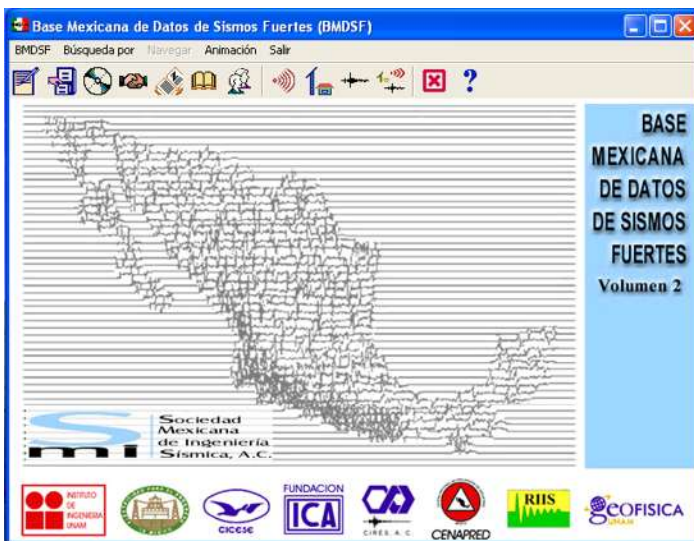


Figura II-20 Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes.

La BMDSF fue concebida en 1992 como un acuerdo entre diferentes instituciones que operaban redes de acelerógrafos, algunas de estas instituciones se muestran en la Figura II-20. Esto se hizo con el fin de compilar y organizar la información que cada una de las instituciones había registrado en sus acelerógrafos. Cabe resaltar que los primeros acelerógrafos fueron instalados en la Ciudad de México en el año de 1960, y desde entonces ha crecido el número debido

a la importancia de tener una mayor cantidad de estaciones que permita contar con un mayor número de registros sísmicos en el país.

La BMDSF contiene la información de 547 estaciones, 2062 temblores con una variación de la magnitud registrada que va desde 1.6 a 8.1 en la escala de Richter, y datos descriptivos de 13835 registros acelerográficos. Los acelerogramas que se obtienen de la BMDSF son archivos de texto con extensión ASCII estándar.





## II.10.2. Registros Sísmicos Seleccionados

Para la selección de los registros sismográficos se tomó como criterio la ubicación de éstos. Debido a ello los registros sismográficos corresponden a la costa del Pacífico. La ubicación de las estaciones sismográficas se puede ver en la Figura II-21. Mientras que en la Tabla II-IV se pueden ver las características de cada uno de los registros sismográficos que se obtuvieron de la BMDSF.



**Figura II-21 Localización de las estaciones sismográficas.**  
Tomada de Google Earth

Para inducir en los modelos analíticos los diferentes estados límite de daño los registros sismográficos fueron escalados a diferentes aceleraciones. La aceleración máxima esperada del terreno se obtuvo a partir de un estudio de peligro sísmico del sitio. En la Tabla II-V se muestran los promedios de las aceleraciones a las que se escalaron los espectros de respuesta por modelo. En la Figura II-22 se muestran los espectros de respuesta sin escalar de los acelerogramas obtenidos de la BMDSF.





Tabla II-IV Características de los registros obtenidos de la BMDSF

Estación	Clave de la Estación	Localización de la Estación	Coordenadas de la Estación		Coordenadas del Epicentro		Tipo de Suelo	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	Duración (s)	Distancia Epicentral R (m)
			Latitud	Longitud	Latitud	Longitud				
			Norte	Oeste	Norte	Oeste				
AEROPUERTO ZIHUATANEJO	AZIH	Aeropuerto Internacional de Zihuatanejo, ladera derecha	17.603	101.455	18.021	101.479	Roca	158.23	33.86	46.593
PAPANOA	PAPN	Escuela Primaria "Sor Juana Inés de la Cruz"	17.328	101.04	18.021	101.479	Roca	85.98	41.47	125.35
EL SUCHIL	SUCH	Taller mecánico en el Sùchil, Gro.	17.226	100.642	18.021	101.479	Roca	85.98	41.47	125.35
CALETA DE CAMPOS	CALE	Escuela secundaria técnica 68 de pesca, Caleta de Campos Escuela "CREPE"	18.07	102.755	18.024	103.057	Roca	97.17	25.2	32.4212
EL OCOTITO	OCTT	carretera Chilpancingo-Acapulco, Ocotito, Gro.	17.25	99.511	16.31	98.88	Roca	97.17	25.2	32.4212
LAS VIGAS	VIGA	Instalaciones SARH en las Vigas, Gro.	16.757	99.236	16.31	98.88	Roca	100.35	40.97	62.5949
MANZANILLO					19.25	104.19		387.1		
ZACATULA*	ZACA	Escuela primaria Zacatula, 10km de Lazaro Cárdenas, Mich.	18.009	102.178	18.024	103.057	Arcilla Compactada	220	36.3	93.0522
ZACATULA**	ZACA	Escuela primaria Zacatula, 10km de Lazaro Cárdenas, Mich.	18.009	102.178	18.024	103.057	Arcilla Compactada	262.23	146.38	81.2482
CAYUCA	CAYA	Escuela primaria "Ignacio Zaragoza" cerca de la estación CAYR (en roca) Cayuca, Gro.	17.045	100.266	18.021	101.479	Terreno Blando	40.87	25.6	168.443

\* Sismo ocurrido el 30 de abril de

\*\* Sismo ocurrido el 19 de septiembre



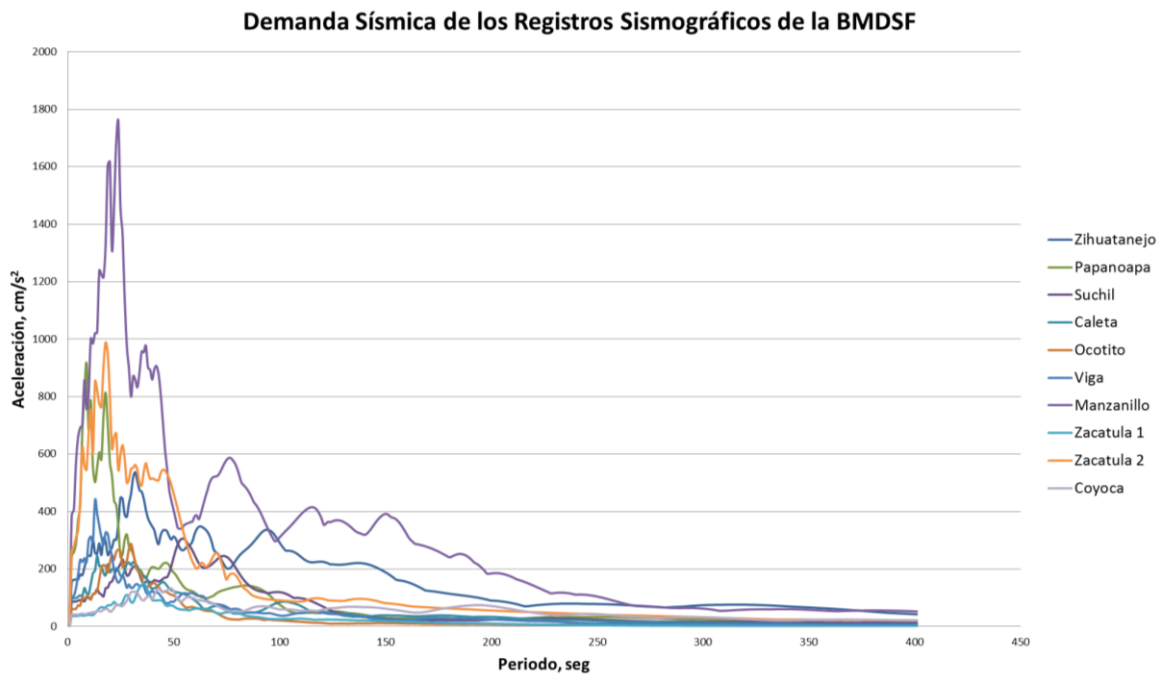


Figura II-22 Demanda sísmica de los registros sismográficos de la BMDSF

Tabla II-V Características de los registros obtenidos de la BMDSF

Modelo	Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )
1	153
	322
	534
	1191
2	209
	500
	600
3	908
	223
	888
4	997
	1425
	189
	693
4	824
	1587







## MODELOS ANALÍTICOS DE LOS PUENTES Y SISTEMAS DE REFUERZO PARA LA SUBESTRUCTURA

### III.1. Introducción

**E**n este capítulo se presentan los modelos analíticos de los puentes que se modelaron para desarrollar este trabajo, así como los correspondientes al refuerzo mediante encamisado de placas de acero en las columnas. Los modelos analíticos desarrollados se basan en dos aspectos fundamentales: el primero es que los puentes de estudio correspondan a casos típicos de puentes existentes en la red carretera de la República Mexicana; mientras que el segundo tiene el objetivo de evaluar puentes que puedan ser susceptibles a la acción de sismos y que esta acción no hubiese sido considerada durante su proceso de diseño, este tipo de estructuras se pueden encontrar en la costa del Pacífico de México. Teniendo esa hipótesis presente se sabe que los casos de estudio tendrán daños ante la acción de terremoto de magnitud importante, siendo así una posibilidad de rehabilitación y/o refuerzo los encamisados metálicos, el determinar la eficiencia de esta técnica de refuerzo es uno de los objetivos que se plantea resolver en este trabajo. En los siguientes subcapítulos se profundizará en las características particulares que se consideraron al idealizar los modelos analíticos de los puentes originales y de éstos con su sistema de refuerzo.



Figura III-1 Encamisado de acero aplicado en toda la longitud de la columna.  
(Padgett, 2007)





## III.2. Descripción De Los Modelos Analíticos

Los modelos analíticos de los puentes de interés se desarrollaron con ayuda del software SAP2000. Este programa es desarrollado por la empresa SCI, Computer and Structures, Inc., y se utiliza tanto en la práctica profesional como en el área de investigación para modelar, analizar y diseñar desde estructuras hasta estructuras muy complejas.

### III.2.1. Características De Los Modelos De Los Puentes

Las características físicas de los elementos que componen los modelos analíticos se enumeran a continuación:

- Los modelos analíticos están basados en puentes de vigas simplemente apoyados.
- La geometría es típica de la red carretera Mexicana.
- Geometría regular en planta y elevación.
- La superestructura está compuesta por:
  - ◆ Una calzada con base asfáltica y con ancho de 10.85 m (en todos los modelos).
  - ◆ Las vigas de los puentes son vigas AASHTO tipo IV. Las propiedades geométricas de este tipo de viga se puede consultar en la Tabla III-I.
  - ◆ Se dejó una junta de dilatación. Esto con el fin de absorber las deformaciones generadas por efectos de temperatura. Estas juntas de dilatación puede ser modeladas con un elemento llamado “gap” en el software. Sin embargo, en los modelos se consideró un espacio libre entre claros de 5cms.





Tabla III-I Propiedades de las secciones de vigas AASHTO para puentes.  
[http://www.mexpresa.com/productos/vigas\\_p.php](http://www.mexpresa.com/productos/vigas_p.php)

Propiedades de secciones de traves AASHTO para puentes					
Tipo	H (cm)	B1 (cm)	B2 (cm)	Claro (m)	A (cm <sup>2</sup> )
I	71	40	30	10 a 13	1,743
II	91	45	30	12 a 18	2,325
III	115	56	40	16 a 24	3,629
IV	135	66	50	21 a 30	4,974
V	160	71	107	27 a 36	6,463
VI	183	71	107	33 a 42	6,923

- ◆ Las vigas de los puentes están rigidizadas transversalmente con diafragmas. Para el caso de los modelos en estudio se consideraron diafragmas de sección transversal rectangular de CR. Todos los modelos tienen cuatro diafragmas, dos de ellos al inicio y al final y los otros dos se colocaron equidistantes en los claros de los puentes.



Figura III-2 Diafragmas de sección rectangular en puentes.  
[http://cybertesis.upc.edu.pe/upc/2009/ortega\\_mg/xml/ressources/fig002.jpg](http://cybertesis.upc.edu.pe/upc/2009/ortega_mg/xml/ressources/fig002.jpg)



➤ La subestructura está compuesta por:

- ◆ Las columnas de concreto reforzado son de sección circular (Figura III-3) y su altura se es constante en todas las pilas que forman un puente, y se varía su altura para los diferentes modelos con valores de 6 o 10 m. Las columnas de los puentes tipo fueron diseñadas con base en la hipótesis de que éstas pueden sufrir daños ante la acción de sismos de gran magnitud generados en la costa del Pacífico. Es por esto que para su diseño se consideró lo siguiente:

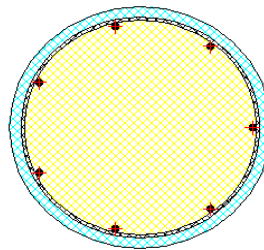


Figura III-3 Sección transversal de las columnas del Modelo 1.

- Puentes diseñados y construidos antes y durante la década de los noventa.
- Para su diseño se consideró una zona sísmica B. Esto con la idea de que los puentes no tengan la capacidad suficiente para resistir sismos con las características de los que se generan en la zona sísmica D.
- El diseño se condujo con base en las Normas Técnicas Complementarias (NTC) del Reglamento del Distrito Federal en lo referente al capítulo de Diseño y Construcción de Estructuras de concreto (2001).
- El análisis del diseño se realizó con ayuda del programa SAP2000.
- El armado de la columna está formado por varillas corrugadas de acero tanto para la dirección longitudinal como para la transversal. En ambos casos se asumió un  $f'_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ . La distribución de los estribos se tomó de acuerdo a la máxima especificada en las NTC.
- Para el área de acero longitudinal se tomó una cuantía de acero deficiente, el cual es de  $0.005A_g$ , para garantizar que las columnas de los puentes





presenten diferentes estados límite de daño ante la acción de sismos con diferentes intensidades. El detalle de los armados se puede ver en la Tabla III-II.

- ◆ Estas columnas están rigidizadas por medio de cabezales de CR, para los que se asumió una sección transversal rectangular. En la Figura III-4 se muestra un ejemplo de éstos.



Figura III-4 Cabezales de concreto reforzado.  
<http://www.cicmexicali.org/socios/publicacion/297>

- Se colocaron placas de acero y neopreno intercaladas con sección transversal simétrica para apoyar a la superestructura en la subestructura, como se muestra en la Figura III-5. Los tipos de apoyos de neopreno que se consideraron en el modelado analítico de los puentes fueron fijos y móviles. Ambos tipos de apoyos fueron caracterizados en el modelado mediante un elemento tipo link, donde cada condición de apoyo se obtiene cambiando para cada caso las propiedades de rigidez apropiadas en el software, para que de esta manera se tenga el comportamiento deseado. Se modificaron las rigideces correspondiente a los tres grados de libertad de traslación (sentido longitudinal, transversal y vertical). Los apoyos fijos son aquellos que sólo permiten deflexiones angulares restringiendo los desplazamientos horizontales. Mientras que los apoyos móviles son los que permiten el movimiento de traslación en el punto donde éstos se colocan debido a la expansión y/o contracción que son ocasionados por los cambios de temperatura o por cualquier otro fenómeno. Las rigideces consideradas en el modelo fueron 280 t/m y 200 t/m





para el apoyo fijo y móvil respectivamente en las direcciones longitudinal y transversal. En ambos tipos de apoyos se consideró una rigidez vertical con un valor muy alto

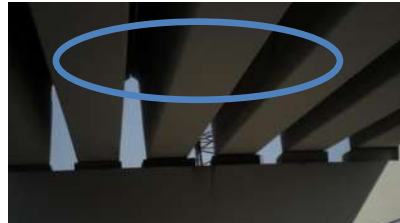


Figura III-5 Apoyos de neopreno.  
<http://www.apoyosdepunte.mex.tl/>

La disposición de los apoyos fijos y móviles en los modelos de los puentes se puede ver en la Figura III-6.

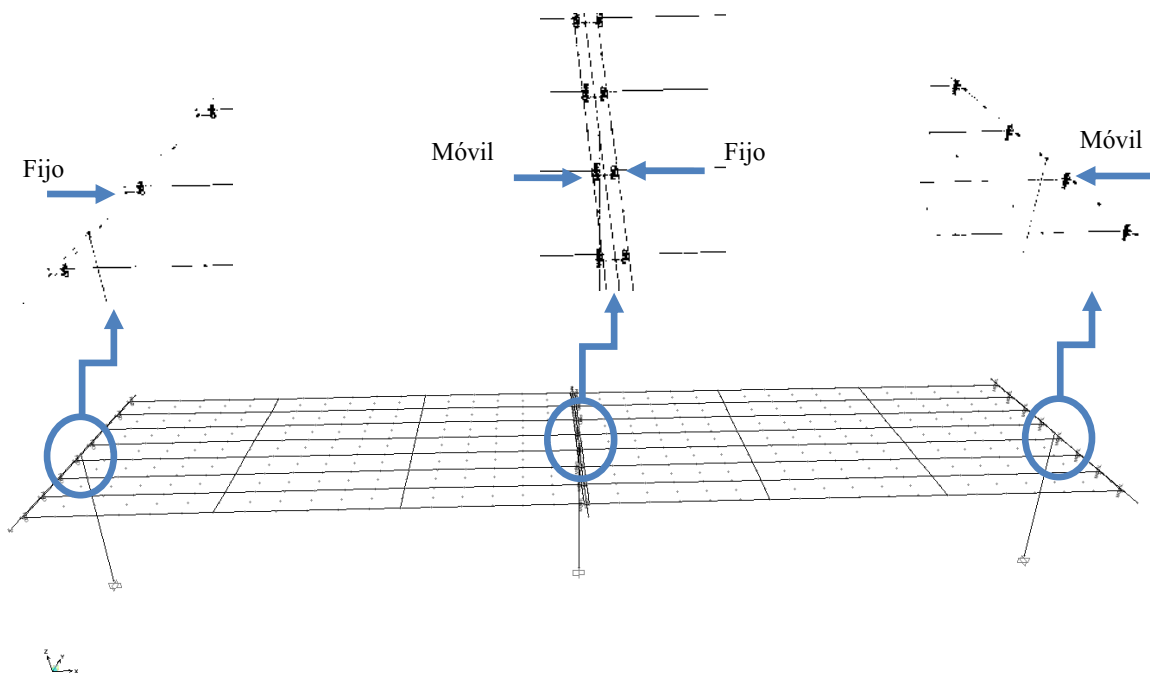
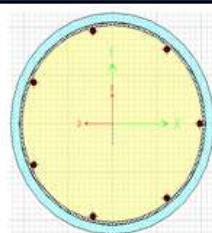
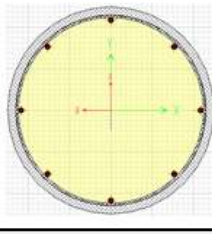
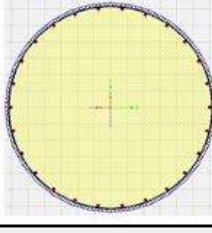
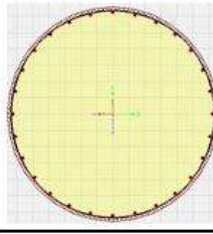


Figura III-6 Disposición de los apoyos fijos y móviles en los modelos analíticos.





Tabla III-II Detalles de los armados de las columnas

Modelo	Hpila (m)	Especificaciones						f'c (kg/cm2)	Croquis
		Ø De Columna (m)	# De Varillas Long.	Ø Del Acero De Refuerzo (in)	Ø De Estribos (in)	Separación De Estribos (cm)			
1	6	1.15	7	10	5	10	250		
2	10	1.25	8	10	5	10	250		
3	6	3.2	26	14	5	10	250		
4	10	3.3	28	14	5	10	250		





El comportamiento de los elementos estructurales que componen los puentes se consideró elástico. Cada uno de los elementos listados fue modelado en el programa SAP2000. En la Tabla III-III se observa a detalle cómo se modeló cada uno de estos elementos y que función tiene cada uno de éstos dentro del programa.

Tabla III-III Elementos de la superestructura, subestructura y la interfase entre éstas

Elemento Estructural	Elemento en Sap2000	Función	Ejemplo grafico del elemento
<i>Una calzada con base asfáltica y con un ancho de 10.85m</i>	Shell	Son elementos solidos tridimensionales donde una dimensión es más pequeña que las otras dos. Este elemento puede ser triangular o cuadrilátero. Se usan para modelar, analizar y diseñar losas, muros o placas sometidas a flexión, cortante y fuerza axial.	
<i>Vigas AASHTO Tipo IV Diafragmas con sección transversal rectangular Columnas Cabezales con sección transversal rectangular</i>	Barra	Son miembros esbeltos sujetos a carga lateral y axial, momento y torsión. Son modelados como una línea recta que conecta dos nudos. Posee 6 grados de libertad. Son usados para modelar columnas, vigas, armaduras, cables y miembros a tensión.	
<i>Placas de acero y neopreno intercaladas</i>	Link	Son usados para modelar el comportamiento de algunos elementos de soporte especiales tales como: aislamiento de base, amortiguadores, gaps, resortes entre otros.	





Los elementos antes mencionados se pueden ver en la sección transversal del puente en la Figura III-7. Los modelos tridimensionales pueden verse en la Figura III-8 y las características geométricas de los modelos se listan en la Tabla III-IV.

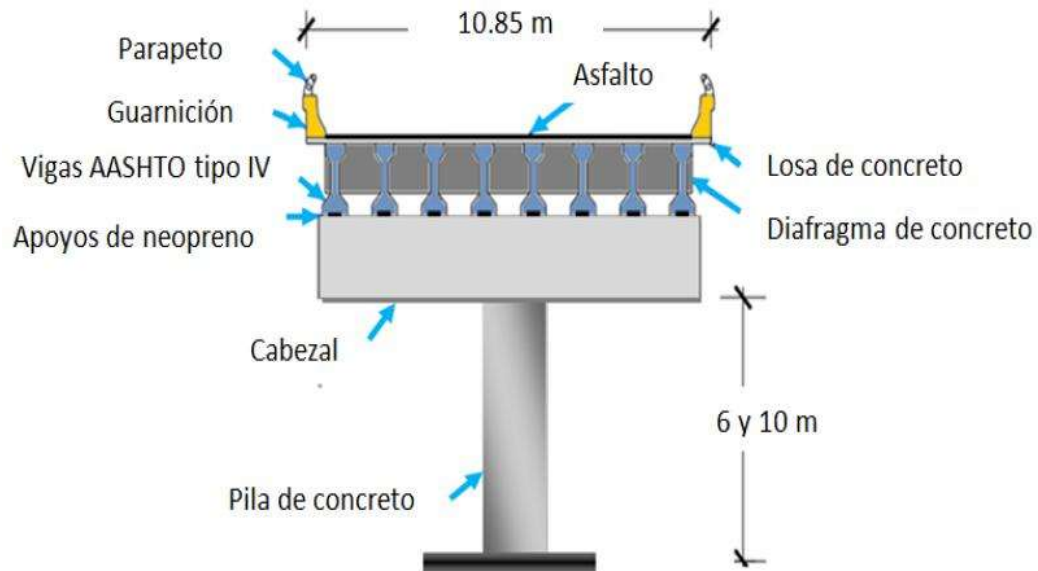


Figura III-7 Sección transversal de los modelos analíticos. (Tíripiti Zacarías, 2012)

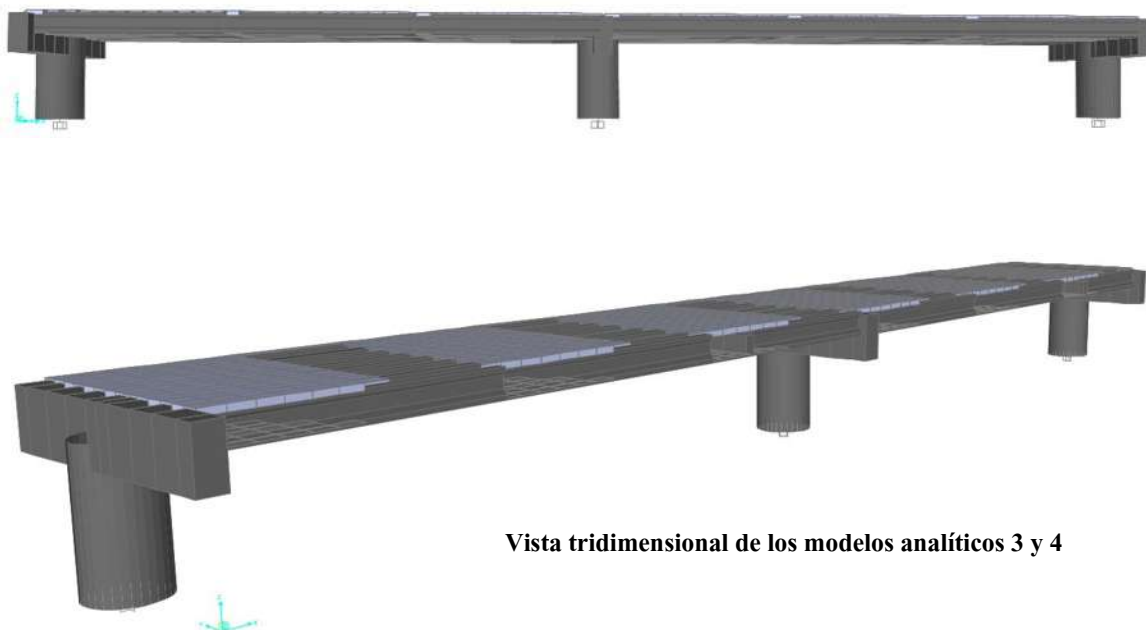
Tabla III-IV Dimensiones geométricas de los modelos analíticos

Modelo	Longitud de Claro (m)	Altura de Pila (m)	Diámetro de Pila (m)
1	20	6	1.15
2	20	10	1.25
3	40	6	3.2
4	40	10	3.3





**Vista tridimensional de los modelos analíticos 1 y 2**



**Vista tridimensional de los modelos analíticos 3 y 4**

Figura III-8 Vista tridimensional de los modelos analíticos 1, 2, 3 y 4 en el programa SAP2000.





### III.2.2. Cargas Consideradas Aplicadas En Los Modelos

#### III.2.2.1. Carga Muerta

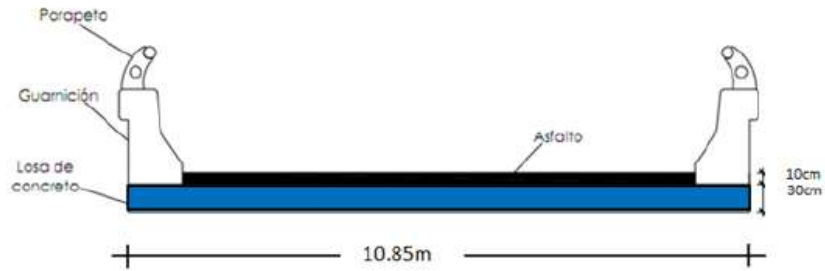


Figura III-9 Elementos considerados en las cargas muertas aplicados en los modelos. (Tíripiti Zacarías, 2012)

Las cargas muertas están conformadas por el peso de todos aquellos elementos que forman parte de la superestructura. En los modelos analíticos las cargas muertas que se consideraron fueron la losa de concreto, la carpeta asfáltica, las guarniciones y los parapetos. Las cargas muertas se listan en la Tabla III-V. Estas cargas se aplicaron sobre los elementos tipo Shell del modelo como una carga uniformemente distribuida. El diagrama de las cargas muertas se observa en la Figura III-9.

Tabla III-V Pesos de los elementos considerados para la carga muerta

Elemento	Espesor (m)	Y (t/m <sup>3</sup> )	Carga (t/m <sup>2</sup> )
Losa de Concreto	0.3	2.4	0.72
Carpeta Asfáltica	0.1	2.2	0.22
Parapeto y guarnición			0.01
		Total =	0.95





**III.2.2.2. Cargas Vivas**

Las cargas vivas en un puente están formadas por los vehículos que transitan sobre el mismo y las personas en las banquetas. En general para claros cortos las cargas de camión gobiernan el diseño, lo cual, es opuesto en grandes claros.

Los vehículos que se consideraron para las cargas vivas en el modelado de los puentes en estudio son los camiones HS-20, T3-S3 y el T3-S2-R4. Siendo estos camiones los típicos que circulan actualmente en las carreteras del país. Su representación puede verse en la Figura III-10.

**III.2.2.3. Cargas Accidentales**

Las cargas accidentales que se consideraron en el modelado analítico de los puentes fueron las correspondientes al capítulo de análisis estructural por sismo del Manual de obras Civiles de la CFE del año 1993. Los supuestos que se tomaron fueron las siguientes:

- Que las estructuras se localizaban en la zona sísmica B.
- Que los puentes estaban desplantados en suelo tipo I, el cual, corresponde a terreno firme.

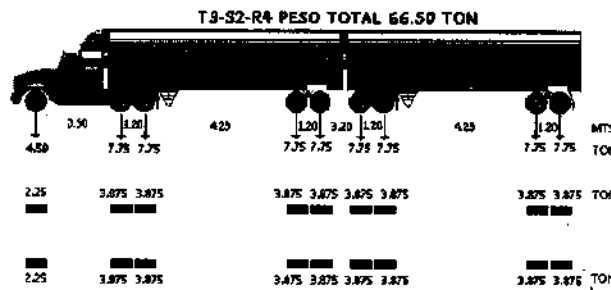
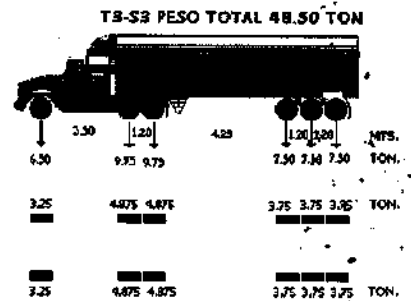
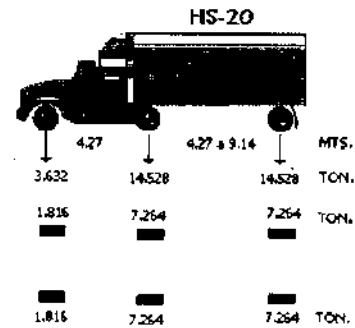


Figura III-10 Camión HS-20, T3-S3 y T3-S2-R4.  
<http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/10680/Capitulo6.pdf>





### III.3. Sistema De Refuerzo

El sistema de refuerzo que se analizó en este trabajo fue el conocido como encamisado mediante placas de acero. Este sistema de refuerzo se implementó en la subestructura del puente, siendo más específico en el fuste de las columnas. Esto debido a que se consideró que el daño que tendrían los puentes ante sismos de magnitud importante generados en la costa del Pacífico se concentraría principalmente en las columnas en su zona de formación de articulaciones plásticas. Se optó por el uso de este sistema de refuerzo principalmente por dos razones, la primera de ellas se debe a su amplio uso, mientras que la segunda de ellas resulta de la rapidez de construcción que ofrece su proceso de colocación. El encamisado de acero que se propuso en el análisis de las columnas reforzadas fue por medio de dos placas soldadas (Figura III-12), procedimiento que se explicará más a detalle en secciones posteriores a esta. Uno de los objetivos de este trabajo es conocer el beneficio que tiene la implementación de este tipo de sistema de refuerzo ante sismos que ocurren en la costa oeste del país.

#### III.3.1. Encamisado De Acero

El encamisado de acero es uno de los sistemas de refuerzo más implementados como sistema de refuerzo de columnas de CR de puentes; sin embargo, actualmente es usado para columnas con secciones geométricas diferentes a la circular (Figura III-11).

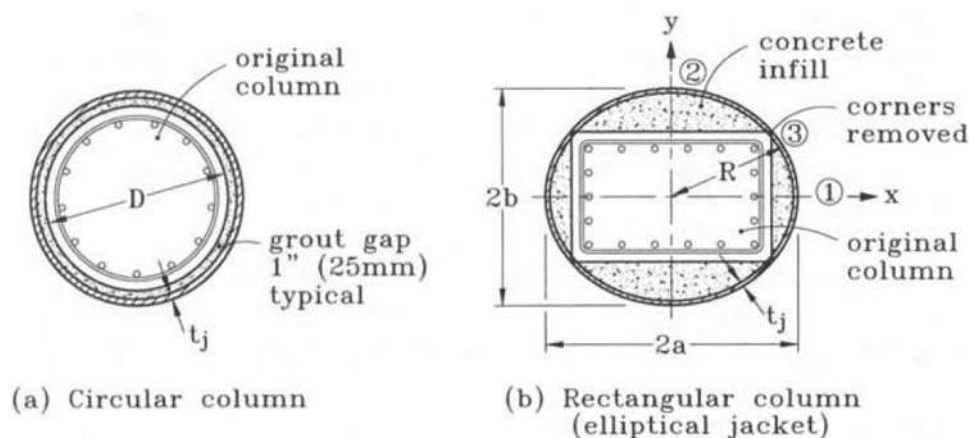


Figura III-11 Confinamiento de columnas por medio de encamisado de acero. (Priestley, et al., 1996)





El encamisado de acero es un sistema de refuerzo que consiste en envolver el elemento por medio de dos mitades de placa de acero que se sueldan de manera vertical como se puede ver en la Figura III-12. Este procedimiento es el que se tomó base para el desarrollo de este trabajo. Sin embargo, las placas pueden ser conectadas a las columnas por medio de otras técnicas, entre las que se encuentra una conexión a base de tornillos. El tamaño de ambas placas de acero tienen un diámetro igual al diámetro de la columna más un espacio libre que puede variar de 0.50 a 1 pulgada. El acero que se suele usar en el encamisado es el A-36. El encamisado de acero puede colocarse totalmente o parcialmente a lo largo de la columna. Ejemplo de esto se puede ver en las Figura III-1, Figura III-13 y Figura III-12.



Figura III-12 Encamisado de acero parcial en la columna.  
<http://www.wsdot.wa.gov/Projects/15/SSeattleSeismic/Photos>

Si el encamisado se coloca en la parte inferior, superior o en su defecto en toda la longitud de la columna, se recomienda dejar una holgura vertical entre éste y la superestructura o cimentación según sea el caso. La recomendación de la Federal Highway Administration es dejar esta holgura de 5 centímetros (2006). La Figura III-14 muestra este espaciamiento vertical.

La forma del encamisado de acero se deberá en gran medida a la configuración geométrica inicial de la columna. Sin embargo, la forma final del encamisado también dependerá de si la forma original dará como resultado la capacidad que se quiere alcanzar. Es así que las columnas cuadradas cambian a secciones circulares mientras que las columnas rectangulares lo hacen a secciones elípticas.



Figura III-14 Encamisado de acero en zonas de la columna.  
<http://mceer.buffalo.edu/research/HighwayPrj/Workshops/Charleston/07DesRoches.pdf>





El encamisado de acero es un sistema de refuerzo que principalmente ayuda al elemento a incrementar el confinamiento, la resistencia a flexión y al cortante, la capacidad axial, la ductilidad y mejorar el comportamiento en la(s) zona(s) donde exista un mal traslape del acero de refuerzo.

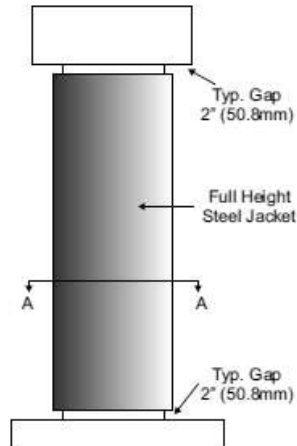


Figura III-14 Espacio vertical en el encamisado de acero.  
(Padjett, 2007)

#### III.3.1.1. *Proceso Constructivo Del Encamisado De Acero*

El proceso que se sigue en la instalación del encamisado de acero es el siguiente:

- Conocer la geometría de la sección que tiene la columna (circular, cuadrada o rectangular) y la geometría que va a adquirir después del sistema de refuerzo (circular, elíptica o mantener la sección original del elemento) (Figura III-11).
- Calcular el espesor de las placas de acero. Este espesor varía desde 1 cm (3/8" in) hasta un máximo de 2.5 cm (1 in). El espesor de placa se puede evaluar mediante las siguientes fórmulas:





- ◆ Fórmula que propone Priestley, et al., (1996):

$$t_j \geq \frac{0.18(\epsilon_{cm} - 0.004)Df'_{cc}}{f_{yj}} \text{ (kip, in)} \quad \text{III-1}$$

donde:

$\epsilon_{cm}$  = deformación al esfuerzo máximo del concreto.

D = diámetro de la sección transversal de la columna.

$f'_{cc}$  = resistencia máxima a compresión del concreto confinado.

$f_{yj}$  = esfuerzo de fluencia del acero.

$\epsilon_{sm}$  = deformación al esfuerzo máximo del acero.

- ◆ Fórmula propuesta en el Manual de la Federal Highway Administration (2006):

$$t \geq \frac{f_1 D}{2f_s} = \frac{f_1 D}{400} \text{ (mm)} \quad \text{III-2}$$

donde:

t = espesor de las placas de acero (mm).

$f_1$  = es el esfuerzo provocado en el encamisado de acero. Cuando el módulo del Acero es igual a 200 GPa, se tomará  $f_1$  como 200 MPa a una deformación de 0.001.

D = diámetro de la sección transversal de la columna.

$f_s$  = esfuerzo de confinamiento requerido en el encamisado de acero.

Los espesores de las camisas de refuerzos implementadas en los modelos de este trabajo se evaluaron con la ecuación III-2.







- Establecer la ubicación donde se va a colocar el encamisado de acero, ya que el refuerzo se puede colar en la totalidad de la longitud de la columna, en una cierta longitud o en varias zonas de la misma, tal y como se muestra en la Figura III-12.
- Para colocar el encamisado se deben eliminar las impurezas del elemento. Estas impurezas están formadas por material de la columna en malas condiciones, grasas, aceites o derivados del petróleo que estén impregnados en el elemento. Para remover las impurezas se debe tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:
  - ◆ Para la remoción de las impurezas se puede usar agua a presión.
  - ◆ Si el daño en el elemento es tal que éste haya llegado tanto al acero principal y como al de confinamiento se deben limpiar para remover las impurezas, para después cubrirlos con una capa epóxica.
- En secciones cuadradas y rectangulares se remueven las esquinas para que no se presenten problemas con la colocación del encamisado.
- Previo a la colocación de las placas metálicas se deben tomar en consideración las siguientes recomendaciones:
  - ◆ Se debe picar el elemento para producir una rugosidad tal que nos asegure su buena adherencia.
  - ◆ Se debe humedecer el elemento para que no exista una absorción temprana del agua del material que va a rellenar el espacio.
- Los métodos implementados para conectar las placas de acero entre sí pueden ser los siguientes:
  - ◆ Uno de ellos es soldar las placas. La soldadura se coloca de manera vertical. Para esto se debe dejar una separación entre las placas. Esta distancia puede ser de 1.3 a 2.5 centímetros (Figura III-13).
  - ◆ La unión de las placas se puede lograr de igual forma mediante conexiones por medio de tornillos (Figura III-15), pernos o anclas.
- El encamisado de acero se une al elemento estructural mediante el uso de pernos o anclas.
- Cuando las placas metálicas son colocadas en la base o en la parte superior de una columna se debe dejar un espacio vertical de 5 centímetros (Figura III-14).





- El espacio que queda entre la columna y el encamisado se rellena con un mortero expansivo, lechadas de cemento o algún material epóxico; esto con la idea de que abarque todo el espacio que quedo entre la columna y el encamisado, con lo cual se busca que no queden vacíos que puedan afectar el desempeño del sistema de refuerzo.

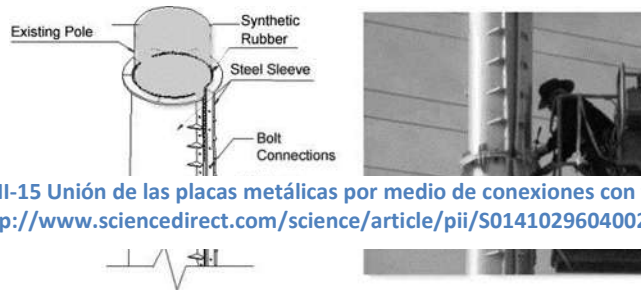


Figura III-15 Unión de las placas metálicas por medio de conexiones con tornillos.  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029604002299>

### III.3.1.2. Ventajas y Desventajas Del Encamisado De Acero

Las ventajas del encamisado de acero son:

- Bajo costo económico.
- No se necesita el cierre del puente para que el sistema de refuerzo sea instalado.
- Se aumenta considerablemente la rigidez y la resistencia a la flexión.
- Debido a que la aplicación de este sistema de refuerzo ha sido muy difundido. Existe en el mercado laboral una gran cantidad de personal con los conocimientos necesarios para su aplicación.
- Rápida ejecución del sistema de refuerzo.
- La inspección de las condiciones de este sistema de refuerzo es sencilla.





Sin embargo, el encamisado de acero presenta ciertas desventajas respecto a otros sistemas de refuerzo, las cuales son:

- Corrosión.
- Se debe prever protección contra el fuego.
- Se necesita maquinaria para llevar las placas de acero al sitio de colocación, así como durante el proceso del mismo (Figura III-16).



Figura III-16 Espacio vertical del encamisado de acero.  
<http://www.wsdot.wa.gov/Projects/15/SSeattleSeismic/Photos>



### III.4. Materiales

Los materiales que se consideraron para la definición de los modelos matemáticos de los puentes se enlistan en la Tabla III-VI. Cabe señalar que los modelos constitutivos que se usaron fueron:

- Para la zona del recubrimiento se usó el modelo de Mander sin confinar.
- Para el caso del núcleo de las columnas se usó el modelo de Mander confinado.
  - ◆ La curva de histéresis implementada en el modelo del comportamiento no lineal del concreto fue la cinemática.
- Para el caso del acero de refuerzo longitudinal, transversal y del encamisado se consideró la curva esfuerzo-deformación simple, mientras que para modelar el comportamiento no lineal del material se asumió la curva de histéresis de Takeda.

Tabla III-VI Propiedades mecánicas de los materiales

Material	Propiedades Mecánicas				
	Resistencia a Compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Módulo de Elasticidad (kg/cm <sup>2</sup> )	Relación de Poisson	Esfuerzo de Fluencia (kg/cm <sup>2</sup> )	Peso (t/m <sup>3</sup> )
Concreto Reforzado	250	221,359.43	0.2		2.4
Acero de refuerzo longitudinal y transversal		2,100,000		4200	7.85
Acero A-36		2,100,000		2530	7.85

### III.5. Modelos Analíticos Con Encamisado De Acero

Los modelos analíticos de los casos de estudio se diseñaron de tal forma que resultarán vulnerables ante la ocurrencia de sismos fuertes como los que ocurren en la costa del Pacífico de nuestro país, con lo cual se esperarían daños en las columnas de los puentes al estar provistas de una capacidad adecuada para resistir estas demandas, por lo que deberá implementarse un sistema de refuerzo. El sistema de refuerzo que se aplicó en las





columnas fue el encamisado de acero por medio de placas metálicas de acero A-36. Los espesores de placas que se propusieron para el encamisado de acero fueron de 3/8”, 1/2”, 5/8”, 3/4” y 1”. En la Figura III-17 se muestra la columna del modelo 1 con el encamisado de acero. En la Tabla III-II se muestran los detalles del armado de las columnas. Mientras que en la Tabla III-VII se lista la nomenclatura que se le asignó a cada uno de los modelos analíticos con los correspondientes espesores de encamisados. Cabe señalar que la nomenclatura que se asignó a cada uno de los casos en estudio será con la que se referenciaran a lo largo del escrito.

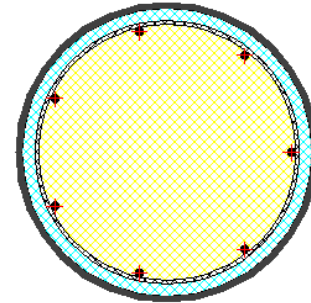


Figura III-17 Modelo de Columna reforzada con encamisado de acero.

Tabla III-VII Nomenclatura de los Modelos Analíticos con Encamisado de Acero

Modelo	Claro (m)	H <sub>pila</sub> (m)	Espesor					
			0	3/8”	1/2”	5/8”	3/4”	1”
1	20	6	M1-0	M1-3/8-0*	M1-1/2-0	M1-5/8-0	M1-3/4-0	M1-1-0
				M1-3/8-1**	M1-1/2-1	M1-5/8-1	M1-3/4-1	M1-1-1
2	20	10	M2-0	M2-3/8-0	M2-1/2-0	M2-5/8-0	M2-3/4-0	M2-1-0
				M2-3/8-1	M2-1/2-1	M2-5/8-1	M2-3/4-1	M2-1-1
3	40	6	M3-0	M3-3/8-0	M3-1/2-0	M3-5/8-0	M3-3/4-0	M3-1-0
				M3-3/8-1	M3-1/2-1	M3-5/8-1	M3-3/4-1	M3-1-1
4	40	10	M4-0	M4-3/8-0	M4-1/2-0	M4-5/8-0	M4-3/4-0	M4-1-0
				M4-3/8-1	M4-1/2-1	M4-5/8-1	M4-3/4-1	M4-1-1

\* El cero al final de la nomenclatura significa dentro del programa SAP2000 que el encamisado de acero sólo tiene la función de confinar (Casing = 0).

\*\* El uno al final de la nomenclatura significa dentro del programa SAP2000 que el encamisado de acero contribuye a la relación momento curvatura tal como lo hace el acero de refuerzo (Casing = 1).





## CAPACIDAD LATERAL DE LAS PILAS DE LOS MODELOS DE PUENTES

### IV.1. Introducción

**E**l conocer la capacidad lateral de las columnas nos muestra la habilidad de éstas para resistir cierta demanda. El objetivo en este trabajo de calcular la capacidad lateral de las columnas en los modelos analíticos es para que junto con la demanda sísmica se pueda conocer el punto de desempeño a través de los espectros de capacidad y demanda respectivamente. Es debido a esto que en el presente capítulo se presenta un resumen acerca del análisis estático no lineal, el procedimiento que se siguió para calcular la capacidad lateral de las columnas de los modelos analíticos de los puentes y finalmente se muestran los resultados obtenidos en función de parámetros ingenieriles.

### IV.2. Métodos De Análisis No Lineales

A pesar de que los análisis elásticos permiten identificar la capacidad elástica de las estructuras e indican donde ocurre en primer lugar la fluencia, estos resultados no nos permiten predecir los mecanismos de falla que se pueden presentar, ni tampoco toman en cuenta la redistribución de las fuerzas durante las etapas en donde se presente la fluencia del material que conforma la estructura, comportamiento que es muy importante considerar cuando se sabe que los elementos estructurales pueden presentar algún tipo de daño. Debido a esta razón es que se utilizan con mayor frecuencia análisis estáticos no lineales, ya que con esta herramienta se pretende representar diferentes escenarios del comportamiento de una estructura o elemento estructural.





Al realizar análisis estáticos no lineales es necesario conocer:

- *La demanda (desplazamiento):* representa el efecto que los sismos pueden llegar a producir en la estructura.
- *La capacidad:* es la habilidad de la estructura para resistir la demanda sísmica, y está representada por la curva del pushover.
- El comportamiento: está en función de cómo la estructura puede manejar la demanda.

Estos elementos se presentan esquemáticamente en la Figura IV-1.

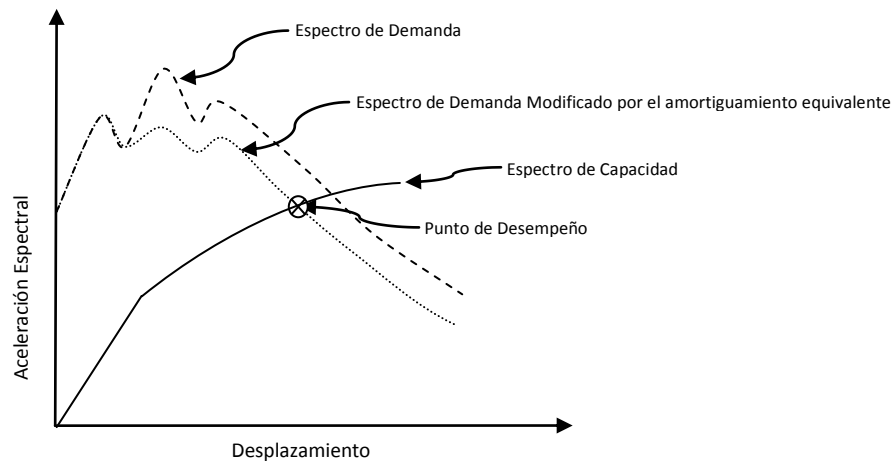


Figura IV-1 Espectro de capacidad, espectro de demanda y punto de desempeño,

#### IV.2.1. Clasificación De Los Métodos De Análisis No Lineales

En la actualidad se cuenta con una gran variedad de métodos simplificados de análisis estáticos no lineales entre los que encontramos a los siguientes:

- *Método del Espectro de Capacidad:* este método se basa en obtener un punto donde cruce el espectro de capacidad y el espectro de demanda, el cual, es reducido por efectos del





amortiguamiento equivalente. Este punto se conoce con el nombre de punto de desempeño (Figura IV-1). El espectro de capacidad se obtiene al transformar la curva de capacidad obtenida del análisis de pushover a un S1GL por medio de ciertos factores definidos en el ATC-40 o en el FEMA-273 (Figura IV-2).

En el ATC-40 los factores mediante los cuales se convierte una curva de capacidad a un espectro de capacidad son los definidos por las ecuaciones IV-1, IV-2, IV-3 y IV-4. El formato al que se convierte el espectro de capacidad se llama ADRS (Acceleration-Displacement Response Spectra). La gráfica tiene en el eje de las abscisas la aceleración espectral ( $S_a$ ) contra el desplazamiento espectral ( $S_d$ ) en el eje de las ordenadas.

$$PF_i = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g \right]}{\left[ \sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g \right]} \quad \text{IV-1}$$

$$\alpha_1 = \frac{\left[ \sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}) / g \right]^2}{\left[ \sum_{i=1}^N w_i / g \right] \left[ \sum_{i=1}^N (w_i \phi_{i1}^2) / g \right]} \quad \text{IV-2}$$

$$S_a = \frac{V/W}{g} \quad \text{IV-3}$$

$$S_d = \frac{\Delta_{roof}}{PF_i \phi_{roof,1}} \quad \text{IV-4}$$

donde:

$PF_i$  = factor de participación modal para el primer modo natural.

$\alpha_i$  = coeficiente de masa modal para el primer modo natural.

$w_i/g$  = masa asignada al nivel  $i$ .

$\phi_{i1}$  = amplitud del modo 1 en el nivel  $i$ .

$N$  = último nivel.

$V$  = cortante en la base.

$W$  = carga muerta más carga viva probable.







$\Delta_{roof}$  = desplazamiento en la azotea.

$S_a$  = aceleración espectral.

$S_d$  = desplazamiento espectral.

El proceso general que se sigue en este método es el siguiente:

- *Determinar el espectro de capacidad (Figura IV 2).*
- *Determinar el espectro de demanda.*
- *Estimar el amortiguamiento equivalente.*
- *Determinar el espectro de demanda afectado por el amortiguamiento equivalente.*
- *Determinar el punto de desempeño.*
- *Revisar cómo se comporta la estructura ante la demanda.*

- *Método del coeficiente de desplazamiento:* este método se basa en el uso de análisis pushover y una versión modificada de la regla de igual desplazamiento para estimar un desplazamiento máximo. Este método lo podemos encontrar en el FEMA-273.
- *Método de la secante:* este método usa una estructura sustituta y una rigidez secante. Este método fue presentado en la Ciudad de Los Ángeles y propuesto por la Division 95. El título de este documento es *Earthquake Hazard Reduction in Existing Reinforced Concrete Buildings and Concrete Frame Buildings with Masonry Infill* (COLA 1995, 1995).
- *Análisis no lineal en la historia del tiempo.* este método consta de los mismos pasos básicos que el método estático. El único cambio con respecto a éste es que en el análisis no lineal se conduce en la historia del tiempo y las fuerzas laterales que se aplican se obtienen a partir del empleo de registros de aceleración que reflejen el peligro sísmico del sitio.

En este trabajo se empleó el método del espectro de capacidad para estimar la respuesta no lineal esperada en los casos de estudio mediante el método del pushover.



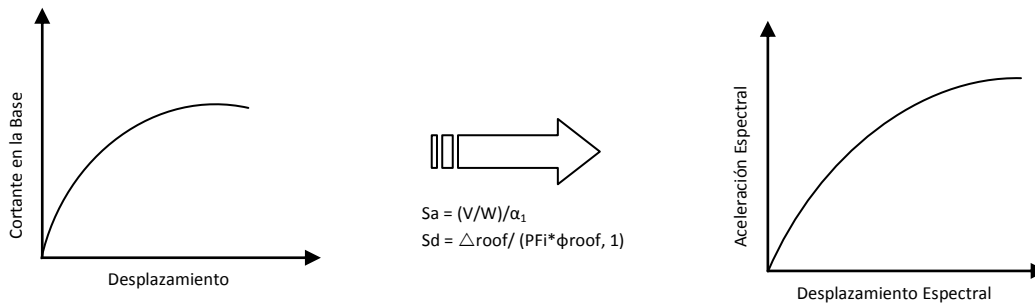


Figura IV-2 Conversión de la curva de capacidad a espectro de capacidad

### IV.3. Curvas de Capacidad

#### IV.3.1. Análisis Pushover

Para obtener la curva de capacidad se desarrollaron análisis de pushover a cada de uno de los casos de estudio ante las demandas sísmica de interés. El método pushover es un análisis estático no lineal, el cual consiste en aplicar un patrón de fuerzas horizontales que se incrementan gradualmente hasta que la estructura alcance su estado límite. El objetivo de este método es tratar de predecir el comportamiento real de la estructura ante la aplicación de dichas cargas. El resultado del análisis pushover se traza en una gráfica donde el eje de las abscisas corresponde al desplazamiento mientras que el eje de las ordenadas representa el cortante basal como se muestra en la Figura IV-2.

#### IV.3.2. Análisis Pushover De Los Modelos Analíticos

##### IV.3.2.1. Patrón De Cargas

El análisis pushover se condujo mediante la implementación del programa SAP2000. El patrón de cargas que se usó en los modelos de los puentes fueron cargas concentradas con valor unitario que se aplicaron





horizontalmente en el sentido longitudinal (Figura IV-3). Las cargas se aplicaron en la superestructura del puente en cada columna tal y como se muestra en la Figura IV-4.

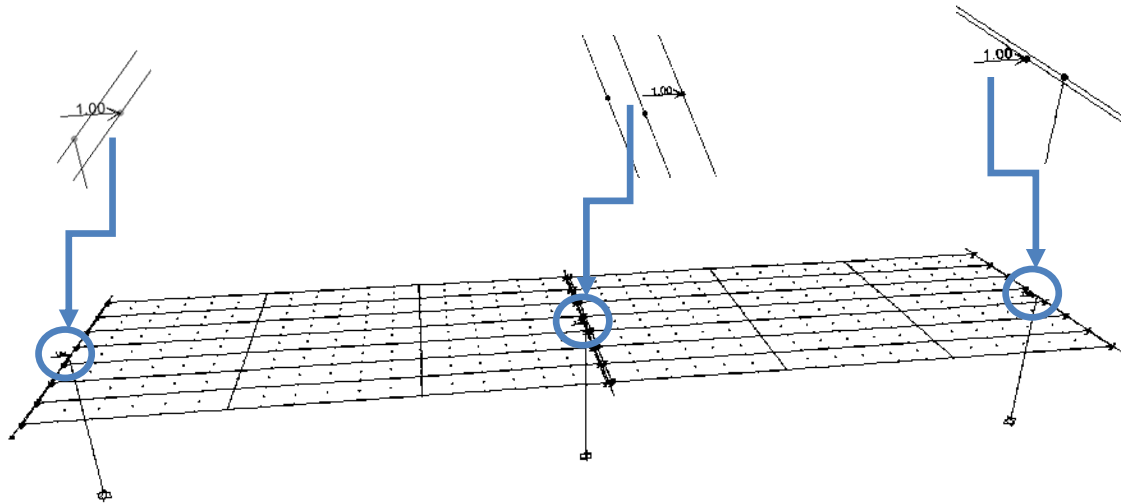


Figura IV-3 Patrón de cargas para el análisis pushover.

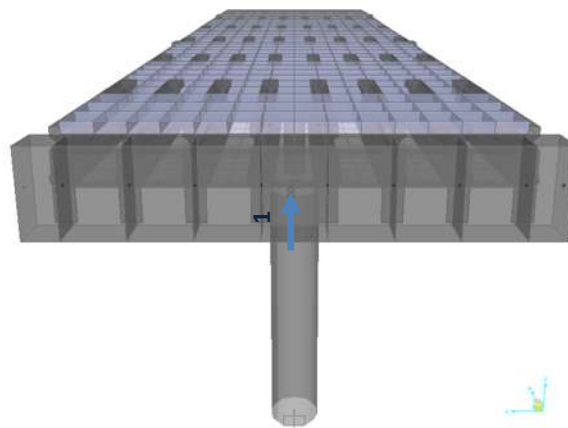


Figura IV-4 Carga unitaria aplicada en la superestructura para el análisis pushover.



Para poder realizar análisis estáticos no lineales, es necesario definir las propiedades y localización de la o las articulaciones plásticas que se puedan formar en el sistema estructural. La articulación plástica se forma cuando la sección transversal en su totalidad ha alcanzado el momento plástico sin aumento adicional en la capacidad a momento y se presenta en una cierta longitud del elemento, la cual depende de las condiciones particulares de cada columna.

El modelado de la articulación plástica en el software SAP2000 se realiza a través de un punto y no así como una longitud. En este punto es donde se monitorea el comportamiento de la articulación plástica. Para los casos de estudio y la forma en que está constituida la subestructura, pilas trabajando en cantiléver, se colocó una articulación plástica en el extremo inferior de cada una de las columnas que forman la subestructura, como se muestra en la Figura IV-5.



**Figura IV-5 Ubicación de articulaciones plásticas en los modelos de los puentes,**

Para la determinación de la longitud de articulación plástica de los casos de estudio se estimó mediante las expresiones IV-5 y IV-6, que corresponden respectivamente a un elemento de CR (Priestley, et al., 1996) y a un elemento de CR con camisa de acero (Federal Highway Administration (FHWA), 2006). Cada una de estas expresiones se utiliza adecuadamente para cada uno de los modelos analíticos ya que se desarrollaron modelos base (sin encamisado de acero) y modelos con encamisado de acero, como se indica a continuación:





- Para los modelos base la longitud de articulación plástica fue calculada con la fórmula de Priestley (1996), la cual se presenta a continuación:

$$L_p = 0.08L + 0.15f_{ye}d_{bl} \geq 0.30f_{ye}d_{bl} \quad \text{IV-5}$$

donde:

$L_p$  = longitud de articulación plástica (in).

$L$  = altura de la columna (in).

$f_{ye}$  = esfuerzo de fluencia del acero longitudinal (lb/in<sup>2</sup>).

$d_{bl}$  = diámetro de la varilla longitudinal (in).

- Para los modelos con encamisado de acero la fórmula que se usó en el cálculo de la articulación plástica fue obtenida del manual de la Federal Highway Administration (2006), siendo ésta la siguiente:

$$l_p = s_g + 2\chi d_b \quad \text{IV-6}$$

donde:

$l_p$  = longitud de articulación plástica (mm).

$s_g$  = espacio vertical entre las placas de acero a la base o parte superior del elemento, por lo general se toma como 50 mm.

$\chi$  = es un coeficiente que vale 6 para  $f_y = 275$  MPa y 9 para  $f_y = 414$  MPa.

$d_b$  = diámetro de las varillas que corresponden al refuerzo longitudinal (mm).





### IV.3.3. Curvas De Capacidad De Los Modelos Analíticos

Las curvas de capacidad obtenidas mediante los análisis desarrollados se muestran en la Figura IV-7 para el modelo 1; Figura IV-6 para el modelo 2; Figura IV-9 para el modelo 3 y Figura IV-8 para el modelo 4. Cada una de las figuras está compuesta por dos gráficas que presentan las curvas de capacidad para los casos donde el casing es igual a cero (figuras de la izquierda) y cuando vale igual a uno (figuras de la derecha). En todas las gráficas cada una de las series representa un espesor de placa de acero diferente. En las figuras el eje de las abscisas representa el desplazamiento obtenido mientras que el eje de las ordenadas representa el cortante en la base. Como se puede observar en todos los casos el aumento del espesor de la placa se traduce en un aumento en la capacidad de las columnas de los puentes. Sin embargo, este efecto resulta más evidente cuando el casing vale uno.

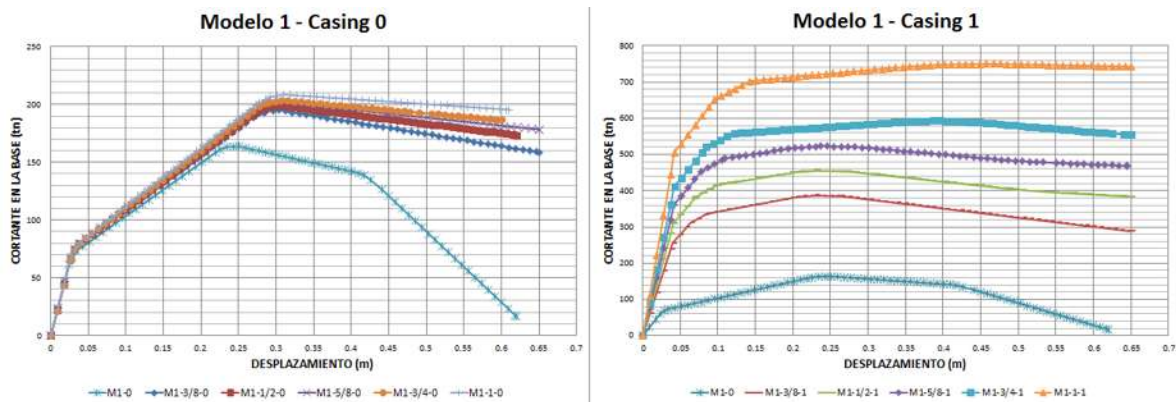


Figura IV-6 Curva de Capacidad para el modelo 1 con casing = 0 y casing = 1.

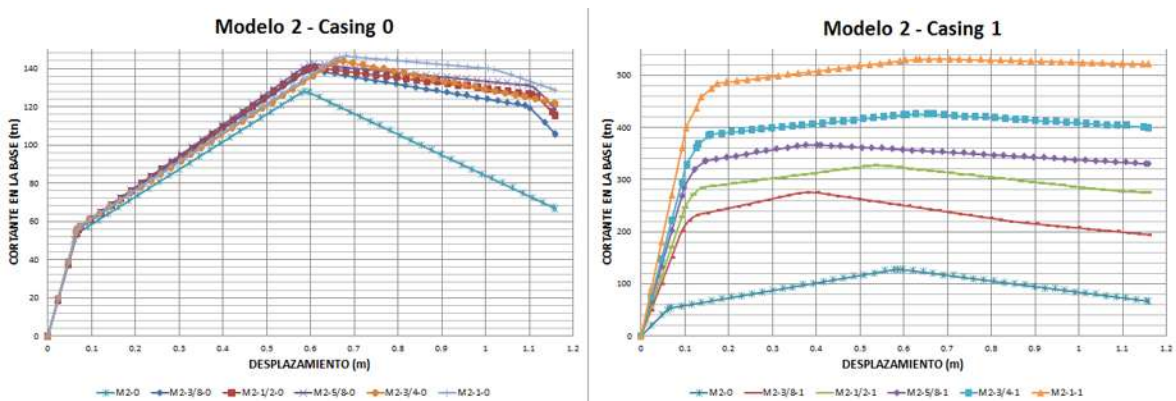


Figura IV-7 Curva de Capacidad para el modelo 2 con casing = 0 y casing = 1.



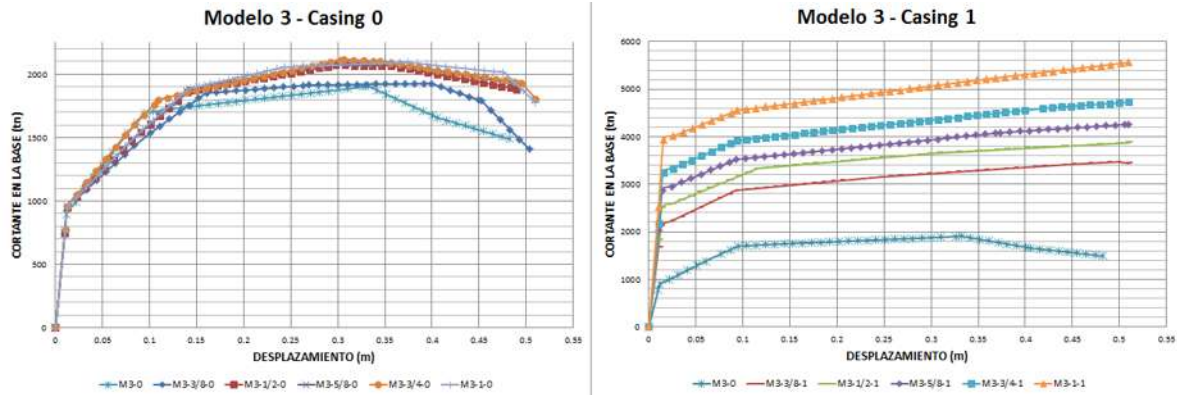


Figura IV-8 Curva de Capacidad para el modelo 3 con casing = 0 y casing = 1.

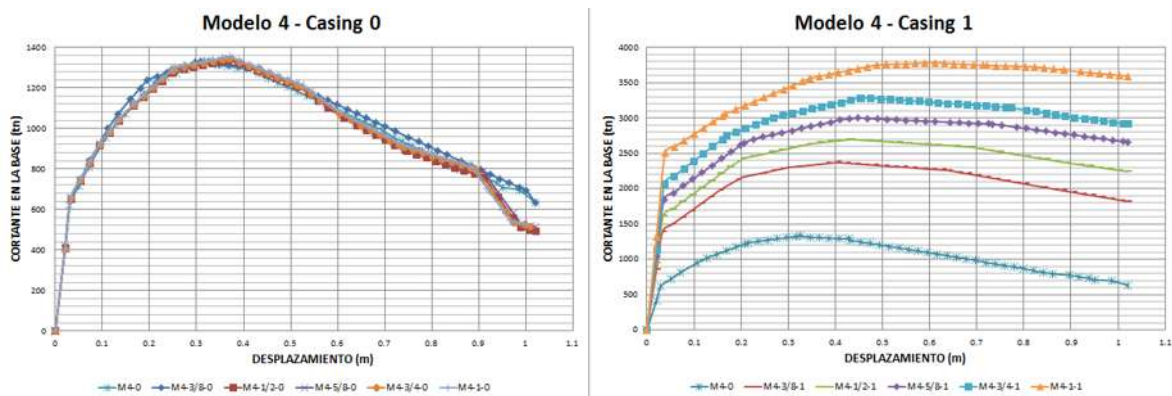


Figura IV-9 Curva de Capacidad para el modelo 4 con casing = 0 y casing = 1.

A manera de resumen en la Tabla IV-I se muestran los valores máximos obtenidos de las curvas de capacidad tanto para el desplazamiento (D) como para el cortante en la base (V).

Tabla IV-I Valores máximos de desplazamiento y cortante en la base de las curvas de capacidad en los modelos analíticos

Modelo	Sin placa		3/8"		1/2"		5/8"		3/2"		1"											
			Casing 0		Casing 1		Casing 0		Casing 1		Casing 0		Casing 1									
	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V	D	V						
1	0.62	164	0.65	195	0.65	386	0.62	199	0.65	455	0.65	202	0.65	523	0.6	204	0.65	593	0.61	209	0.65	751
2	1.16	128	1.16	139	1.16	276	1.16	141	1.16	327	1.16	142	1.16	366	1.16	144	1.16	425	1.16	146	1.16	531
3	0.48	1907	0.5	1926	0.51	3469	0.49	2070	0.51	3870	0.49	2092	0.51	4260	0.51	2118	0.51	4726	0.51	2093	0.51	5562
4	1.02	1334	1.02	1334	1.02	2371	1.02	1338	1.02	2696	1.02	1345	1.02	3000	1.01	1347	1.02	3287	1	1356	1.02	3782





De las figuras de las curvas de capacidad obtenidas para cada uno de los modelos de estudio se pueden hacer las siguientes observaciones:

- El encamisado de acero favoreció al aumento de la capacidad en todos los modelos analíticos conforme se aumentó el espesor de la placa, sin mostrar diferencia en la forma en cómo trabajaba el refuerzo, es decir los valores de casing 0 y 1. Los incrementos en la capacidad de los modelos con los diferentes espesores de placa se muestra en la Figura IV-10.
- No obstante, el incremento de capacidad que se alcanzó entre los modelos considerando el parámetro casing 0 o 1 si presentaron una gran diferencia entre los diferentes casos analizados. Por ejemplo, para los modelos con casing igual a cero y espesor de placa de acero de 1” se obtuvo para el modelo 1 un aumento en su capacidad de 27.38%, para el modelo 2 fue de 14.65%, para el modelo 3 de un 9.79% y para el modelo 4 de un 1.64%. Mientras que para los modelos con casing igual a uno y mismo espesor de placa se obtuvo para el modelo 1 un aumento en su capacidad de 358.29%, para el modelo 2 fue de 316.16%, para el modelo 3 de un 191.75% y para el modelo 4 de un 183.59%. Los porcentajes en el aumento de la capacidad se muestran gráficamente en la Figura IV-11. De esta información se concluye que:
  - Se presentó un aumento muy bajo en la capacidad de los modelos de los puentes para cuando el encamisado tiene la función única de confinar (Casing = 0) respecto a cuando el encamisado de acero contribuye a la relación momento curvatura (Casing = 1).
  - Se tuvo un aumento mayor en la capacidad para cuando la longitud de claro y las alturas de las pilas fueron más cortas. Esto se presentó en modelos 1 y 2; y los modelos 1 y 3 respectivamente.
- Como se puede ver en la Tabla IV-I la variación en el desplazamiento máximo que se tiene para cada uno de los modelos tomando en cuenta sus variaciones (altura de pilas, longitud de claros, espesores de placas, valores del casing y espesores de placa) fue muy pequeña.





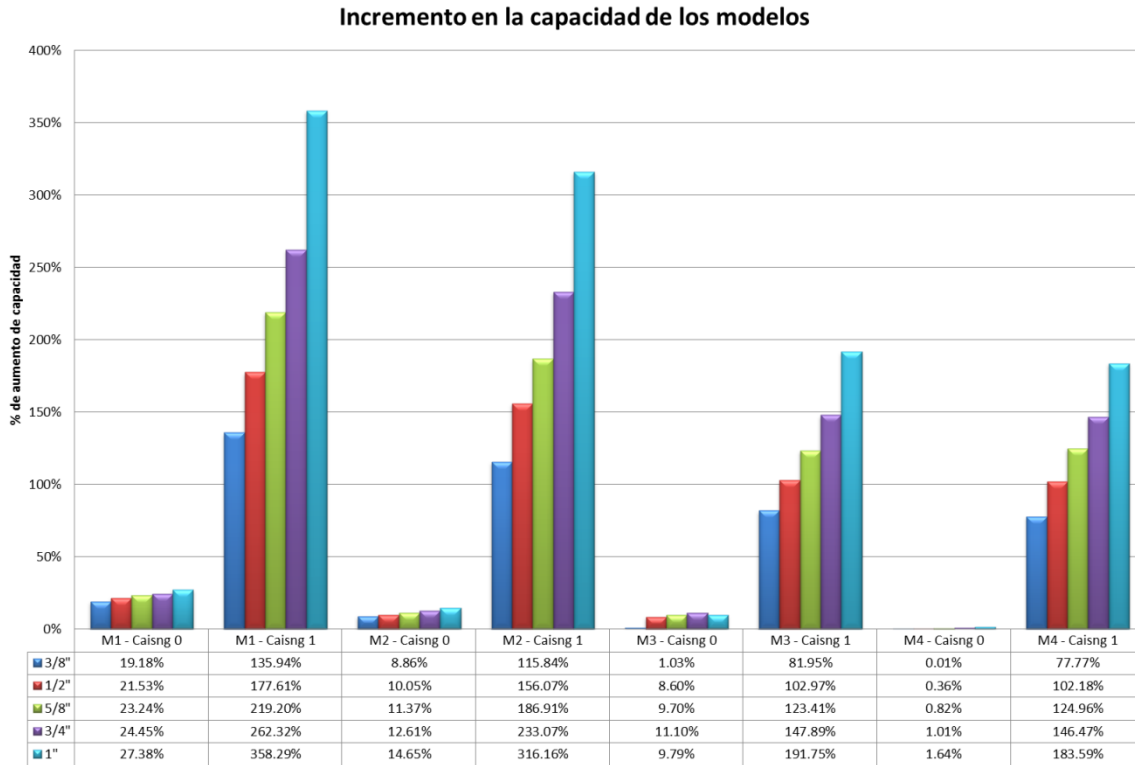


Figura IV-10 Incremento en la capacidad de los modelos para los diferentes espesores de placa de acero.

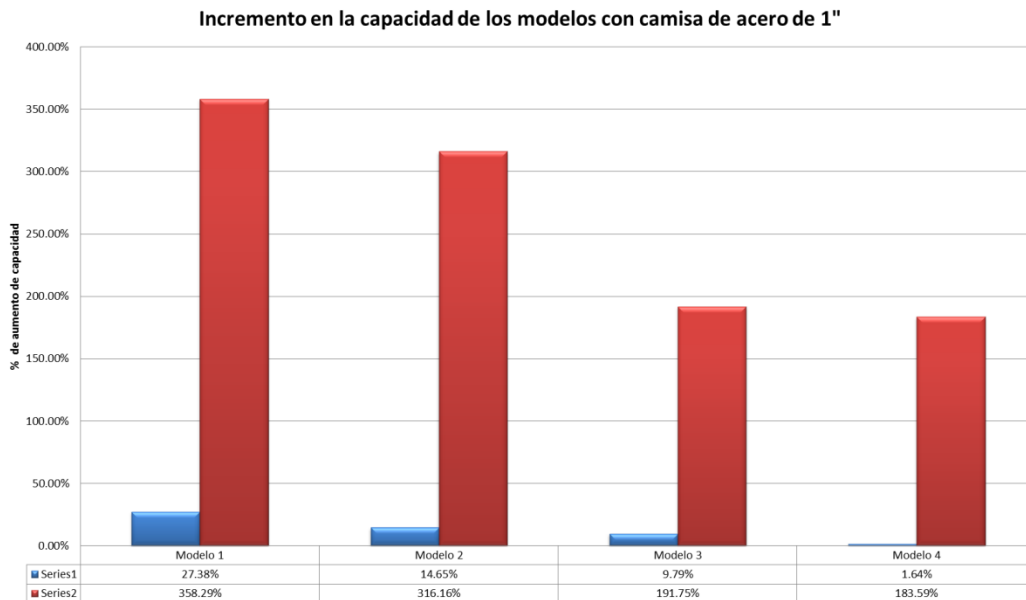


Figura IV-11 Incremento en la capacidad de los modelos con camisa de 1".





#### IV.4. Puntos De Desempeño En Los Modelos Analíticos

Los puntos de desempeño se localizan en la intersección del espectro de capacidad y el espectro de demanda reducido por el amortiguamiento equivalente como se ve en la Figura IV-1. Los valores de los puntos de desempeño se obtuvieron para cada uno de los modelos, así como para cada uno de los acelerogramas considerados como demanda sísmica, aquí se incluyen los acelerogramas escalados a diferentes periodos de retorno. El objetivo de escalar los acelerogramas es que los puentes de estudio quedaran sometidos a diferentes niveles de excitación que causaran diferentes estados de daños en sus pilas. De esta manera se obtuvo la base de datos que está conformada por el valor medio del desempeño sísmico de los puentes ante un conjunto de escenarios, con base en las cuales se definieron densidades de probabilidad que permitan estimar la probabilidad de alcanzar o exceder un estado límite de daño.

La base de datos se clasificó como función de dos parámetros ingenieriles conocidos con los nombres de distorsión angular o Drift ( $\theta$ ), en la Tabla IV-II se enlistan estos datos; y el segundo corresponde a la ductilidad de curvatura ( $\mu_{\phi}$ ), valores que se presentan en la Tabla IV-III. Como función de esta base de datos es que se obtuvieron las curvas de fragilidad correspondientes a cada caso de estudio.





Tabla IV-II Parámetros para calcular la distorsión angular o drift ( $\theta$ )

Casing	Espesor de Camisa	Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )	Modelos								
			Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4		
			D (cm)	H (cm)	D (cm)	H (cm)	D (cm)	H (cm)	D (cm)	H (cm)	
0	Sin refuerzo	153	3.52	600	5.93	1000	0.86	600	2.20	1000	
		322	6.12		14.79		3.16		5.54		
		534	9.83		23.49		4.21		7.53		
		1191	24.54		55.83		7.98		20.50		
	3/8"	153	3.78		6.78		0.79		2.21		
		322	6.14		14.36		3.08		5.45		
		534	9.62		21.48		4.39		7.28		
		1191	26.12		50.48		9.01		20.52		
	1/2"	153	3.78		6.79		0.78		2.20		
		322	6.14		14.28		2.99		5.45		
		534	9.65		21.29		4.25		7.39		
		1191	26.21		49.88		8.53		20.58		
	5/8"	153	3.79		6.71		0.78		2.21		
		322	6.16		13.94		2.96		5.47		
		534	9.67		20.78		4.22		7.45		
		1191	26.26		48.80		8.49		20.60		
	3/4"	153	3.79		6.62		0.76		2.21		
		322	6.17		13.79		2.82		5.47		
		534	9.67		21.05		4.02		7.43		
		1191	26.28		51.65		7.90		20.60		
	1"	153	3.79		6.73		0.79		2.21		
		322	6.20		13.97		3.00		5.45		
		534	9.74		21.09		4.26		7.37		
		1191	26.39		51.17		8.50		20.60		
	1	3/8"	153		2.54		5.25		0.20		1.08
			322		4.59		10.46		0.31		2.37
			534		7.37		12.19		0.77		3.05
			1191		14.39		16.10		1.73		10.36
1/2"		153	2.46	4.91	0.18	0.98					
		322	4.41	9.95	0.28	2.15					
		534	7.25	11.53	0.70	2.55					
		1191	14.51	16.03	1.16	9.04					
5/8"		153	2.32	0.05	0.16	0.90					
		322	4.20	0.10	0.26	1.97					
		534	7.09	0.11	0.64	2.35					
		1191	13.95	0.12	1.05	7.85					
3/4"		153	1.92	4.55	0.15	0.84					
		322	3.68	9.22	0.24	1.83					
		534	6.64	10.73	0.59	2.18					
		1191	13.99	14.23	0.98	6.85					
1"		153	1.59	4.24	0.13	0.73					
		322	3.15	8.90	0.21	1.59					
		534	5.83	10.32	0.51	1.89					
		1191	14.29	14.24	0.85	4.83					





Tabla IV-III Parámetros para calcular la ductilidad de curvatura ( $\mu_{\phi}$ )

Casing	Espesor de Camisa	Aceleración (cm/s <sup>2</sup> )	Modelos							
			Modelo 1		Modelo 2		Modelo 3		Modelo 4	
			$\phi_y$	$\phi_{max}$	$\phi_y$	$\phi_{max}$	$\phi_y$	$\phi_{max}$	$\phi_y$	$\phi_{max}$
0	Sin refuerzo	153	0.0039780	0.0072295	0.0033670	0.0044594	0.0009843	0.0017149	0.0009436	0.0014793
		322		0.0119735		0.0104233		0.0048201		0.0029524
		534		0.0213313		0.0170372		0.0068297		0.0049611
		1191		0.0522322		0.0442181		0.0137969		0.0129237
	3/8"	153	0.0040100	0.0073809	0.0034600	0.0042463	0.0009922	0.0014023	0.0009481	0.0016211
		322		0.0121928		0.0136161		0.0044778		0.0031914
		534		0.0207110		0.0236135		0.0069382		0.0052103
		1191		0.0596554		0.0623499		0.0173766		0.0198915
	1/2"	153	0.0039980	0.0070735	0.0034520	0.0041897	0.0009932	0.0011876	0.0009517	0.0016437
		322		0.0121031		0.0135846		0.0044926		0.0031950
		534		0.0204006		0.0232412		0.0070199		0.0052139
		1191		0.0593230		0.0637355		0.0157689		0.0214295
5/8"	153	0.0039890	0.0071288	0.0039890	0.0041731	0.0039890	0.0011883	0.0039890	0.0016434	
	322		0.0121277		0.0132838		0.0041028		0.0032557	
	534		0.0203649		0.0220175		0.0068227		0.0055589	
	1191		0.0596543		0.0600717		0.0155664		0.0204015	
3/4"	153	0.0039810	0.0070029	0.0034410	0.0042904	0.0009915	0.0011896	0.0009529	0.0016435	
	322		0.0120764		0.0135530		0.0039629		0.0032550	
	534		0.0202624		0.0234865		0.0065381		0.0055571	
	1191		0.0592689		0.0657852		0.0136695		0.0206485	
1"	153	0.0040450	0.0071956	0.0034330	0.0042270	0.0009946	0.0011963	0.0009946	0.0016845	
	322		0.0123687		0.0134636		0.0040207		0.0032942	
	534		0.0206582		0.0229970		0.0066433		0.0053630	
	1191		0.0599316		0.0646245		0.0146030		0.0206996	
1	3/8"	153	0.0022840	0.0029300	0.0020130	0.0022746	0.0006029	0.0006029	0.0005821	0.0005821
		322		0.0049242		0.0045691		0.0006029		0.0005821
		534		0.0119548		0.0063343		0.0006029		0.0008225
		1191		0.0308227		0.0126516		0.0018465		0.0089991
	1/2"	153	0.0022640	0.0030844	0.0020380	0.0023558	0.0006115	0.0006115	0.0005888	0.0005888
		322		0.0051572		0.0041001		0.0006115		0.0005888
		534		0.0117901		0.0057415		0.0006115		0.0005888
		1191		0.0305707		0.0109217		0.0006115		0.0071066
	5/8"	153	0.0022470	0.0030130	0.0022470	0.0023656	0.0022470	0.0006158	0.0022470	0.0005945
		322		0.0047664		0.0039139		0.0006158		0.0005945
		534		0.0113542		0.0057617		0.0006158		0.0005945
		1191		0.0288764		0.0098967		0.0006158		0.0059422
	3/4"	153	0.0022330	0.0022330	0.0020180	0.0024676	0.0006227	0.0006227	0.0005997	0.0005997
		322		0.0039405		0.0043105		0.0006227		0.0005997
		534		0.0100634		0.0057310		0.0006227		0.0005997
		1191		0.0286203		0.0093387		0.0006227		0.0037451
	1"	153	0.0022080	0.0022080	0.0020010	0.0025714	0.0006313	0.0006313	0.0006083	0.0006083
		322		0.0037004		0.0050383		0.0006313		0.0006083
		534		0.0085666		0.0059856		0.0006313		0.0006083
		1191		0.0283562		0.0097632		0.0006313		0.0023344





## CURVAS DE FRAGILIDAD DE LOS MODELOS DE PUENTES

### V.1. Introducción

**E**l conocer el estado de daño en que se encuentra una estructura después de verse sujeta a la acción de un sismo, es un aspecto muy importante de conocer para elegir el método de refuerzo más adecuado. Una de las herramientas a las que se recurre con mayor frecuencia para conocer este estado de daño son las curvas de fragilidad, éstas pueden ser definidas por medio de diversos parámetros de interés. En este trabajo se utilizaron dos parámetros para definir las curvas de fragilidad, la distorsión angular o drift ( $\theta$ ) y la ductilidad de curvatura ( $\mu_\phi$ ).

### V.2. Estados De Daño

El estado de daño es el resultado que se tiene en una estructura después de la ocurrencia de un evento sísmico, es decir, nos ofrecen una medida cuantitativa y cualitativa de los daños que sufrieron los elementos que la componen. Los estados de daño se han clasificado con base en diferentes parámetros, buscando que éstos tengan un significado ingenieril. En este trabajo se presentan dos parámetros para describir los estados de daño siendo éstos la distorsión angular o drift ( $\theta$ ) y la ductilidad de curvatura ( $\mu_\phi$ ).

#### V.2.1. Distorsión Angular O Drift

La distorsión angular es la relación que existe entre el desplazamiento en la parte superior de la columna y la altura de ésta. Se calcula con la ecuación V-1 y en la Tabla V-I se muestran los intervalos de valores que definen los estados límite de daño de esta clasificación.





$$\theta = \frac{D}{H}$$

V-1

donde:

$\theta$  =distorsión angular o drift.

D = es el desplazamiento en la parte superior de la columna.

H = altura de la columna.

Los valores de D y H se pueden visualizar esquemáticamente en la Figura V-1.

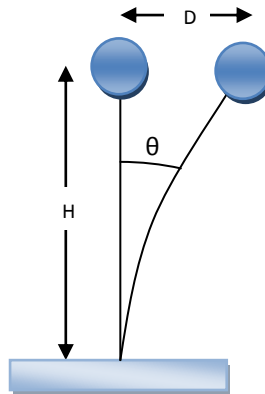


Figura V-1 Datos necesarios para calcular la distorsión angular o drift.

Tabla V-I Intervalos para los estados de daño para el parámetro de distorsión angular o drift ( $\theta$ ).  
(Akbari, 2010)

Estado De Daño	Descripción	Distorsión Angular/Drift
Casi Ningún Daño	Primera fluencia	$\theta < 0.005$
Daños Ligeros	Grietas y desprendimientos	$0.005 < \theta < 0.007$
Daño Moderado	Perdida de sección	$0.007 < \theta < 0.015$
Daño Extensivo	Colapso incipiente de la columna	$0.015 < \theta < 0.050$
Daño Completo	Colapso de la Columna	$0.050 < \theta$





### V.2.2. Ductilidad De Curvatura

La ductilidad de curvatura relaciona la ductilidad máxima y la curvatura de fluencia. Se calcula con la ecuación V-2 y en la Tabla V-II se muestran los intervalos que definen los estados límite de daño de esta clasificación.

$$\mu_{\phi} = \frac{\phi_m}{\phi_y} \tag{V-2}$$

donde:

$\mu_{\phi}$  = ductilidad de curvatura

$\phi_m$  = es la curvatura máxima que se tiene en la sección transversal del elemento.

$\phi_y$  = es la curvatura a la fluencia.

Tabla V-II Intervalos para los estados de daño para el parámetro de ductilidad de curvatura ( $\mu_{\phi}$ ).  
(Priestley, et al., 1996)

Estado De Daño	Descripción	Ductilidad de Curvatura
Despreciable	Ningún daño	$\mu_{\phi} < 0.005$
Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial	$0.005 < \mu_{\phi} < 0.007$
Moderado	Daño en los costados	$0.007 < \mu_{\phi} < 0.015$
Severo	Daños principalmente en lados opuestos	$0.015 < \mu_{\phi} < 0.050$
Colapso	Daños en toda la sección transversal	$0.050 < \mu_{\phi}$

### V.3. Curvas De Fragilidad

Las curvas de fragilidad representan la probabilidad de que una estructura alcance o exceda determinado estado límite de daño para un conjunto de escenarios representados por su respuesta ante diversos niveles de intensidades sísmicas. Debido a la importancia de las curvas de fragilidad, se han desarrollado varias





metodologías para su obtención. Algunas de estas metodologías se pueden encontrar en Padgett (2007) y se mencionan a continuación:

- *Curvas de fragilidad empíricas*: el desarrollo de este tipo de curvas depende principalmente de la cantidad de información con que se cuente. Por un lado la información veraz de los daños que han sufrido los puentes después de un sismo, y por otro lado una base de datos de los diferentes sismos que han ocurrido en la zona de análisis. Además, para realizar este tipo de curvas de fragilidad es necesario conocer la opinión de expertos en la materia. La información que se obtiene de este tipo de curvas de fragilidad es el nivel de daño dada una aceleración máxima con base en los daños causados por eventos sísmicos pasados.
- *Curvas de fragilidad analíticas*: éstas se desarrollan cuando no se cuenta con una gran cantidad de información, y toman como base el principio de que los niveles de daño están relacionados a la capacidad estructural, y que la intensidad de los sismos están relacionados a la demanda estructural. Así, el modelo usado para evaluar la fragilidad en estructuras como puentes consiste en estimar la probabilidad de que la demanda exceda la capacidad estructural, lo cual se expresa con la ecuación V-3.

$$P_f = P \left[ \frac{D}{C} \geq 1 \right] \quad \text{V-3}$$

donde:

$P_f$  = es la probabilidad que se exceda un estado límite de daño.

D = es la demanda de la estructura.

C = es la capacidad de la estructura.

La manera de obtener las curvas de fragilidad consiste en calcular la respuesta de un grupo significativo de estructuras ante diversos niveles de demanda sísmica y diferentes características de refuerzo.







### V.3.1. Curvas De Fragilidad De Los Modelos Analíticos

El tipo de curvas de fragilidad que se desarrollaron en este trabajo fueron analíticas. Esto fue debido a que no se contaba con una gran base de datos experimentales de puentes. Como se explicó en la sección anterior este método se basa en la determinación de la probabilidad de que la demanda exceda la capacidad estructural. A su vez la demanda y la capacidad estructural no son variables deterministas sino que ambas

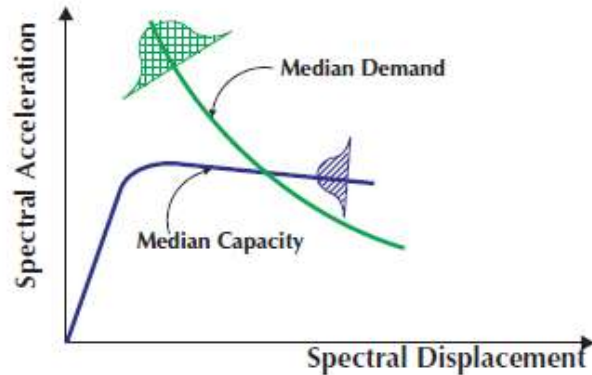


Figura V-2 Variabilidad en la demanda y la capacidad esperada. (Mander, 1999)

son caracterizadas como variables aleatorias, por lo que cada una de ellas se representa mediante una distribución de probabilidad como se puede observar en la Figura V-2. Lo anterior concluye que el valor representativo no corresponde a un valor único o exacto, sino que más bien se presenta todo un conjunto de posibles soluciones.

Como la demanda y la capacidad son variables aleatorias que aproximadamente siguen una distribución normal o log-normal y atendiendo al teorema de límite central, el resultado final será definido por medio de una función de distribución de probabilidad log-normal, la cual está definida por medio de la ecuación V-4. Como resultado, las curvas de fragilidad serán definidas por medio de una función de densidad de probabilidad acumulada log-normal como la que se muestra en la Figura V-3; y cuya ecuación es la V-5.

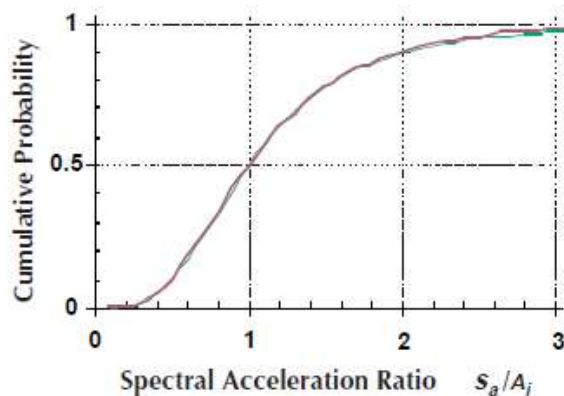


Figura V-3 Función de densidad de probabilidad acumulada log-normal. (Mander, 1999)





$$f(x; \lambda, \xi) = \frac{1}{\xi x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{[\ln(x) - \lambda]^2}{2\xi^2}}$$

V-4

donde:

$x$  = es una variable aleatoria.

$\lambda$  = es el valor de la media del logaritmo de la variable.

$\xi$  = es el valor de la desviación estándar del logaritmo de la variable.

$$F(x) = \Phi\left(\frac{\ln x}{\xi}\right) \quad x \geq 0; \xi > 0$$

V-5

donde:

$x$  = es una variable aleatoria.

$\xi$  = es el valor de la desviación estándar del logaritmo de la variable.

En este trabajo  $x$  representa el parámetro del estado de daño, el cual puede ser el drift ( $\theta$ ) o la ductilidad de curvatura ( $\mu_\phi$ ). El valor de  $\lambda$  se estimó aplicando el método de máxima verosimilitud al conjunto de datos obtenidos de los análisis realizados a los modelos de estudio (Apéndices A y B). El valor de  $\xi$  es un valor que representa la dispersión del comportamiento de las variables aleatorias, en este caso está relacionada a la base de datos utilizadas para determinar el nivel de desempeño de las estructuras. Este parámetro ha sido calibrado por Mander (1999) mediante una gran cantidad de estudios experimentales y analíticos que permitieron obtener un valor representativo de la variabilidad de la capacidad de pilas de concreto reforzado. De los resultados de esos trabajos de investigación se recomienda considerar este parámetro,  $\xi$ , como 0.6. Debido a que en este trabajo no se cuenta con una gran base de datos analíticos y ninguno experimental se optó por el asumir este valor.





### V.3.2. Curvas De Fragilidad Como Función De La Ductilidad De Curvatura ( $\mu_\phi$ )

El parámetro usado para representar el estado límite de daño fue la ductilidad de curvatura ( $\mu_\phi$ ). Para desarrollar las curvas de fragilidad como función de este parámetro es necesario conocer los valores de parámetros que definen la relación momento-curvatura ( $\phi_y$  y  $\phi_{max}$ ) obtenidos de los análisis efectuados a los modelos en estudio para calcular la ductilidad de curvatura. Una vez estimados, se procede a calcular los parámetros  $\lambda$  y  $\xi$ , valores necesarios para poder definir la función de densidad de probabilidad acumulada log-normal. Estos valores se presentan en la Tabla V-III.

Tabla V-III Parámetros que definen las curvas de fragilidad en función de la ductilidad de curvatura ( $\mu_\phi$ ).

M1-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_y$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu_\phi$	$\lambda = f(\mu_\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.003978	0.0072295	76.52	1.8	0.417394	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.0119735		3.0	0.9219174	0.6	Moderado	Daño en los costados
534		0.0213313		5.4	1.4993968	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.0522322		13.1	2.3949192	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Como se observa en la Tabla V-III cada uno de los modelos fueron expuestos a una serie de espectros de respuesta, los cuales a su vez fueron escalados a cuatro diferentes aceleraciones con el objetivo de producir en los modelos base (sin encamisado de acero) cuatro estados límite de daño, según la clasificación de la ductilidad de curvatura (ligero, moderado, severo y colapso), para con ello cuantificar el beneficio que se tiene en la reducción de la probabilidad de falla con el incremento del espesor de las placas de acero.

A continuación se presentan las curvas de fragilidad obtenidas en función de la ductilidad de curvatura y su respectiva tabla de la probabilidad de falla que tienen cada uno de los casos. Cabe señalar que en todas las tablas en el título de las columnas se presenta al lado de la aceleración una letra, indicando el estado límite de daño que se alcanzó ante la demanda en estudio (D = despreciable, L = Ligero, M = Moderado, S = Severo y C = Colapso).



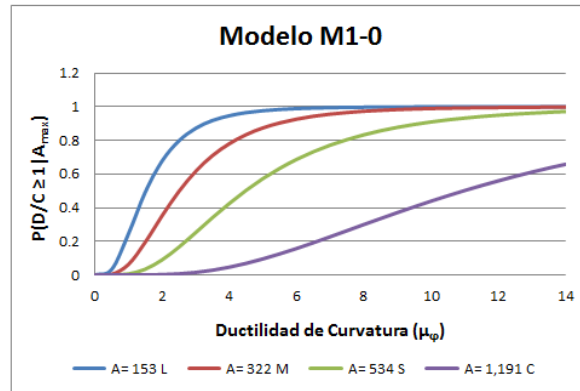


Figura V-4 Curva de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 1 para el caso M1-0.

Tabla V-IV Probabilidad de falla del modelo 1 para el caso M1-0

Probabilidades de falla del modelo 1					
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M1-0			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 S	A= 1,191 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.24332	0.06220	0.00623	0.00003
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.62857	0.55360	0.24585	0.01533
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.10464	0.25827	0.32068	0.07988
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.02330	0.12284	0.38937	0.51631
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00017	0.00309	0.03787	0.38844

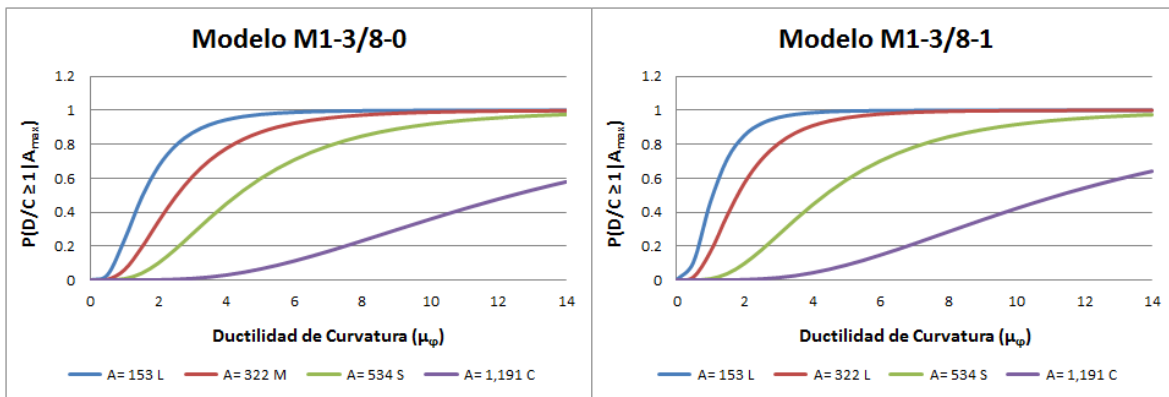


Figura V-5 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1.

Tabla V-V Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1

Probabilidades de falla del modelo 1									
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M1-3/8-0				M1-3/8-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 S	A= 1,191 C	A= 153 L	A= 322 L	A= 534 S	A= 1,191 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.23674	0.06016	0.00742	0.00001	0.45417	0.16344	0.00697	0.00003
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.63066	0.54918	0.26503	0.00891	0.50274	0.63907	0.25814	0.01366
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.10793	0.26121	0.32469	0.05567	0.03797	0.15311	0.32340	0.07405
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.02449	0.12620	0.36987	0.46540	0.00511	0.04388	0.37682	0.50621
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00019	0.00325	0.03300	0.47000	0.00002	0.00049	0.03467	0.40605



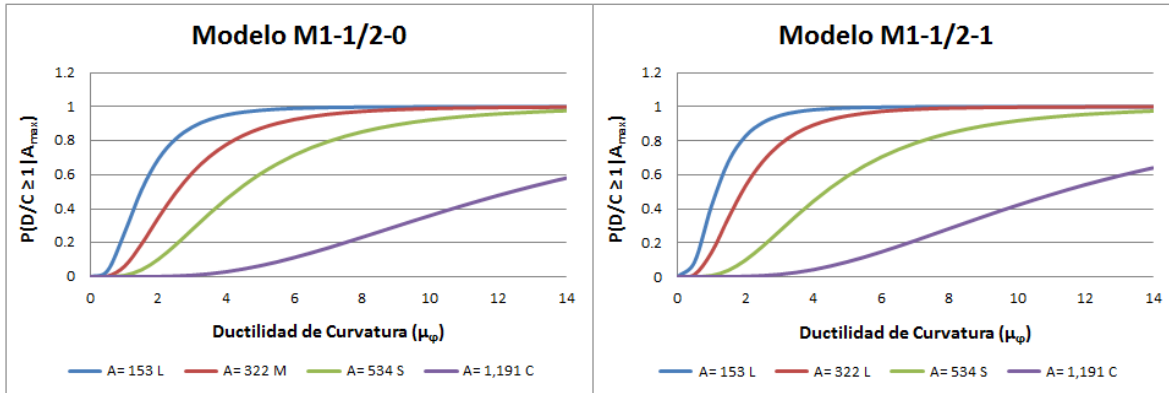


Figura V-6 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1.

Tabla V-VI Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-1/2-0 y M1-1/2-1

		Probabilidades de falla del modelo 1							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M1-1/2-0				M1-1/2-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 S	A= 1,191 C	A= 153 L	A= 322 L	A= 534 S	A= 1,191 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.25755	0.06104	0.00784	0.00001	0.41473	0.14184	0.00714	0.00003
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.62347	0.55111	0.27135	0.00902	0.53218	0.63421	0.26075	0.01362
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.09788	0.25994	0.32574	0.05612	0.04627	0.17028	0.32391	0.07393
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.02096	0.12474	0.36354	0.46657	0.00679	0.05298	0.37418	0.50598
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00015	0.00318	0.03154	0.46829	0.00002	0.00068	0.03402	0.40643

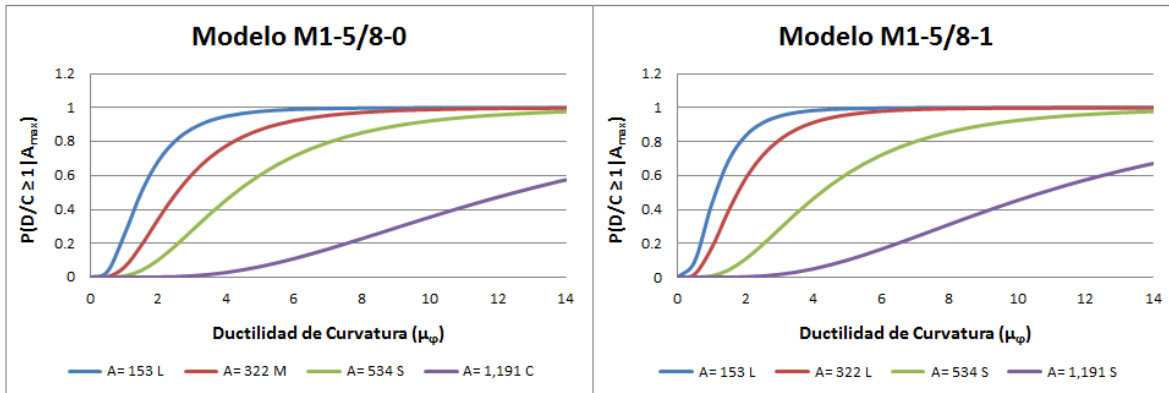


Figura V-7 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1.

Tabla V-VII Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 1							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M1-5/8-0				M1-5/8-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 S	A= 1,191 C	A= 153 L	A= 322 L	A= 534 S	A= 1,191 S
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.25217	0.06018	0.00782	0.00001	0.42507	0.17021	0.00820	0.00004
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.62548	0.54922	0.27108	0.00871	0.52464	0.63973	0.27649	0.01677
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.10038	0.26118	0.32570	0.05479	0.04396	0.14816	0.32650	0.08465
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.02181	0.12617	0.36380	0.46302	0.00630	0.04145	0.35841	0.52376
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00015	0.00325	0.03160	0.47347	0.00002	0.00045	0.03040	0.37479



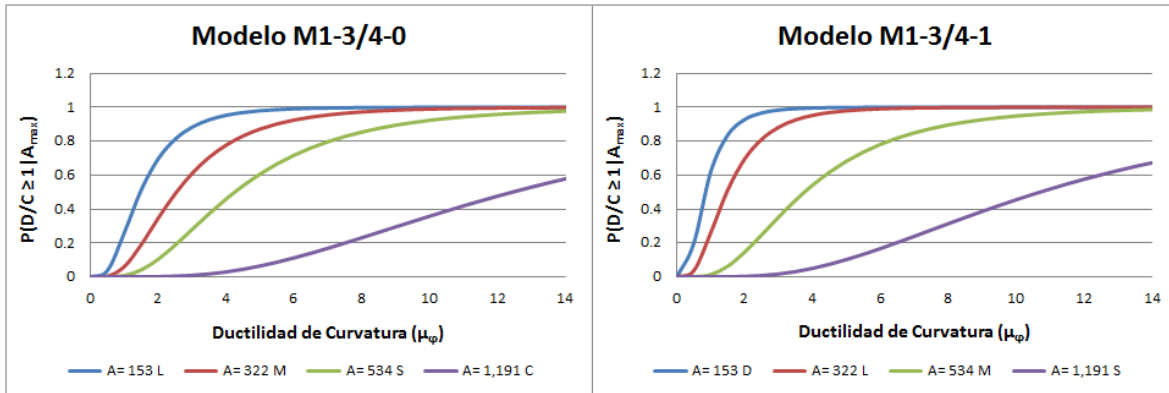


Figura V-8 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 1 para los casos M1-3/4-0 y M1-3/4-1.

Tabla V-VIII Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 1							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M1-3/4-0				M1-3/4-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 S	A= 1,191 C	A= 153 D	A= 322 L	A= 534 M	A= 1,191 S
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.26066	0.06063	0.00793	0.00001	0.61791	0.25895	0.01358	0.00004
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.62226	0.55020	0.27268	0.00888	0.36554	0.62293	0.33905	0.01695
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.09646	0.26053	0.32594	0.05554	0.01511	0.09724	0.32932	0.08525
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.02048	0.12542	0.36221	0.46505	0.00143	0.02074	0.29863	0.52465
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00014	0.00321	0.03124	0.47051	0.00000	0.00014	0.01943	0.37311

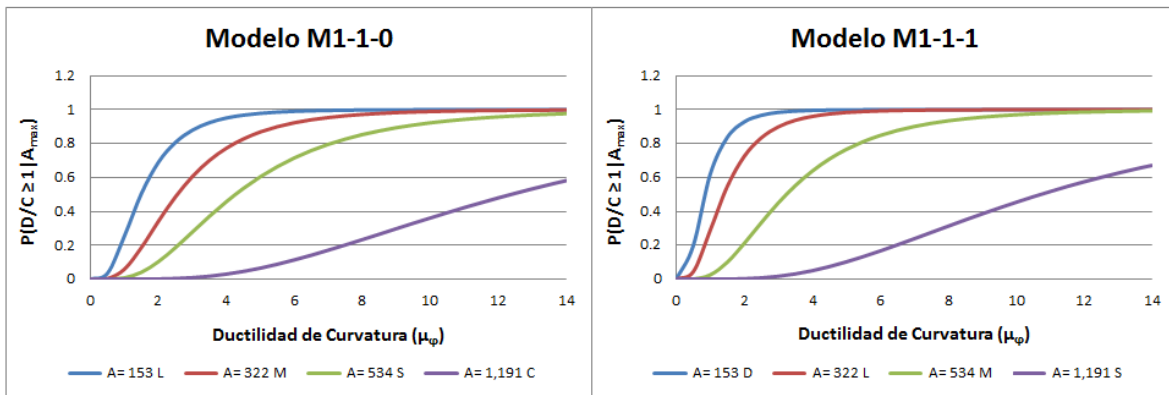


Figura V-9 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 1 para los casos M1-1-0 y M1-1-1.

Tabla V-IX Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-1-0 y M1-1-1

		Probabilidades de falla del modelo 1							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M1-1-0				M1-1-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 S	A= 1,191 C	A= 153 D	A= 322 L	A= 534 M	A= 1,191 S
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.25463	0.05905	0.00781	0.00001	0.61791	0.28755	0.02502	0.00004
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.62458	0.54668	0.27089	0.00908	0.36554	0.61049	0.42381	0.01681
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.09922	0.26282	0.32567	0.05637	0.01511	0.08504	0.31626	0.08480
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.02142	0.12810	0.36399	0.46723	0.00143	0.01682	0.22462	0.52399
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00015	0.00334	0.03164	0.46731	0.00000	0.00010	0.01030	0.37436





El modelo 1 representa puentes con longitud de claros de 20 m, altura de columnas de 6 m, y subestructura formada por una columna con diámetro de 1.15 m. Como se puede ver en la Figura V-4 el modelo M1-0 (sin refuerzo) fue sujeto a cuatro diferentes aceleraciones con el objetivo de que éste alcanzara los cuatro estados límite de daño. Una de las observaciones que se puede ver en las gráficas donde el casing es cero es que el refuerzo no está presentando ninguna ventaja para ningún espesor de placa en lo que respecta a reducir la probabilidad de falla. Además, esto se comprueba observando las tablas V-IV a V-IX donde se presenta la probabilidad de falla. Por otro lado, al comparar el modelo con los diferentes espesores de placa para cuando el casing es cero o uno, se puede ver claramente que para el casing con valor uno el refuerzo hace que las curvas de fragilidad vayan aumentando su pendiente, lo cual indica que efectivamente la probabilidad de falla va disminuyendo con el aumento de espesor de la placa de refuerzo. Es decir, para una misma aceleración el modelo ya no alcanza el mismo nivel de daño. Por ejemplo, en la Tabla V-V se puede ver que mientras que para el M1-3/8-0 una aceleración de  $322 \text{ cm/s}^2$  ocasiona un daño moderado, para el M1-3/8-1 ocasiona un daño ligero.

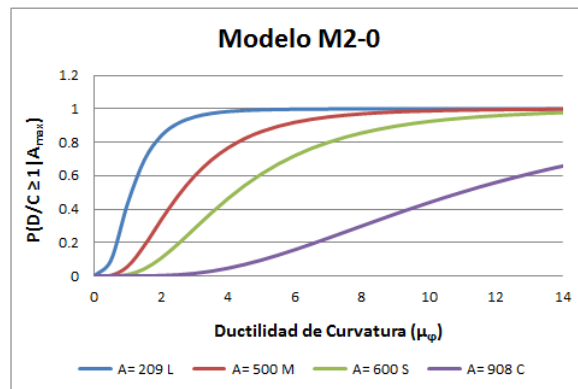


Figura V-10 Curva de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 2 para el caso M2-0.

Tabla V-X Probabilidad de falla del modelo 2 para el caso M2-0

		Probabilidades de falla del modelo 2			
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M2-0			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 S	A= 908 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.43317	0.05667	0.00815	0.00003
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.51864	0.54113	0.27576	0.01532
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.04222	0.26633	0.32639	0.07984
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.00595	0.13232	0.35914	0.51625
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00002	0.00356	0.03056	0.38856



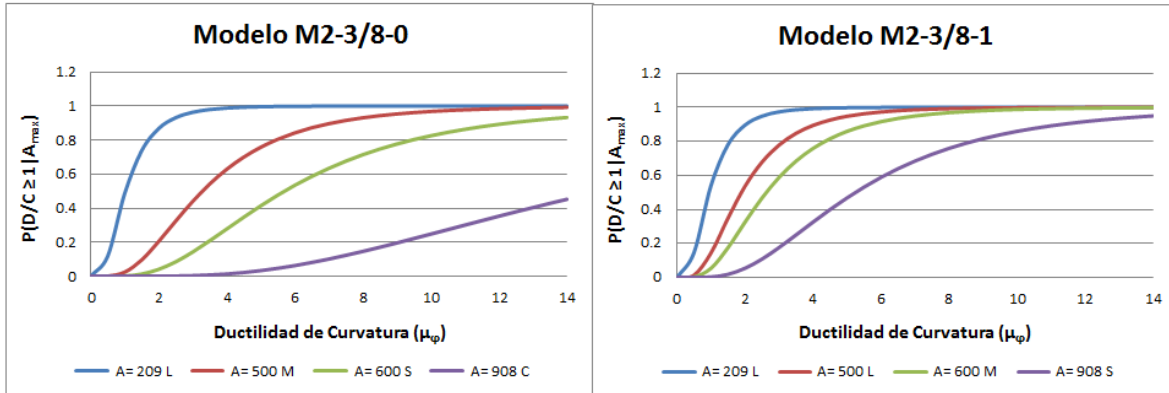


Figura V-11 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 2 para los casos M2-3/8-0 y M2-3/8-1.

Tabla V-XI Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-3/8-0 y M2-3/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M2-3/8-0				M2-3/8-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 S	A= 908 C	A= 209 L	A= 500 L	A= 600 S	A= 908 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.48353	0.02367	0.00186	0.00000	0.53838	0.14318	0.14318	0.00286
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.47972	0.41581	0.14047	0.00359	0.43465	0.63465	0.63465	0.17266
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.03262	0.31827	0.27118	0.02953	0.02424	0.16915	0.16915	0.29212
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.00412	0.23128	0.50177	0.37040	0.00272	0.05235	0.05235	0.46701
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00001	0.01096	0.08472	0.59648	0.00001	0.00067	0.00067	0.06535

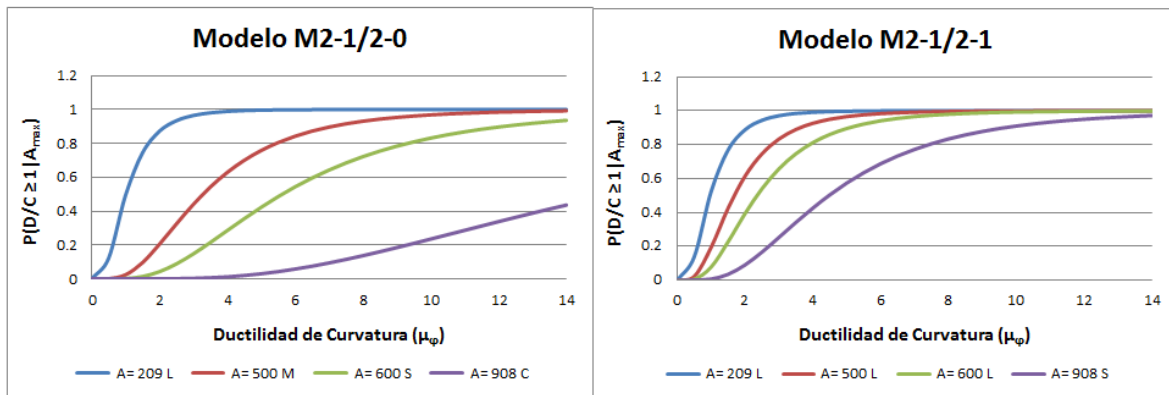


Figura V-12 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 2 para los casos M2-1/2-0 y M2-1/2-1.

Tabla V-XII Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-1/2-0 y M2-1/2-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M2-1/2-0				M2-1/2-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 S	A= 908 C	A= 209 L	A= 500 L	A= 600 S	A= 908 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.49090	0.02367	0.00200	0.00000	0.52332	0.19350	0.07690	0.00625
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.47381	0.41582	0.14549	0.00318	0.44727	0.63947	0.58028	0.24616
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.03137	0.31827	0.27486	0.02706	0.02635	0.13245	0.23829	0.32076
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.00390	0.23128	0.49639	0.35768	0.00306	0.03426	0.10233	0.38905
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00001	0.01096	0.08126	0.61207	0.00001	0.00033	0.00220	0.03779





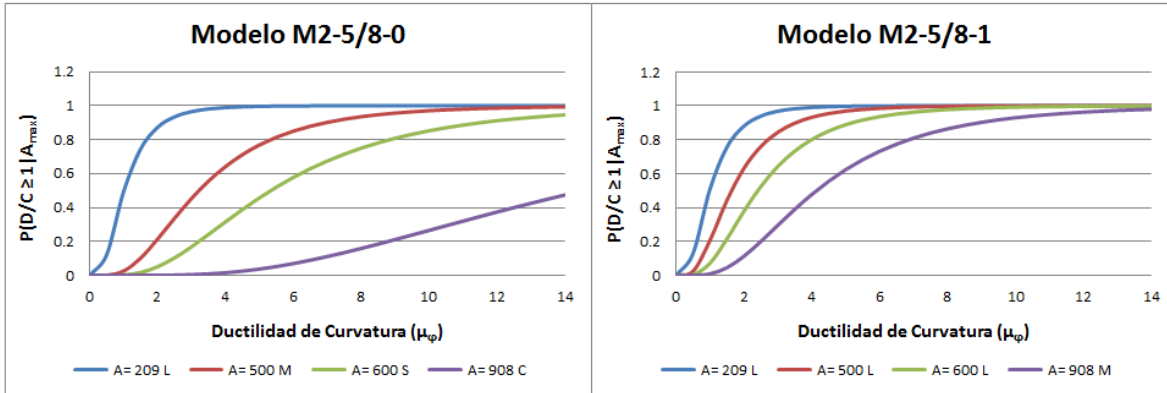


Figura V-13 Curvas de fragilidad por  $\mu_p$  del modelo 2 para los casos M2-5/8-0 y M2-5/8-1.

Tabla V-XIII Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-5/8-0 y M2-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M2-5/8-0				M2-5/8-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 S	A= 908 C	A= 209 L	A= 500 L	A= 600 S	A= 908 S
Despreciable	$\mu_p < 1$	0.49239	0.02565	0.00263	0.00000	0.50673	0.20544	0.07121	0.00893
Ligero	$1 < \mu_p < 3$	0.47261	0.42743	0.16590	0.00423	0.46096	0.63799	0.57093	0.28656
Moderado	$3 < \mu_p < 5$	0.03113	0.31529	0.28822	0.03318	0.02883	0.12512	0.24578	0.32773
Severo	$5 < \mu_p < 13$	0.00386	0.22162	0.47434	0.38764	0.00347	0.03116	0.10958	0.34848
Colapso	$13 < \mu_p$	0.00001	0.01001	0.06892	0.57494	0.00001	0.00028	0.00249	0.02829

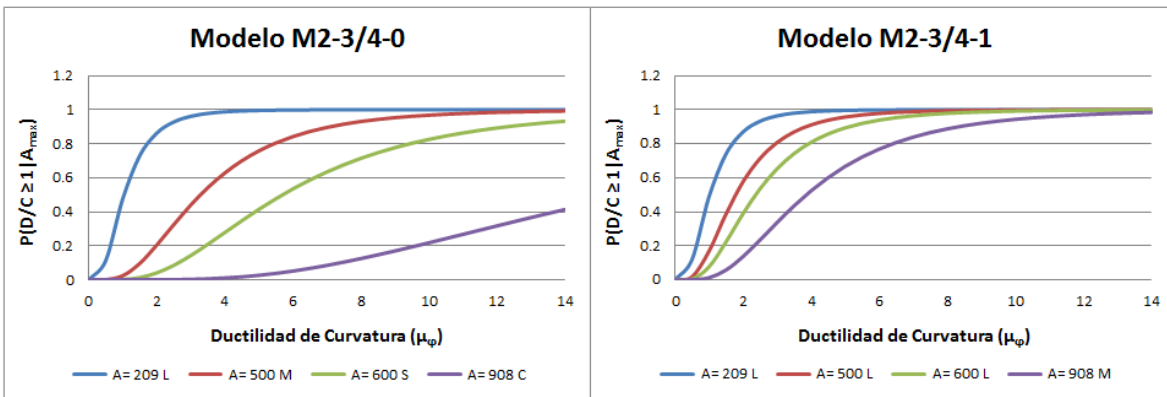


Figura V-14 Curvas de fragilidad por  $\mu_p$  del modelo 2 para los casos M2-3/4-0 y M2-3/4-1.

Tabla V-XIV Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-3/4-0 y M2-3/4-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M2-3/4-0				M2-3/4-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 S	A= 908 C	A= 209 D	A= 500 L	A= 600 M	A= 908 S
Despreciable	$\mu_p < 1$	0.47301	0.02359	0.00186	0.00000	0.48596	0.16730	0.07499	0.01212
Ligero	$1 < \mu_p < 3$	0.48806	0.41533	0.14043	0.00266	0.47778	0.63949	0.57726	0.32425
Moderado	$3 < \mu_p < 5$	0.03446	0.31839	0.27115	0.02381	0.03220	0.15027	0.24078	0.32966
Severo	$5 < \mu_p < 13$	0.00445	0.23169	0.50181	0.33940	0.00405	0.04248	0.10469	0.31236
Colapso	$13 < \mu_p$	0.00001	0.01101	0.08475	0.63413	0.00001	0.00047	0.00229	0.02161



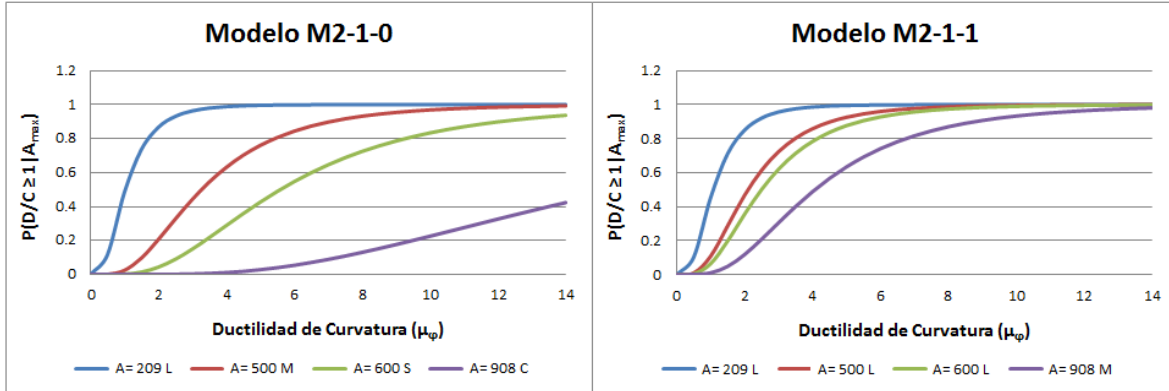


Figura V-15 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 2 para los casos M2-1-0 y M2-1-1.

Tabla V-XV Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-1-0 y M2-1-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M2-1-0				M2-1-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 S	A= 908 C	A= 209 D	A= 500 L	A= 600 M	A= 908 S
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.48134	0.02399	0.00205	0.00000	0.45303	0.10766	0.06348	0.00960
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.48146	0.41775	0.14738	0.00288	0.50361	0.61540	0.55628	0.29522
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.03299	0.31780	0.27621	0.02521	0.03819	0.20247	0.25645	0.32855
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.00419	0.22966	0.49435	0.34752	0.00515	0.07326	0.12080	0.34004
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00001	0.01080	0.08001	0.62438	0.00002	0.00120	0.00299	0.02660

El modelo 2 una geometría tipo definida por longitud de claros de 20 m, altura de columnas de 10 m y el diámetro de la columna de que forma parte de la subestructura es de 1.25 m. El modelo M2-0, el cual no tiene refuerzo fue inducido a los cuatro estados límite de daño como se puede ver en la Figura V-10. Al igual que para el modelo 1, los encamisados de acero con los diferentes espesores de placa donde el casing es cero no presentan beneficio alguno. Sin embargo, cuando el casing es uno presentan mejor comportamiento que para el modelo 1 ya que la pendiente de todas las curvas de los modelos aumenta, con lo cual se disminuye la probabilidad de alcanzar cierto estado límite de daño. Esto se comprueba observando las gráficas de las curvas de fragilidad y las tablas donde se presenta la probabilidad de falla. Un ejemplo de esto se puede ver en la Tabla V-XII donde para una aceleración de 500  $\text{cm/s}^2$  en el M2/1/2-0 ocurre un daño moderado mientras que para el M2-1/2-1 se alcanza un daño ligero.



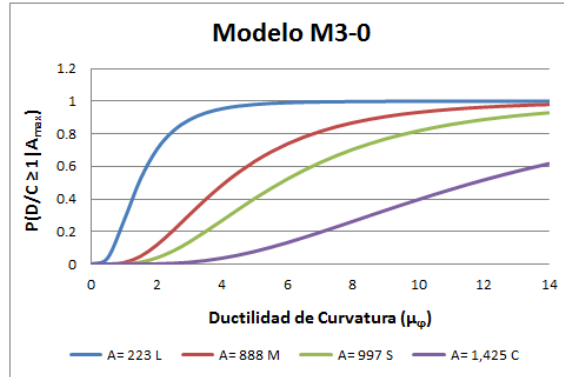


Figura V-16 Curva de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 3 para el caso M3-0.

Tabla V-XVI Probabilidad de falla del modelo 3 para el caso M3-0

		Probabilidades de falla del modelo 3			
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M3-0			
		A= 223 L	A= 888 M	A= 997 S	A= 1,425 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.26588	0.00945	0.00170	0.00002
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.62015	0.29325	0.13451	0.01160
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.09413	0.32838	0.26658	0.06647
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.01971	0.34195	0.50812	0.49116
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00013	0.02698	0.08909	0.43075

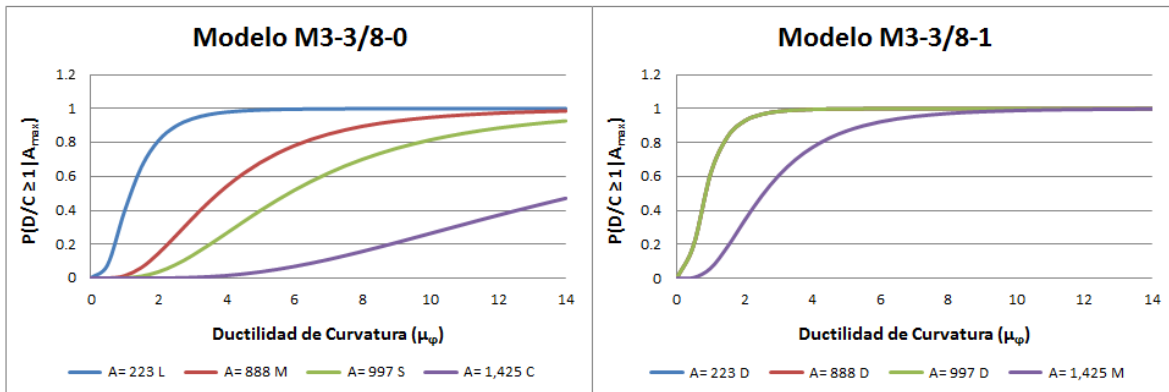


Figura V-17 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 3 para los casos M3-3/8-0 y M3-3/8-1.

Tabla V-XVII Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-3/8-0 y M3-3/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 3							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M3-3/8-0				M3-3/8-1			
		A= 223 L	A= 888 M	A= 997 S	A= 1,425 C	A= 223 L	A= 888 L	A= 997 S	A= 1,425 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.39107	0.01350	0.00163	0.00000	0.61791	0.61791	0.61791	0.05873
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.54890	0.33826	0.13177	0.00413	0.36554	0.36554	0.36554	0.54596
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.05197	0.32935	0.26439	0.03265	0.01511	0.01511	0.01511	0.26329
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.00804	0.29935	0.51101	0.38525	0.00143	0.00143	0.00143	0.12865
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00003	0.01954	0.09119	0.57796	0.00000	0.00000	0.00000	0.00337



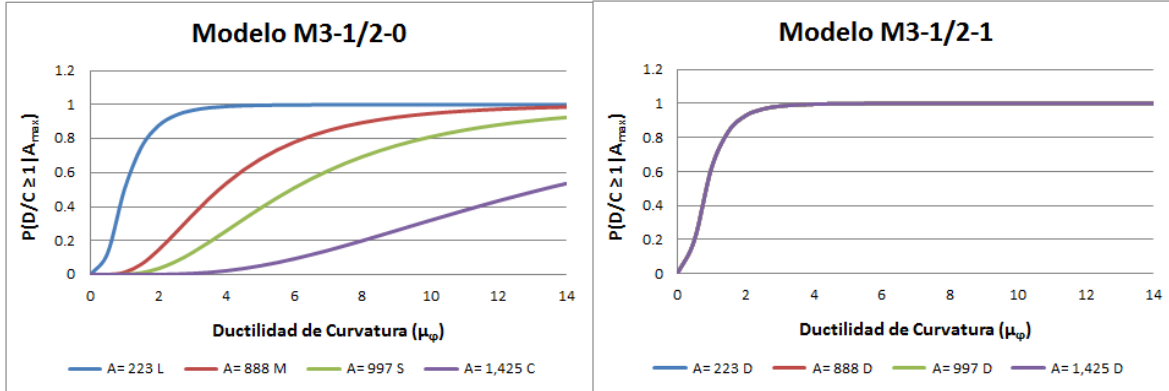


Figura V-18 Curvas de fragilidad por  $\mu_p$  del modelo 3 para los casos M3-1/2-0 y M3-1/2-1.

Tabla V-XVIII Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-1/2-0 y M3-1/2-1

		Probabilidades de falla del modelo 3							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M3-1/2-0				M3-1/2-1			
		A= 223 L	A= 888 M	A= 997 S	A= 1,425 C	A= 223 L	A= 888 L	A= 997 S	A= 1,425 C
Despreciable	$\mu_p < 1$	0.50080	0.01337	0.00154	0.00001	0.61791	0.61791	0.61791	0.61791
Ligero	$1 < \mu_p < 3$	0.46580	0.33698	0.12806	0.00661	0.36554	0.36554	0.36554	0.36554
Moderado	$3 < \mu_p < 5$	0.02977	0.32940	0.26133	0.04538	0.01511	0.01511	0.01511	0.01511
Severo	$5 < \mu_p < 13$	0.00362	0.30053	0.51492	0.43476	0.00143	0.00143	0.00143	0.00143
Colapso	$13 < \mu_p$	0.00001	0.01972	0.09415	0.51324	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

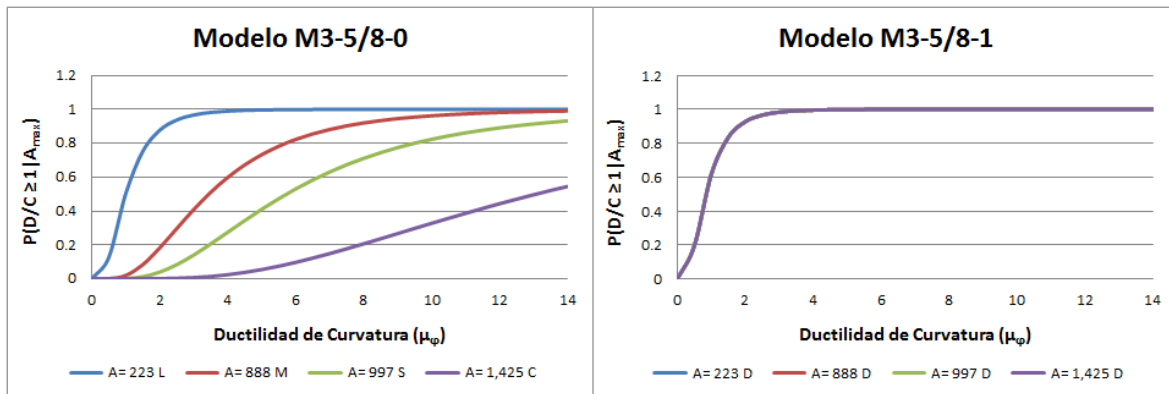


Figura V-19 Curvas de fragilidad por  $\mu_p$  del modelo 3 para los casos M3-5/8-0 y M3-5/8-1.

Tabla V-XIX Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-5/8-0 y M3-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 3							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M3-5/8-0				M3-5/8-1			
		A= 223 L	A= 888 M	A= 997 S	A= 1,425 C	A= 223 L	A= 888 L	A= 997 S	A= 1,425 S
Despreciable	$\mu_p < 1$	0.50095	0.01956	0.00180	0.00001	0.61791	0.61791	0.61791	0.61791
Ligero	$1 < \mu_p < 3$	0.46568	0.38878	0.13839	0.00705	0.36554	0.36554	0.36554	0.36554
Moderado	$3 < \mu_p < 5$	0.02974	0.32388	0.26960	0.04743	0.01511	0.01511	0.01511	0.01511
Severo	$5 < \mu_p < 13$	0.00362	0.25429	0.50399	0.44140	0.00143	0.00143	0.00143	0.00143
Colapso	$13 < \mu_p$	0.00001	0.01348	0.08621	0.50411	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



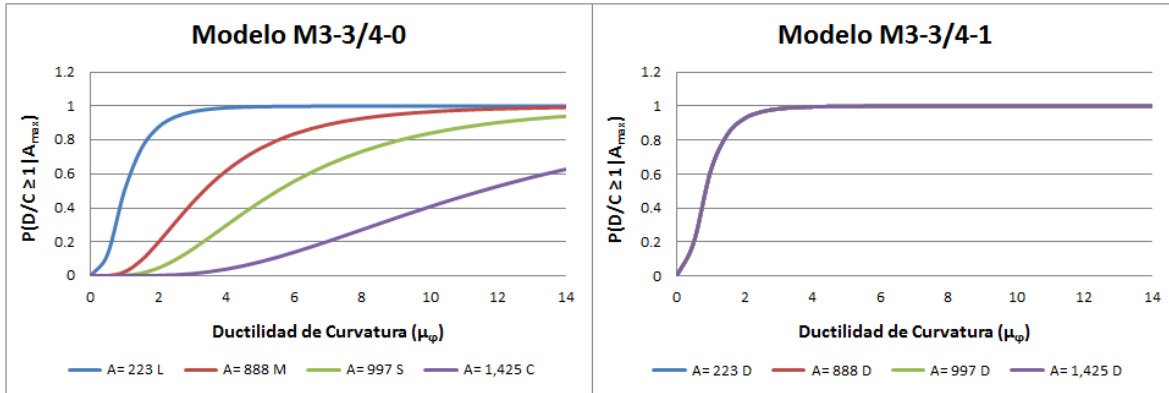


Figura V-20 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 3 para los casos M3-3/4-0 y M3-3/4-1.

Tabla V-XX Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-3/4-0 y M3-3/4-1

		Probabilidades de falla del modelo 3							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M3-3/4-0				M3-3/4-1			
		A= 223 L	A= 888 M	A= 997 S	A= 1,425 C	A= 223 D	A= 888 L	A= 997 M	A= 1,425 S
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.49857	0.02226	0.00223	0.00002	0.61791	0.61791	0.61791	0.61791
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.46761	0.40704	0.15339	0.01246	0.36554	0.36554	0.36554	0.36554
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.03012	0.32030	0.28033	0.06971	0.01511	0.01511	0.01511	0.01511
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.00368	0.23867	0.48788	0.49787	0.00143	0.00143	0.00143	0.00143
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00001	0.01173	0.07618	0.41993	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

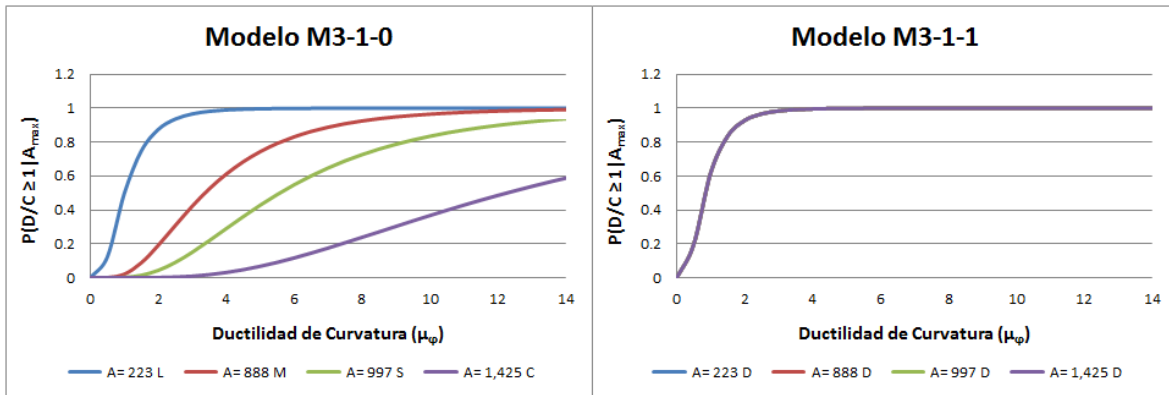


Figura V-21 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 3 para los casos M3-1-0 y M3-1-1.

Tabla V-XXI Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-1-0 y M3-1-1

		Probabilidades de falla del modelo 3							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M3-1-0				M3-1-1			
		A= 223 L	A= 888 M	A= 997 S	A= 1,425 C	A= 223 D	A= 888 L	A= 997 M	A= 1,425 S
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.49689	0.02127	0.00208	0.00001	0.61791	0.61791	0.61791	0.61791
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.46898	0.40060	0.14848	0.00946	0.36554	0.36554	0.36554	0.36554
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.03039	0.32166	0.27697	0.05794	0.01511	0.01511	0.01511	0.01511
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.00373	0.24414	0.49318	0.47130	0.00143	0.00143	0.00143	0.00143
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00001	0.01233	0.07929	0.46129	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000





El modelo 3 corresponde a puentes con una longitud de claros de 40 m, una altura de columnas de 6 m con diámetro de columna de 3.2 m. Al igual que los modelos anteriores el modelo 3 base (M3-0) fue inducido a los cuatro estados límite de daño como se puede ver en la Figura V-16. Cuando el casing vale cero y sin importar los diferentes espesores de placa, el encamisado no beneficia al modelo ya que la probabilidad de falla no presenta cambios importantes, como se puede ver en todas las tablas para el casing cero. Sin embargo, cuando el casing es uno presenta un mejor comportamiento a diferencia de los modelos 1 y 2. De hecho, en estos modelos se puede observar que la probabilidad de falla decrece de manera rápida y llega el momento (a partir del modelo M3-1/2-1) donde ninguna de las aceleraciones propuestas ocasiona daño. Para ilustrar lo anterior se presenta la Figura V-18.

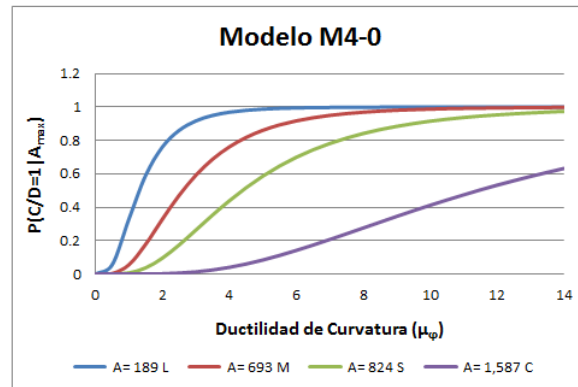


Figura V-22 Curva de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 4 para el caso M4-0.

Tabla V-XXII Probabilidad de falla del modelo 4 para el caso M4-0

		Probabilidades de falla del modelo 4			
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M4-0			
		A= 189 L	A= 693 M	A= 824 S	A= 1,587 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.32660	0.05468	0.00683	0.00002
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.58987	0.53625	0.25585	0.01282
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.07076	0.26929	0.32293	0.07103
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.01271	0.13603	0.37915	0.50048
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00007	0.00375	0.03524	0.41564



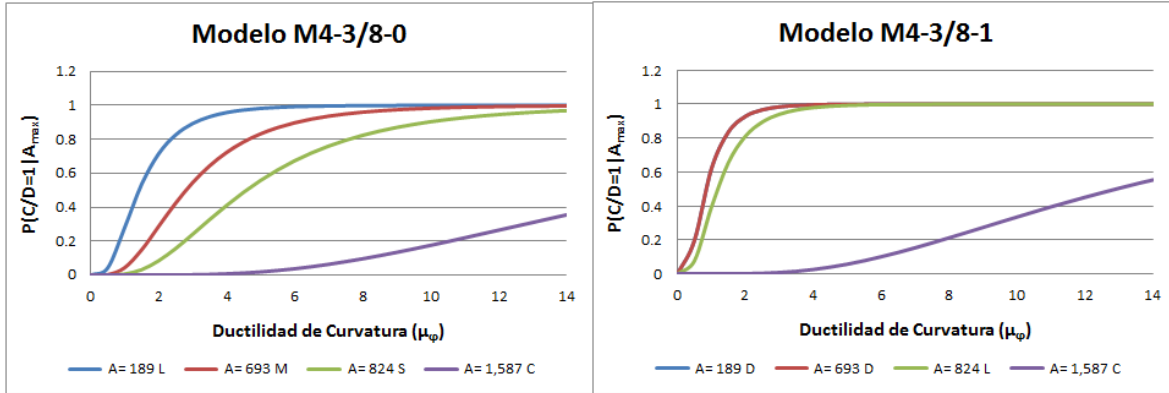


Figura V-23 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 4 para los casos M4-3/8-0 y M4-3/8-1.

Tabla V-XXIII Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-3/8-0 y M4-3/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M4-3/8-0				M4-3/8-1			
		A= 189 L	A= 693 M	A= 824 S	A= 1,587 C	A= 189 L	A= 693 L	A= 824 S	A= 1,587 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.27626	0.04245	0.00554	0.00000	0.61791	0.61791	0.39117	0.00001
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.61570	0.50059	0.23366	0.00163	0.36554	0.36554	0.54882	0.00748
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.08966	0.28830	0.31746	0.01667	0.01511	0.01511	0.05194	0.04941
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.01826	0.16330	0.40197	0.29104	0.00143	0.00143	0.00803	0.44756
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00012	0.00536	0.04137	0.69066	0.00000	0.00000	0.00003	0.49554

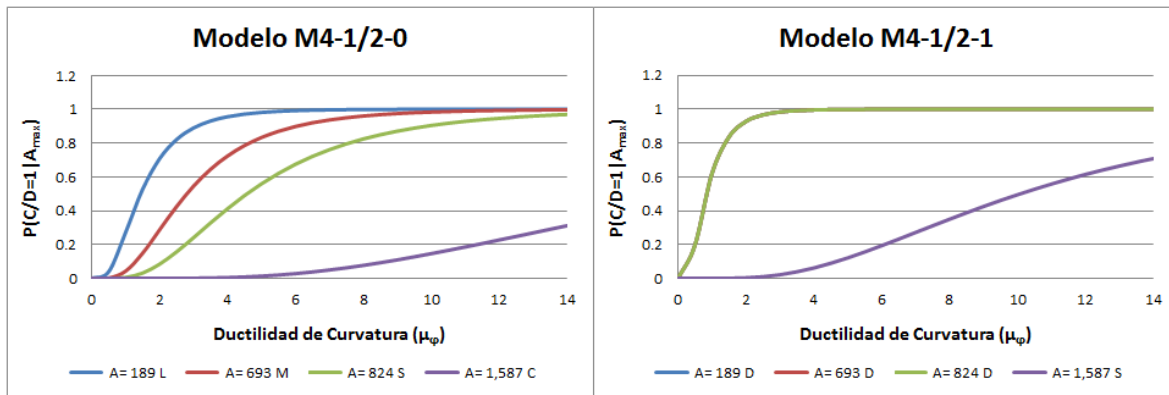


Figura V-24 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 4 para los casos M4-1/2-0 y M4-1/2-1.

Tabla V-XXIV Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-1/2-0 y M4-1/2-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M4-1/2-0				M4-1/2-1			
		A= 189 L	A= 693 M	A= 824 S	A= 1,587 C	A= 189 L	A= 693 L	A= 824 S	A= 1,587 C
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.27067	0.04286	0.00563	0.00000	0.61791	0.61791	0.61791	0.00006
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.61814	0.50195	0.23518	0.00111	0.36554	0.36554	0.36554	0.02163
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.09204	0.28765	0.31789	0.01251	0.01511	0.01511	0.01511	0.09957
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.01903	0.16225	0.40039	0.25548	0.00143	0.00143	0.00143	0.54288
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00012	0.00529	0.04091	0.73090	0.00000	0.00000	0.00000	0.33587



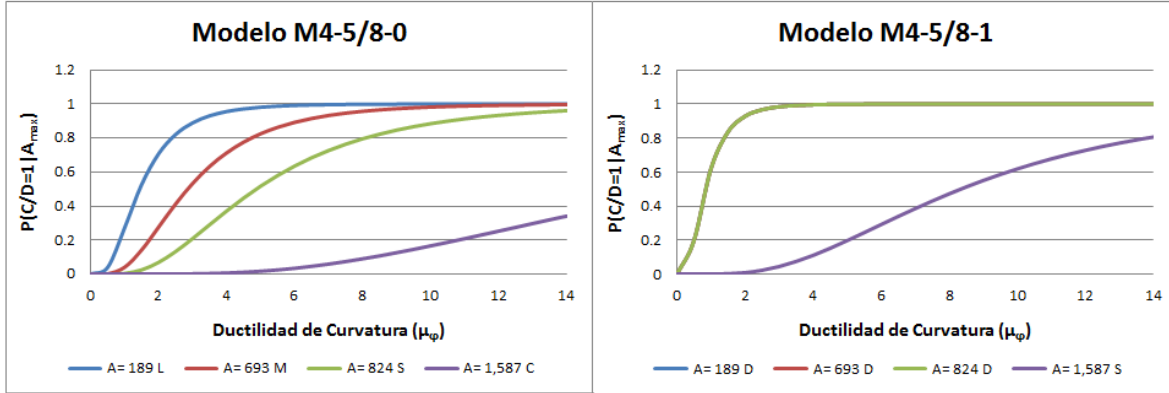


Figura V-25 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 4 para los casos M4-5/8-0 y M4-5/8-1.

Tabla V-XXV Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-5/8-0 y M4-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M4-5/8-0				M4-5/8-1			
		A= 189 L	A= 693 M	A= 824 S	A= 1,587 C	A= 189 L	A= 693 L	A= 824 S	A= 1,587 S
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.27119	0.04018	0.00414	0.00000	0.61791	0.61791	0.61791	0.00020
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.61792	0.49266	0.20504	0.00146	0.36554	0.36554	0.36554	0.04382
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.09181	0.29195	0.30761	0.01534	0.01511	0.01511	0.01511	0.15240
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.01895	0.16944	0.43214	0.28043	0.00143	0.00143	0.00143	0.57334
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00012	0.00576	0.05106	0.70277	0.00000	0.00000	0.00000	0.23024

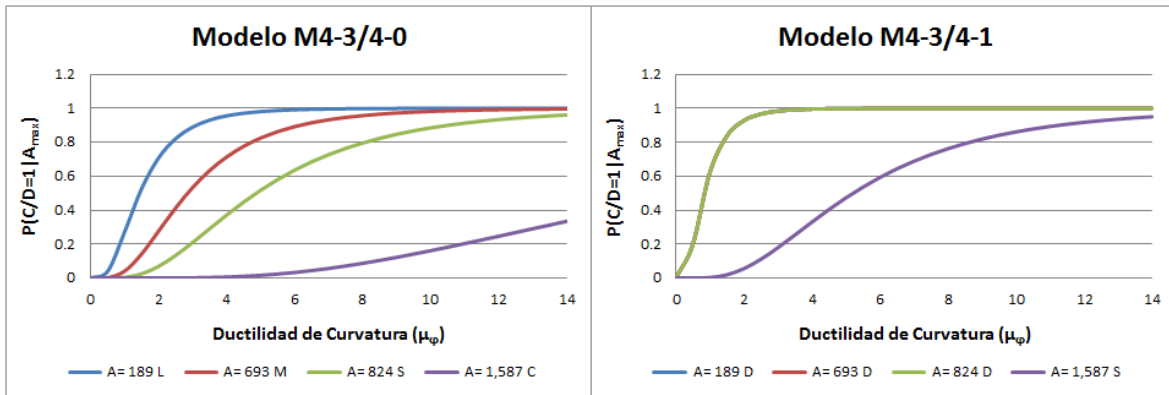


Figura V-26 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 4 para los casos M4-3/4-0 y M4-3/4-1.

Tabla V-XXVI Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-3/4-0 y M4-3/4-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M4-3/4-0				M4-3/4-1			
		A= 189 L	A= 693 M	A= 824 S	A= 1,587 C	A= 189 D	A= 693 L	A= 824 M	A= 1,587 S
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.27143	0.04029	0.00416	0.00000	0.61791	0.61791	0.61791	0.00295
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.61781	0.49304	0.20543	0.00137	0.36554	0.36554	0.36554	0.17533
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.09171	0.29178	0.30777	0.01464	0.01511	0.01511	0.01511	0.29359
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.01892	0.16915	0.43172	0.27461	0.00143	0.00143	0.00143	0.46412
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00012	0.00574	0.05091	0.70938	0.00000	0.00000	0.00000	0.06401





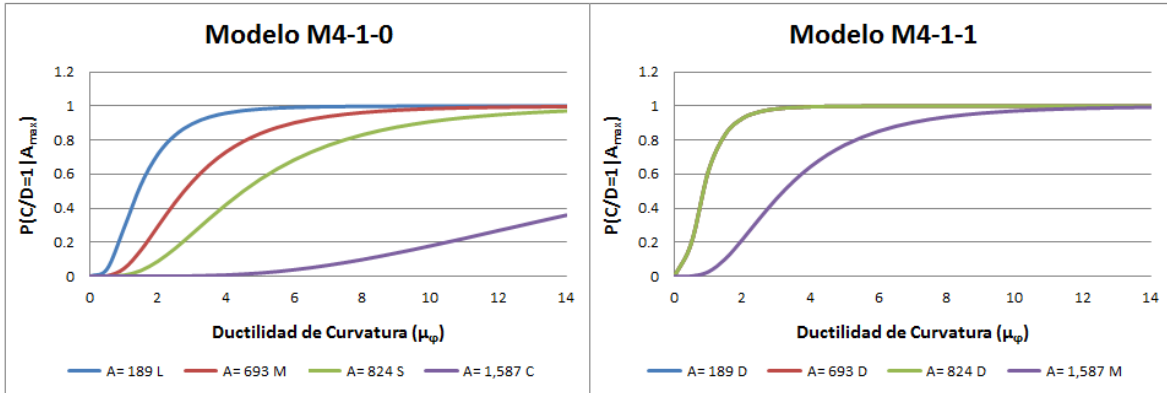


Figura V-27 Curvas de fragilidad por  $\mu_\phi$  del modelo 4 para los casos M4-1-0 y M4-1-1.

Tabla V-XXVII Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-1-0 y M4-1-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Ductilidad de Curvatura	M4-1-0				M4-1-1			
		A= 189 L	A= 693 M	A= 824 S	A= 1,587 C	A= 189 D	A= 693 L	A= 824 M	A= 1,587 S
Despreciable	$\mu_\phi < 1$	0.28158	0.04495	0.00607	0.00000	0.61791	0.61791	0.61791	0.02610
Ligero	$1 < \mu_\phi < 3$	0.61329	0.50877	0.24307	0.00170	0.36554	0.36554	0.36554	0.42994
Moderado	$3 < \mu_\phi < 5$	0.08745	0.28432	0.32000	0.01720	0.01511	0.01511	0.01511	0.31460
Severo	$5 < \mu_\phi < 13$	0.01757	0.15701	0.39223	0.29518	0.00143	0.00143	0.00143	0.21955
Colapso	$13 < \mu_\phi$	0.00011	0.00496	0.03864	0.68591	0.00000	0.00000	0.00000	0.00981

El modelo 4 tiene como características una longitud de claros de 40 m, una altura de columnas de 10 m y su diámetro de 3.3 m. Al igual que los modelos anteriores el modelo 4 base (M4-0) fue sujeto ante diferentes niveles de aceleración para que se presentaran los cuatro estados límite de daño como se puede ver en la Figura V-22. Cuando el casing vale cero y sin importar los diferentes espesores de placa el encamisado no beneficia al modelo ya que la probabilidad de falla no presenta cambios importantes como se puede ver en todas las tablas correspondientes al casing cero. Sin embargo, cuando el casing es uno presenta un comportamiento muy similar al modelo 3 y mejor comportamiento que los modelos 1 y 2. De hecho, en estos modelos se puede ver que la probabilidad de falla decrece de manera rápida y llega el momento (a partir del modelo M3-1/2-1) donde las aceleraciones propuestas ocasionan daño despreciable y daño severo. Para ilustrar lo anterior se presenta la Figura V-18.





### V.3.1. Curvas De Fragilidad Como Función De La Distorsión Angular o Drift ( $\theta$ )

El segundo de los parámetros implementado para representar el estado límite de daño de las columnas que forman parte de la subestructura fue la distorsión angular, comúnmente conocida como distorsión angular o drift ( $\theta$ ). Al desarrollar las curvas de fragilidad en función de este parámetro se necesitan conocer los valores de los parámetros (D y H) obtenidos en los análisis efectuados a los modelos en estudio para calcular la distorsión angular. Una vez obtenidos, se procede similarmente como se explicó en la sección previa a estimar los parámetros  $\lambda$  y  $\xi$ , parámetros necesarios para definir la función de densidad de probabilidad acumulada log-normal. Estos valores se presentan en la Tabla V-XXVIII.

Tabla V-XXVIII Parámetros que definen las curvas de fragilidad en función de la distorsión angular ( $\theta$ )

M1-0	Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	66.280	3.516	600	0.0059	-5.31958	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
322	85.644	6.117		0.0102	-4.76592	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
534	102.725	9.828		0.0164	-4.29165	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna
1191	153.719	24.543		0.0409	-3.37651	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

Como se observa en la Tabla V-XXVIII cada uno de los modelos fueron expuestos a una serie de espectros de respuesta, los cuales a su vez fueron escalados a cuatro diferentes aceleraciones, como se explicó antes esto se realizó con el objetivo de producir en los modelos base (sin encamisado de acero) cuatro estados límite de daño según la clasificación de la ductilidad de curvatura (ligero, moderado, severo y colapso) para con ello cuantificar el beneficio que se tiene en la reducción de la probabilidad de falla con el incremento del espesor de las placas de acero.

Sin embargo, como se puede ver en la Tabla V-XXVIII para dichas aceleraciones no se alcanzaron los mismos tipos de estados de daño tomando en cuenta como parámetro la distorsión angular. Esto se debe por un





lado a que numéricamente la ductilidad de curvatura es mayor que la distorsión angular y por otro lado tiene una relación directa a los valores que se utilizan para obtener tales valores. Es así que para la ductilidad de curvatura interviene la longitud la de articulación plástica mientras que para el cálculo del drift se toma en cuenta el desplazamiento en la parte más alta de la columna respecto a su altura.

A continuación se presentan las curvas de fragilidad obtenidas en función de la distorsión angular y las tablas correspondientes donde se muestra la probabilidad de falla para cada uno de los casos. Cabe señalar que en todas las tablas al lado de la aceleración se asigna una letra como indicador del estado límite de daño se alcanzado con dicha aceleración (N = Ningún daño, L = Ligero, M = Moderado, E = Extensivo y C = Completo).

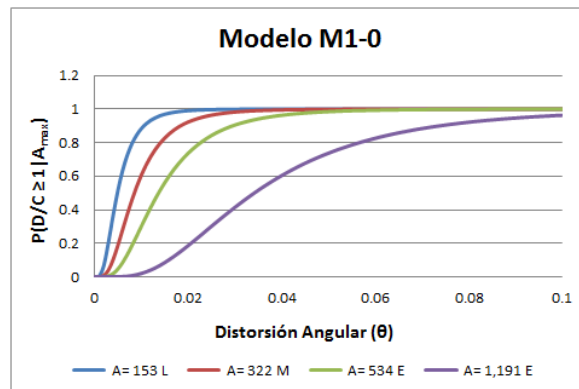


Figura V-28 Curva de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para el caso M1-0.

Tabla V-XXIX Probabilidad de falla del modelo 1 para el caso M1-0

Estado de Daño		Probabilidades de falla del modelo 1			
		M1-0			
Distorsión Angular		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 E	A= 1,191 E
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.51413	0.18745	0.04670	0.00068
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.21035	0.18456	0.08530	0.00344
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.24453	0.45533	0.42890	0.08091
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.03094	0.17108	0.42371	0.65213
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00005	0.00159	0.01539	0.26284



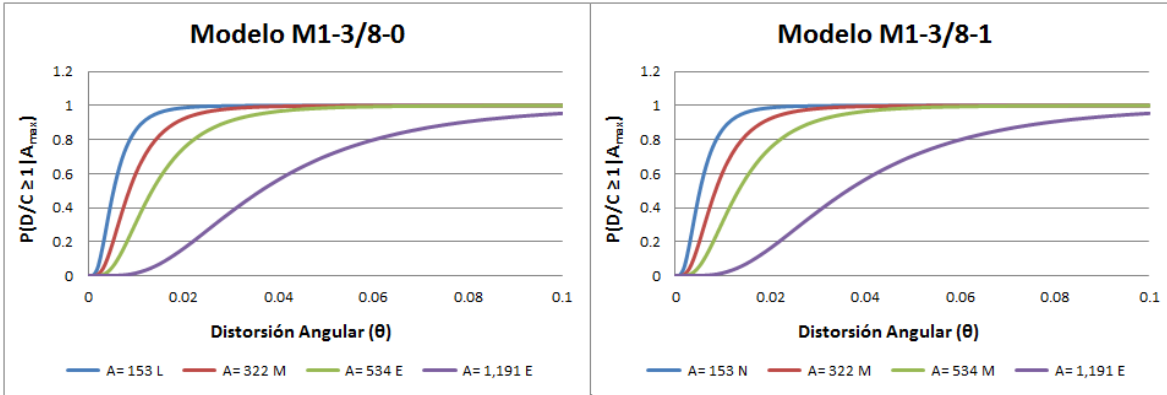


Figura V-29 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1.

Tabla V-XXX Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 1							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M1-3/8-0				M1-3/8-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 E	A= 1,191 E	A= 153 N	A= 322 M	A= 534 M	A= 1,191 E
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.46646	0.18603	0.05034	0.00047	0.46646	0.18603	0.05034	0.00047
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.21672	0.18398	0.08956	0.00254	0.21672	0.18398	0.08956	0.00254
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.27649	0.45597	0.43523	0.06697	0.27649	0.45597	0.43523	0.06697
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.04024	0.17241	0.41083	0.63220	0.04024	0.17241	0.41083	0.63220
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00009	0.00161	0.01404	0.29781	0.00009	0.00161	0.01404	0.29781

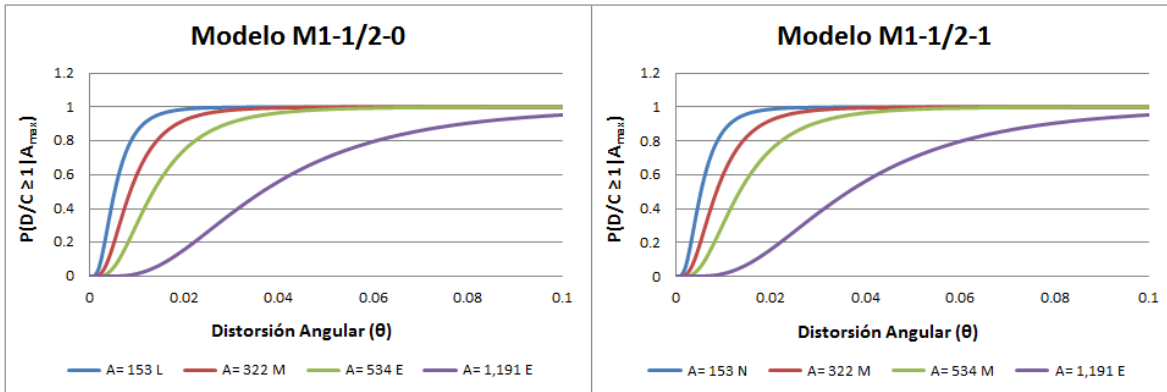


Figura V-30 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-3/8-0 y M1-3/8-1.

Tabla V-XXXI Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-1/2-0 y M1-1/2-1

		Probabilidades de falla del modelo 1							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M1-1/2-0				M1-1/2-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 E	A= 1,191 E	A= 153 N	A= 322 M	A= 534 M	A= 1,191 E
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.46520	0.18574	0.04984	0.00046	0.46520	0.18574	0.04984	0.00046
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.21685	0.18386	0.08898	0.00250	0.21685	0.18386	0.08898	0.00250
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.27734	0.45610	0.43441	0.06627	0.27734	0.45610	0.43441	0.06627
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.04052	0.17268	0.41255	0.63100	0.04052	0.17268	0.41255	0.63100
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00009	0.00162	0.01422	0.29977	0.00009	0.00162	0.01422	0.29977



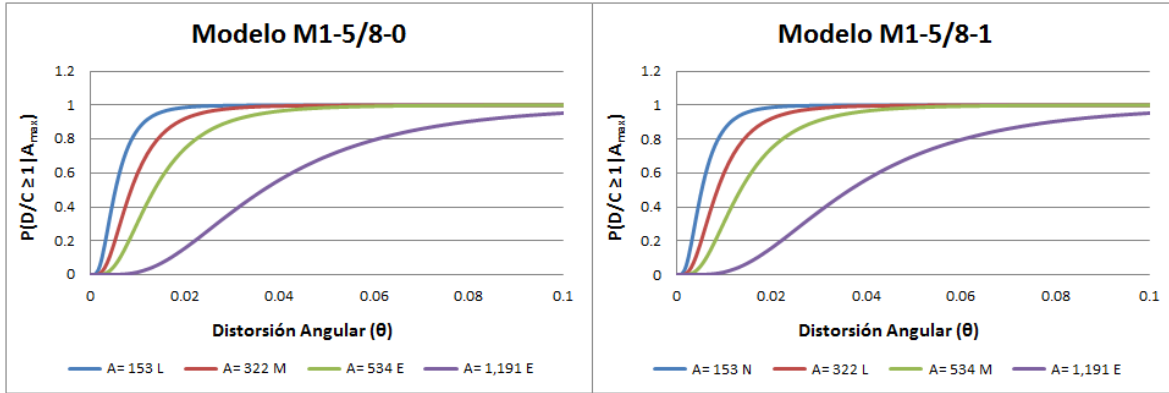


Figura V-31 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1.

Tabla V-XXXII Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 1							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M1-5/8-0				M1-5/8-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 E	A= 1,191 E	A= 153 N	A= 322 L	A= 534 M	A= 1,191 E
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.46509	0.18436	0.04936	0.00046	0.46509	0.18436	0.04936	0.00046
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.21686	0.18329	0.08843	0.00248	0.21686	0.18329	0.08843	0.00248
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.27741	0.45672	0.43361	0.06588	0.27741	0.45672	0.43361	0.06588
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.04054	0.17398	0.41422	0.63034	0.04054	0.17398	0.41422	0.63034
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00009	0.00165	0.01439	0.30084	0.00009	0.00165	0.01439	0.30084

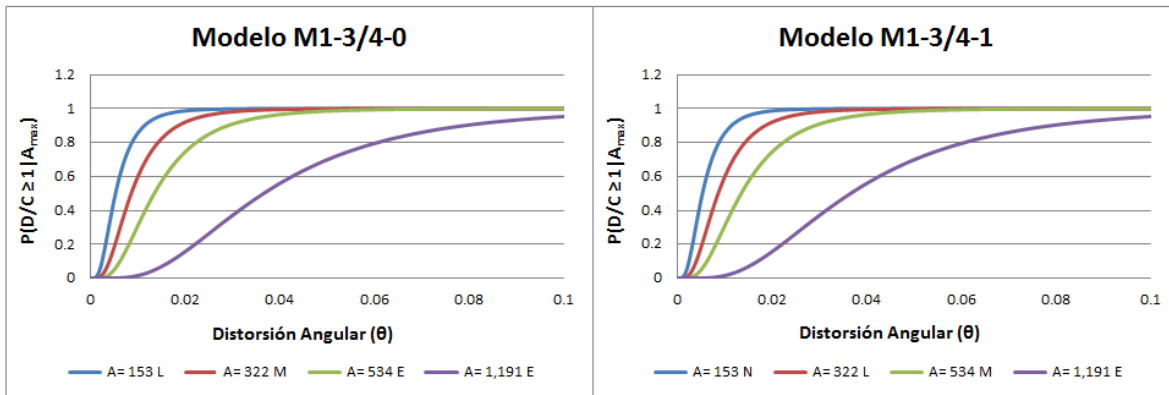


Figura V-32 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-3/4-0 y M1-3/4-1.

Tabla V-XXXIII Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-5/8-0 y M1-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 1							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M1-3/4-0				M1-3/4-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 E	A= 1,191 E	A= 153 N	A= 322 L	A= 534 M	A= 1,191 E
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.46403	0.18327	0.04938	0.00046	0.46403	0.18327	0.04938	0.00046
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.21697	0.18284	0.08845	0.00247	0.21697	0.18284	0.08845	0.00247
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.27814	0.45720	0.43364	0.06574	0.27814	0.45720	0.43364	0.06574
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.04078	0.17502	0.41414	0.63008	0.04078	0.17502	0.41414	0.63008
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00009	0.00167	0.01438	0.30125	0.00009	0.00167	0.01438	0.30125



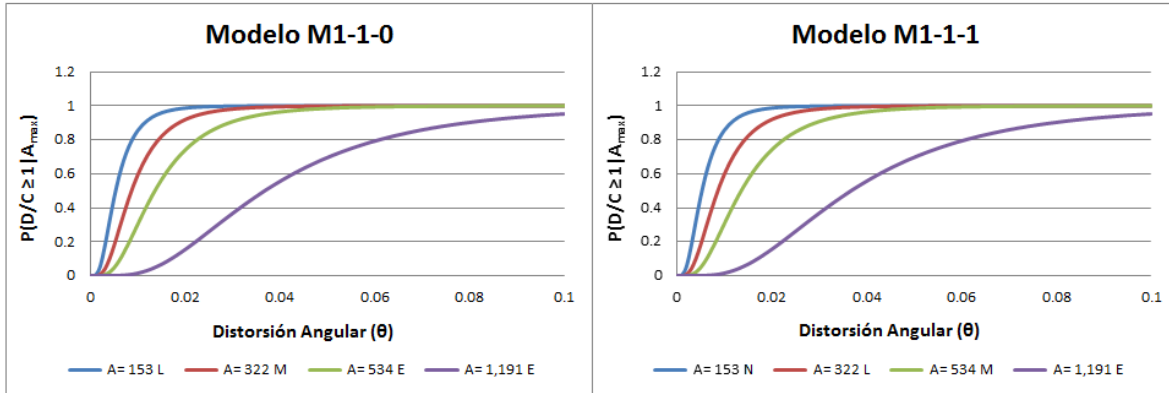


Figura V-33 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 1 para los casos M1-1-0 y M1-1-1.

Tabla V-XXXIV Probabilidades de falla del modelo 1 para los casos M1-1-0 y M1-1-1

		Probabilidades de falla del modelo 1							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M1-1-0				M1-1-1			
		A= 153 L	A= 322 M	A= 534 E	A= 1,191 E	A= 153 N	A= 322 L	A= 534 M	A= 1,191 E
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.46384	0.18162	0.04827	0.00044	0.46384	0.18162	0.04827	0.00044
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.21699	0.18214	0.08716	0.00242	0.21699	0.18214	0.08716	0.00242
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.27827	0.45793	0.43173	0.06485	0.27827	0.45793	0.43173	0.06485
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.04082	0.17661	0.41806	0.62850	0.04082	0.17661	0.41806	0.62850
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00009	0.00170	0.01479	0.30379	0.00009	0.00170	0.01479	0.30379

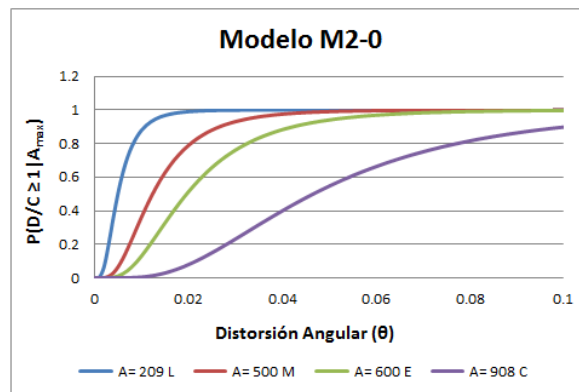


Figura V-34 Curva de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para el caso M2-0.

Tabla V-XXXV Probabilidad de falla del modelo 2 para el caso M2-0

		Probabilidades de falla del modelo 2			
Estado de Daño	Distorsión Angular	M2-0			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 E	A= 908 C
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.50590	0.06585	0.01135	0.00010
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.21165	0.10606	0.03158	0.00069
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.24999	0.45497	0.28434	0.02856
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.03240	0.36323	0.61325	0.51686
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00006	0.00990	0.05948	0.45379



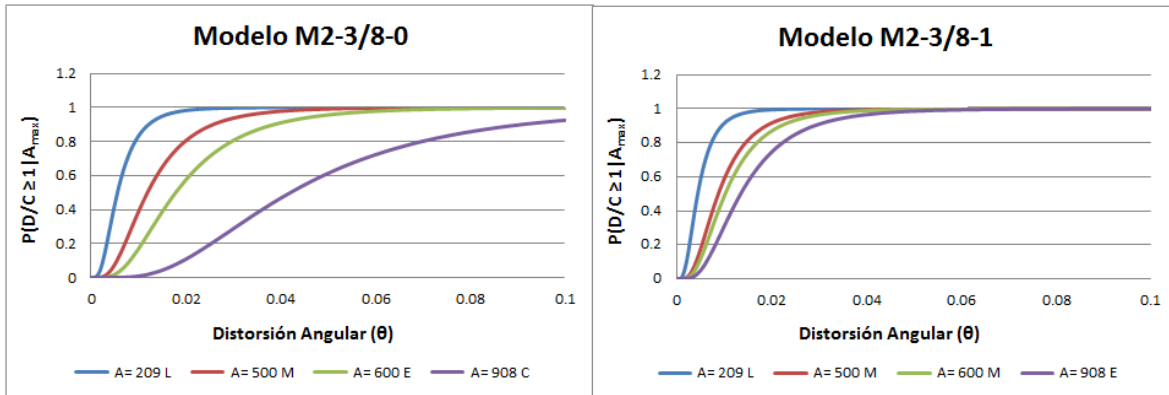


Figura V-35 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-3/8-0 y M2-3/8-1.

Tabla V-XXXVI Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-3/8-0 y M2-3/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M2-3/8-0				M2-3/8-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 E	A= 908 C	A= 209 L	A= 500 M	A= 600 M	A= 908 E
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.41746	0.07241	0.01660	0.00019	0.58632	0.17630	0.17630	0.04958
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.22027	0.11238	0.04173	0.00119	0.19565	0.17985	0.17985	0.08869
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.30994	0.46063	0.32424	0.04110	0.19780	0.46018	0.46018	0.43398
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.05219	0.34592	0.57360	0.56933	0.02020	0.18185	0.18185	0.41345
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00014	0.00867	0.04383	0.38819	0.00002	0.00182	0.00182	0.01431

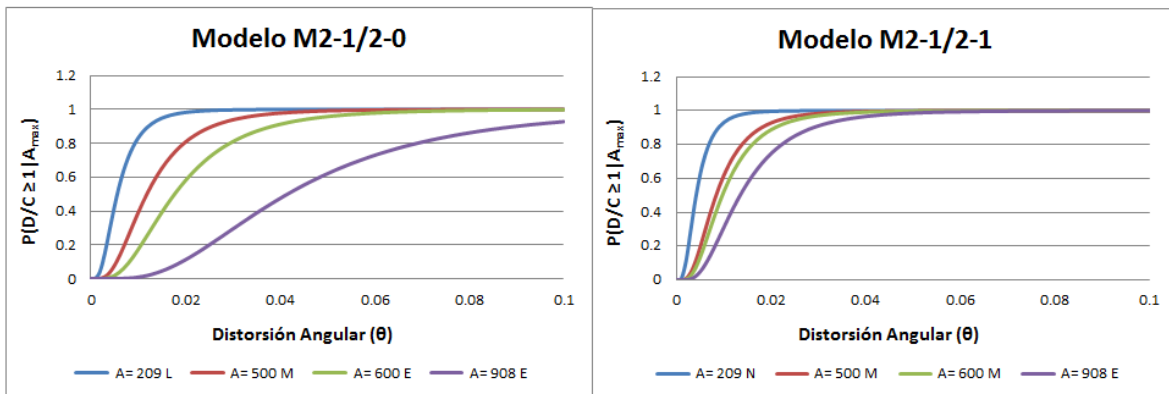


Figura V-36 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-1/2-0 y M2-1/2-1.

Tabla V-XXXVII Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-1/2-0 y M2-1/2-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M2-1/2-0				M2-1/2-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 E	A= 908 E	A= 209 N	A= 500 M	A= 600 M	A= 908 E
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.41660	0.07369	0.01722	0.00020	0.62993	0.19866	0.13739	0.05033
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.22030	0.11356	0.04286	0.00127	0.18400	0.18892	0.16021	0.08955
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.31053	0.46158	0.32816	0.04284	0.17079	0.45001	0.47242	0.43522
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.05243	0.34272	0.56930	0.57510	0.01527	0.16102	0.22696	0.41085
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00014	0.00845	0.04247	0.38058	0.00002	0.00139	0.00302	0.01405



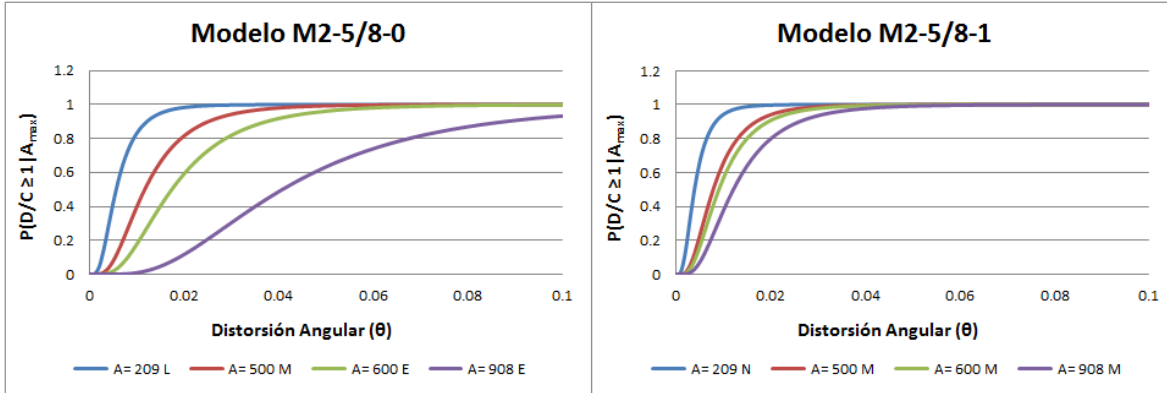


Figura V-37 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-5/8-0 y M2-5/8-1.

Tabla V-XXXVIII Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-5/8-0 y M2-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M2-5/8-0				M2-5/8-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 E	A= 908 E	A= 209 N	A= 500 M	A= 600 M	A= 908 M
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.42418	0.07950	0.01903	0.00024	0.65905	0.22518	0.16060	0.06982
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.21997	0.11882	0.04606	0.00143	0.17509	0.19790	0.17256	0.10992
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.30533	0.46538	0.33886	0.04619	0.15334	0.43600	0.46611	0.45855
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.05039	0.32873	0.55714	0.58543	0.01251	0.13989	0.19851	0.35259
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00013	0.00757	0.03891	0.36672	0.00001	0.00103	0.00222	0.00913

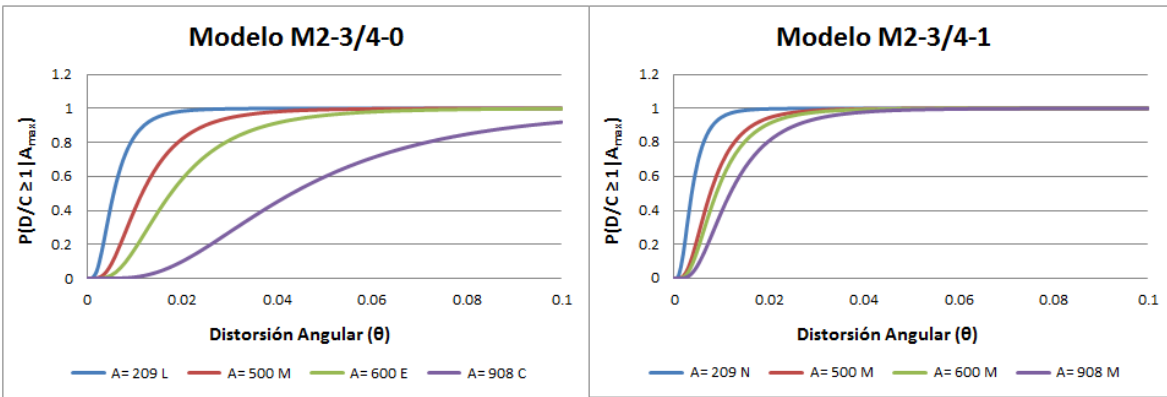


Figura V-38 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-3/4-0 y M2-3/4-1.

Tabla V-XXXIX Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-3/4-0 y M2-3/4-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M2-3/4-0				M2-3/4-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 E	A= 908 C	A= 209 N	A= 500 M	A= 600 M	A= 908 M
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.43309	0.08221	0.01807	0.00016	0.67655	0.23598	0.16530	0.07446
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.21948	0.12118	0.04437	0.00105	0.16932	0.20105	0.17483	0.11428
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.29922	0.46688	0.33329	0.03793	0.14310	0.42984	0.46446	0.46214
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.04808	0.32252	0.56354	0.55801	0.01103	0.13222	0.19333	0.34080
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00012	0.00720	0.04074	0.40284	0.00001	0.00091	0.00209	0.00833





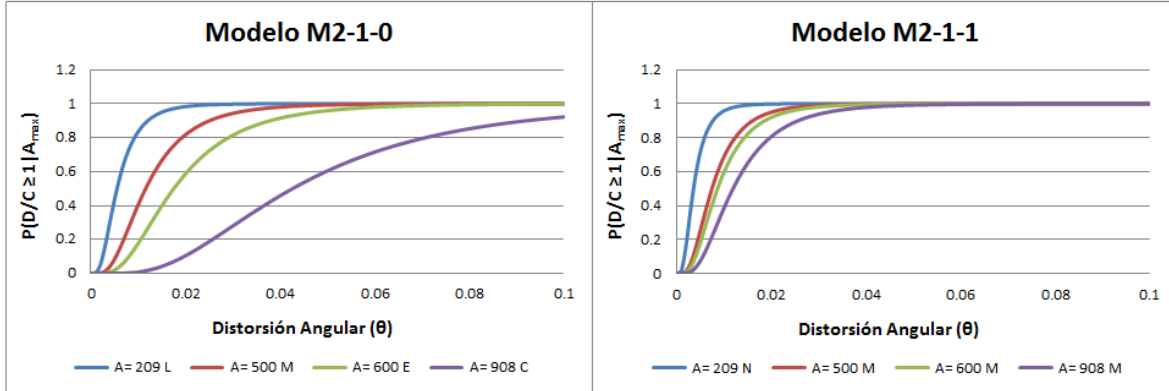


Figura V-39 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 2 para los casos M2-1-0 y M2-1-1.

Tabla V-XL Probabilidades de falla del modelo 2 para los casos M2-1-0 y M2-1-1

		Probabilidades de falla del modelo 2							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M2-1-0				M2-1-1			
		A= 209 L	A= 500 M	A= 600 E	A= 908 C	A= 209 N	A= 500 M	A= 600 M	A= 908 M
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.42308	0.07899	0.01790	0.00017	0.71735	0.25416	0.18206	0.07435
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.22002	0.11836	0.04408	0.00111	0.15462	0.20575	0.18233	0.11417
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.30608	0.46508	0.33233	0.03919	0.11996	0.41900	0.45773	0.46205
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.05068	0.32993	0.56463	0.56262	0.00806	0.12034	0.17618	0.34108
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00013	0.00764	0.04106	0.39691	0.00001	0.00075	0.00169	0.00834

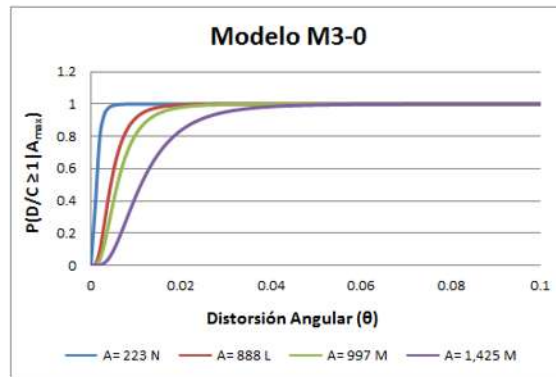


Figura V-40 Curva de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para el caso M3-0.

Tabla V-XLI Probabilidad de falla del modelo 3 para el caso M3-0

		Probabilidades de falla del modelo 3			
Estado de Daño	Distorsión Angular	M3-0			
		A= 223 N	A= 888 L	A= 997 M	A= 1,425 M
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.99145	0.58488	0.39554	0.09171
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.00693	0.19600	0.22080	0.12908
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.00160	0.19871	0.32500	0.47092
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00001	0.02038	0.05848	0.30221
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00003	0.00018	0.00608



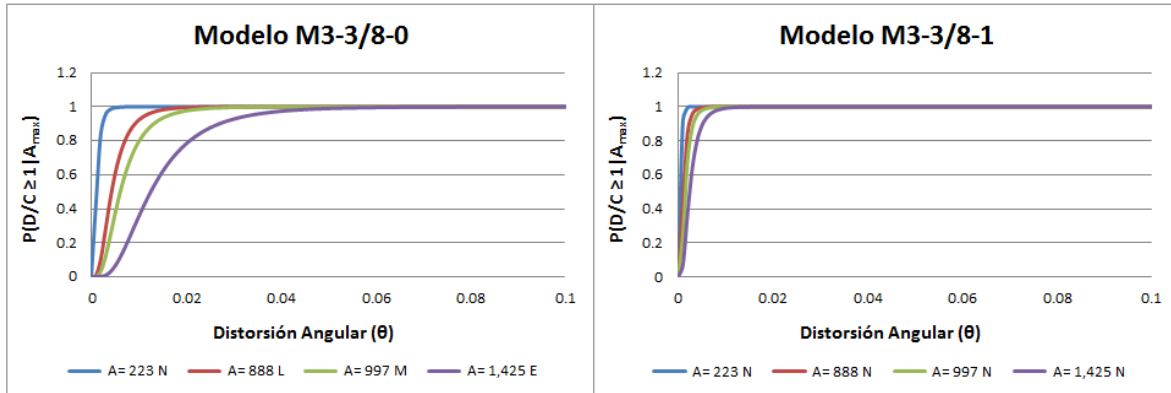


Figura V-41 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-3/8-0 y M3-3/8-1.

Tabla V-XLII Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-3/8-0 y M3-3/8-1

Probabilidades de falla del modelo 3									
Estado de Daño	Distorsión Angular	M3-3/8-0				M3-3/8-1			
		A= 223 N	A= 888 L	A= 997 M	A= 1,425 E	A= 223 N	A= 888 N	A= 997 N	A= 1,425 N
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.99419	0.60179	0.36852	0.06265	0.99998	0.99493	0.97878	0.88860
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.00479	0.19175	0.22049	0.10285	0.00002	0.00420	0.01642	0.07385
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.00101	0.18811	0.34356	0.45170	0.00000	0.00086	0.00474	0.03640
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00001	0.01833	0.06719	0.37220	0.00000	0.00001	0.00006	0.00114
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00002	0.00023	0.01059	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

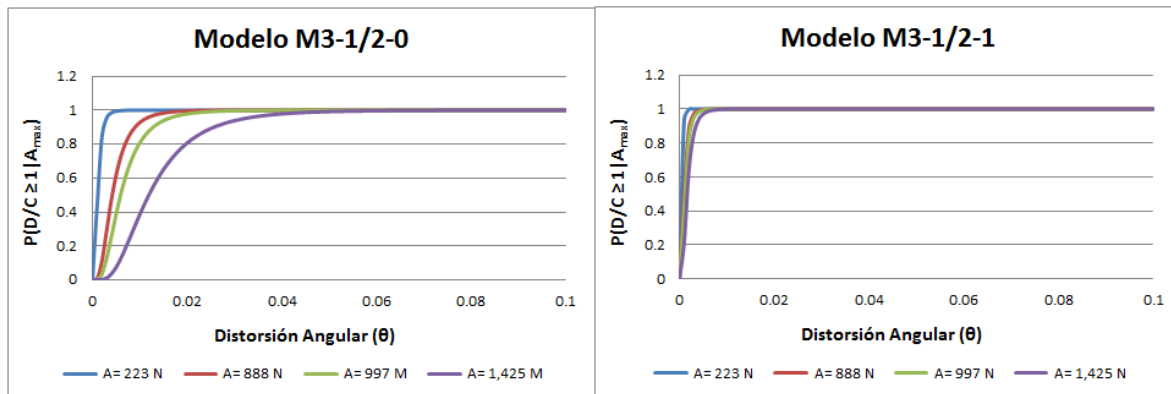


Figura V-42 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-1/2-0 y M3-1/2-1.

Tabla V-XLIII Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-1/2-0 y M3-1/2-1

Probabilidades de falla del modelo 3									
Estado de Daño	Distorsión Angular	M3-1/2-0				M3-1/2-1			
		A= 223 N	A= 888 N	A= 997 M	A= 1,425 M	A= 223 N	A= 888 N	A= 997 N	A= 1,425 N
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.99457	0.62054	0.38902	0.07463	0.99999	0.99672	0.99329	0.97010
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.00449	0.18668	0.22082	0.11443	0.00001	0.00276	0.00550	0.02262
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.00094	0.17652	0.32948	0.46226	0.00000	0.00052	0.00120	0.00718
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00001	0.01624	0.06049	0.34038	0.00000	0.00000	0.00001	0.00010
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00002	0.00019	0.00830	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



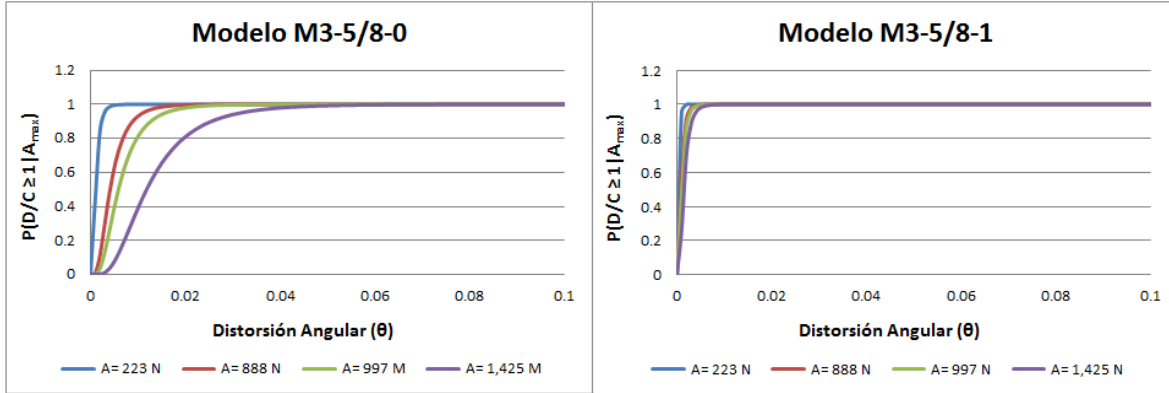


Figura V-43 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-5/8-0 y M3-5/8-1.

Tabla V-XLIV Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-5/8-0 y M3-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 3							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M3-5/8-0				M3-5/8-1			
		A= 223 N	A= 888 N	A= 997 M	A= 1,425 M	A= 223 N	A= 888 N	A= 997 N	A= 1,425 N
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.99470	0.62735	0.39374	0.07582	0.99999	0.99805	0.99586	0.97985
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.00438	0.18474	0.22081	0.11551	0.00001	0.00166	0.00346	0.01564
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.00091	0.17236	0.32623	0.46307	0.00000	0.00028	0.00068	0.00446
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00001	0.01553	0.05903	0.33749	0.00000	0.00000	0.00000	0.00005
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00002	0.00018	0.00811	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

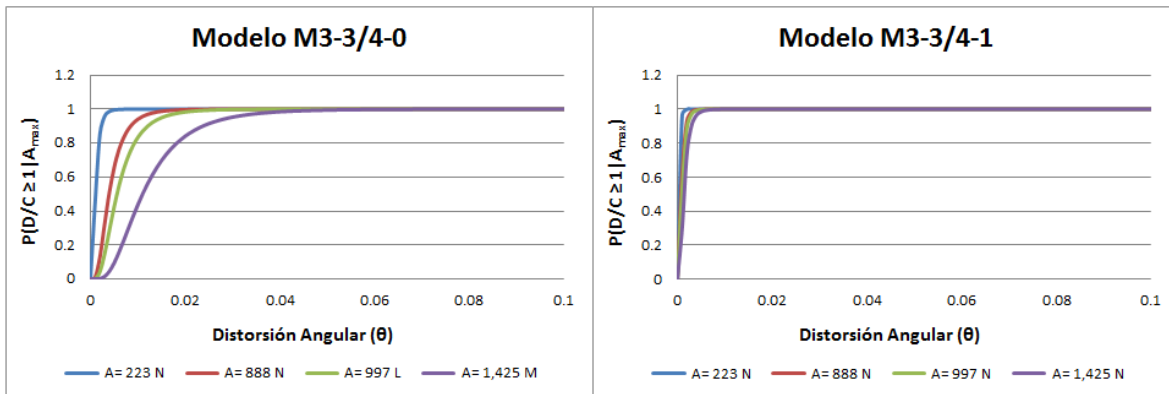


Figura V-44 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-3/4-0 y M3-3/4-1.

Tabla V-XLV Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-3/4-0 y M3-3/4-1

		Probabilidades de falla del modelo 3							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M3-3/4-0				M3-3/4-1			
		A= 223 N	A= 888 N	A= 997 L	A= 1,425 M	A= 223 N	A= 888 N	A= 997 N	A= 1,425 N
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.99515	0.65690	0.42588	0.09459	1.00000	0.99864	0.99703	0.98463
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.00403	0.17578	0.21989	0.13137	0.00000	0.00118	0.00251	0.01212
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.00082	0.15462	0.30416	0.47182	0.00000	0.00019	0.00046	0.00322
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00001	0.01270	0.04994	0.29644	0.00000	0.00000	0.00000	0.00003
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00001	0.00013	0.00579	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000



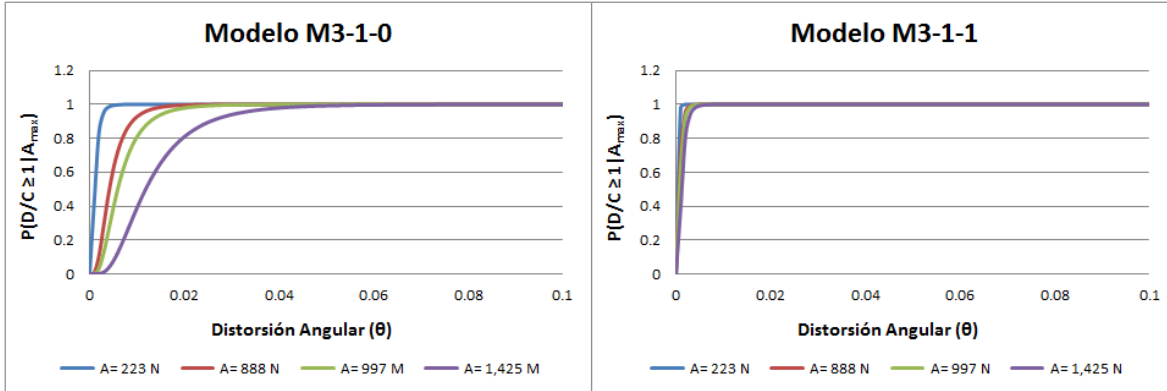


Figura V-45 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 3 para los casos M3-1-0 y M3-1-1.

Tabla V-XLVI Probabilidades de falla del modelo 3 para los casos M3-1-0 y M3-1-1

		Probabilidades de falla del modelo 3							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M3-1-0				M3-1-1			
		A= 223 N	A= 888 N	A= 997 M	A= 1,425 M	A= 223 N	A= 888 N	A= 997 M	A= 1,425 N
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.99424	0.61819	0.38866	0.07552	1.00000	0.99941	0.99864	0.99195
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.00475	0.18733	0.22082	0.11524	0.00000	0.00052	0.00118	0.00655
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.00100	0.17796	0.32973	0.46287	0.00000	0.00007	0.00019	0.00149
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00001	0.01650	0.06060	0.33822	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00002	0.00019	0.00816	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

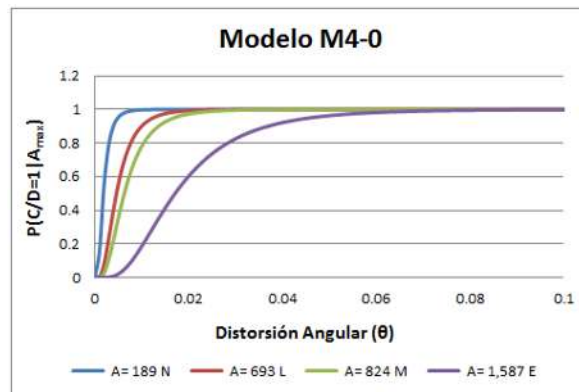


Figura V-46 Curva de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para el caso M4-0.

Tabla V-XLVII Probabilidad de falla del modelo 4 para el caso M4-0

		Probabilidades de falla del modelo 4			
Estado de Daño	Distorsión Angular	M4-0			
		A= 189 N	A= 693 L	A= 824 M	A= 1,587 E
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.95232	0.55183	0.35075	0.02009
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.03476	0.20341	0.21969	0.04788
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.01269	0.21984	0.35571	0.34465
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00023	0.02489	0.07357	0.55031
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00004	0.00028	0.03706



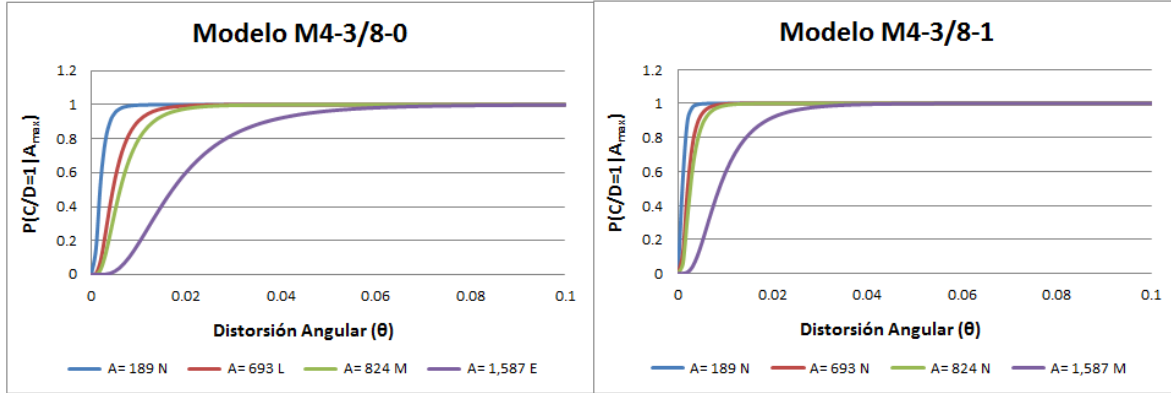


Figura V-47 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-3/8-0 y M4-3/8-1.

Tabla V-XLVIII Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-3/8-0 y M4-3/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M4-3/8-0				M4-3/8-1			
		A= 189 N	A= 693 L	A= 824 M	A= 1,587 E	A= 189 N	A= 693 N	A= 824 N	A= 1,587 M
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.95187	0.56202	0.37195	0.02003	0.99779	0.93843	0.86946	0.18042
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.03506	0.20126	0.22059	0.04777	0.00188	0.04382	0.08451	0.18163
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.01284	0.21327	0.34121	0.34429	0.00033	0.01738	0.04447	0.45844
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00024	0.02342	0.06603	0.55074	0.00000	0.00037	0.00156	0.17777
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00003	0.00022	0.03718	0.00000	0.00000	0.00000	0.00173

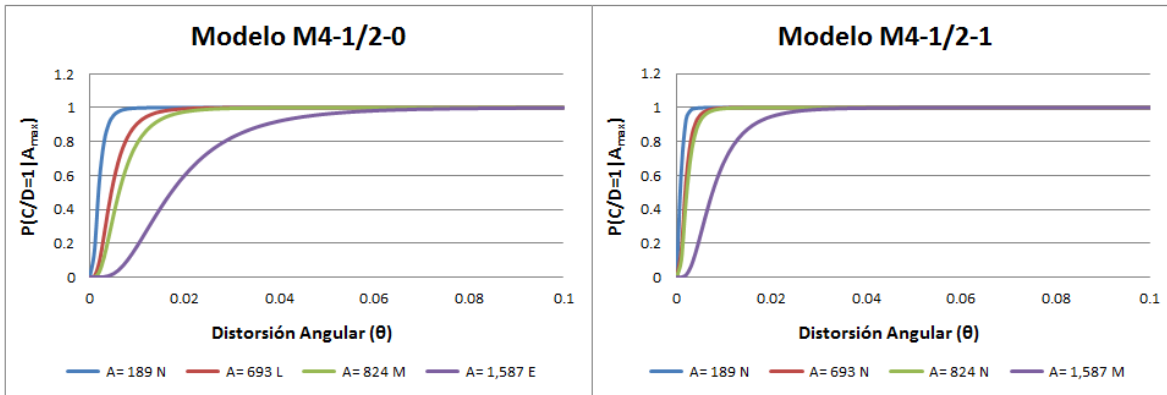


Figura V-48 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-1/2-0 y M4-1/2-1.

Tabla V-XLIX Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-1/2-0 y M4-1/2-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M4-1/2-0				M4-1/2-1			
		A= 189 N	A= 693 L	A= 824 M	A= 1,587 E	A= 189 N	A= 693 N	A= 824 N	A= 1,587 M
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.95236	0.56242	0.36265	0.01980	0.99875	0.95640	0.92283	0.24600
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.03473	0.20117	0.22028	0.04739	0.00108	0.03203	0.05360	0.20373
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.01267	0.21301	0.34758	0.34309	0.00017	0.01137	0.02300	0.42393
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00023	0.02337	0.06924	0.55216	0.00000	0.00020	0.00057	0.12552
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00003	0.00024	0.03755	0.00000	0.00000	0.00000	0.00081



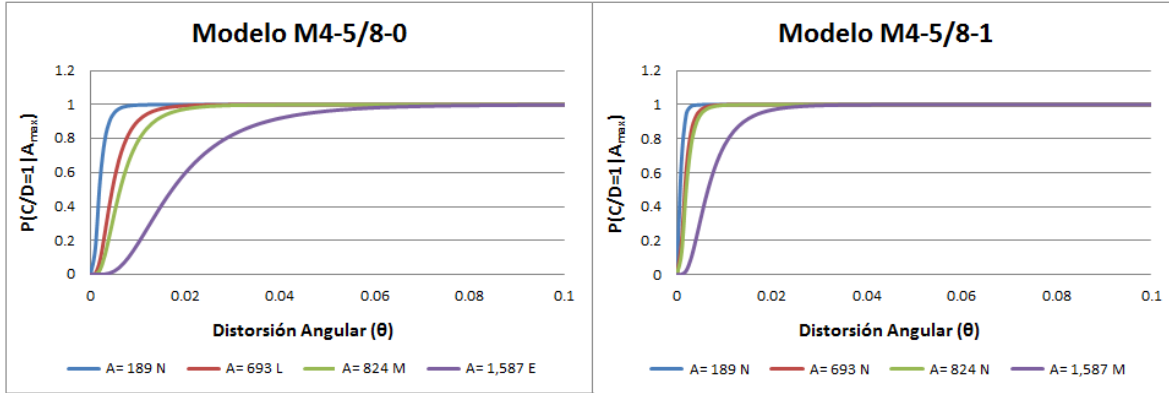


Figura V-49 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-5/8-0 y M4-5/8-1.

Tabla V-L Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-5/8-0 y M4-5/8-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M4-5/8-0				M4-5/8-1			
		A= 189 N	A= 693 L	A= 824 M	A= 1,587 E	A= 189 N	A= 693 N	A= 824 N	A= 1,587 M
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.95173	0.55966	0.35802	0.01970	0.99920	0.96775	0.94080	0.32598
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.03515	0.20176	0.22008	0.04722	0.00070	0.02426	0.04229	0.21771
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.01288	0.21478	0.35075	0.34256	0.00010	0.00787	0.01656	0.37251
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00024	0.02375	0.07090	0.55279	0.00000	0.00012	0.00035	0.08344
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00003	0.00026	0.03772	0.00000	0.00000	0.00000	0.00035

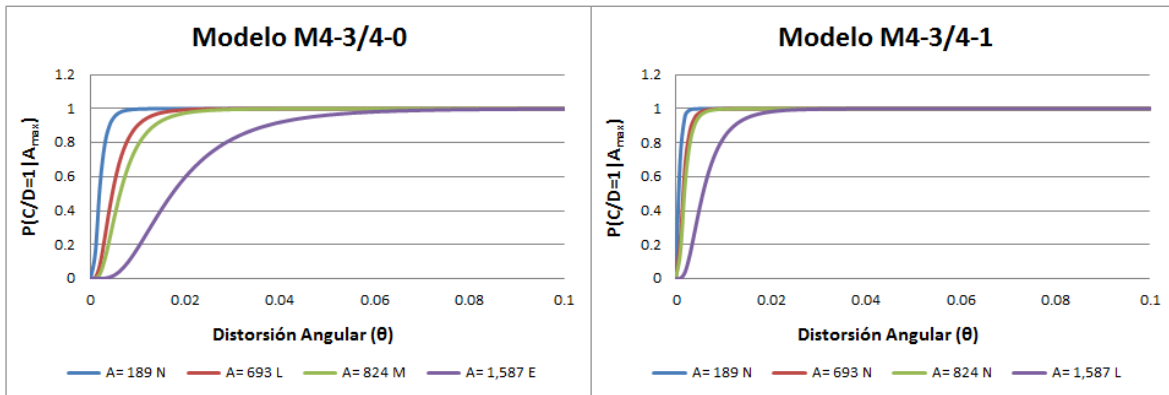


Figura V-50 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-3/4-0 y M4-3/4-1.

Tabla V-LI Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-3/4-0 y M4-3/4-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M4-3/4-0				M4-3/4-1			
		A= 189 N	A= 693 L	A= 824 M	A= 1,587 E	A= 189 N	A= 693 N	A= 824 N	A= 1,587 L
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.95170	0.56012	0.35959	0.01971	0.99947	0.97575	0.95397	0.41081
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.03517	0.20167	0.22015	0.04722	0.00047	0.01861	0.03366	0.22050
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.01289	0.21449	0.34968	0.34257	0.00006	0.00557	0.01215	0.31450
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00024	0.02369	0.07033	0.55278	0.00000	0.00007	0.00022	0.05403
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00003	0.00025	0.03772	0.00000	0.00000	0.00000	0.00015



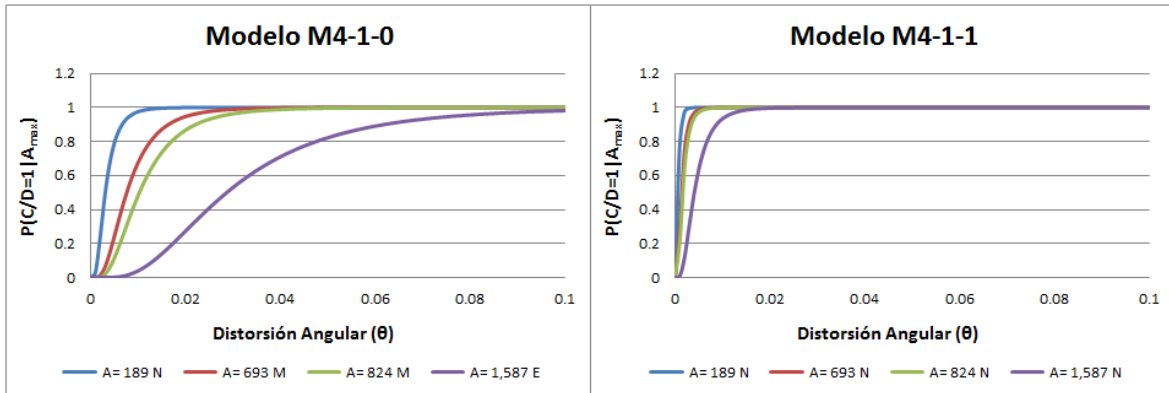


Figura V-51 Curvas de fragilidad por  $\theta$  del modelo 4 para los casos M4-1-0 y M4-1-1.

Tabla V-LII Probabilidades de falla del modelo 4 para los casos M4-1-0 y M4-1-1

		Probabilidades de falla del modelo 4							
Estado de Daño	Distorsión Angular	M4-1-0				M4-1-1			
		A= 189 N	A= 693 M	A= 824 M	A= 1,587 E	A= 189 N	A= 693 N	A= 824 N	A= 1,587 N
Casi ningún daño	$\theta < 0.005$	0.79167	0.24362	0.11567	0.00180	0.99977	0.98647	0.97259	0.63954
Daño ligero	$0.005 < \theta < 0.007$	0.12346	0.20311	0.14668	0.00758	0.00020	0.01074	0.02086	0.18115
Daño moderado	$0.007 < \theta < 0.015$	0.08077	0.42535	0.47465	0.13065	0.00002	0.00276	0.00646	0.16498
Daño extensivo	$0.015 < \theta < 0.050$	0.00410	0.12707	0.25887	0.68286	0.00000	0.00003	0.00009	0.01431
Daño completo	$0.050 < \theta$	0.00000	0.00084	0.00414	0.17711	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001





## ANÁLISIS DEL COSTO- BENEFICIO DEL REFUERZO DE PILAS MEDIANTE ENCAMISADOS METÁLICOS

### VI.1. Introducción

**E**l conocer el costo-beneficio de cierto sistema de refuerzo aplicado a una estructura es una cuestión que sólo hasta hace poco tiempo ha sido objeto de estudio, a pesar de que el estudio del comportamiento de diversos sistemas de refuerzo se ha llevado a cabo durante varias décadas, lo cual, en cierta manera es un proceso natural que ocurre con todos los sistemas de construcción. Primero se desarrollan, luego se perfeccionan y por último se optimizan. De esta manera se podría decir que estamos en la transición de la segunda a la tercera etapa. Como referencias de algunas de las técnicas que se han implementado para conocer la relación del costo-beneficio de sistemas de refuerzo se tienen a Sircar, et al., (2008) y Padgett, et al. (2010).

### VI.2. Modelo Costo-Beneficio

El modelo costo-beneficio que se tomó tiene como base la probabilidad de que ocurra un cierto estado límite de daño ante diferentes escenarios sísmicos, demanda sísmica, en diferentes sistemas estructurales donde se estudia el comportamiento de pilas de CR reforzadas con placas de acero con diferente espesor de placas, considerándose en el estudio el costo que representa el reforzar el puente. La probabilidad de falla se obtuvo como el valor medio de las probabilidades de falla de todos los casos de puentes en estudio con y sin refuerzo, así como los diferentes espesores de placa; por lo que los resultados se separaron por un lado para el casing 0 y por otro para el casing 1. Para tomar los valores de las probabilidades de falla se tomó el valor medio de cada uno de los límites de la frontera de los diferentes estados límite de daño para el caso de la distorsión angular o drift. De







esta manera, se puede ver que los únicos estados límites de daño que describen detrimentos en las columnas de los puentes son el estado de daño ligero (0.007 – círculos color morado en la Figura VI-1), daño moderado (0.015 – círculos color naranja en la Figura VI-1), daño extensivo (0.025 – círculo color azul en la Figura VI-1) y daño completo (0.05 – círculos color azul claro en la Figura VI-1).

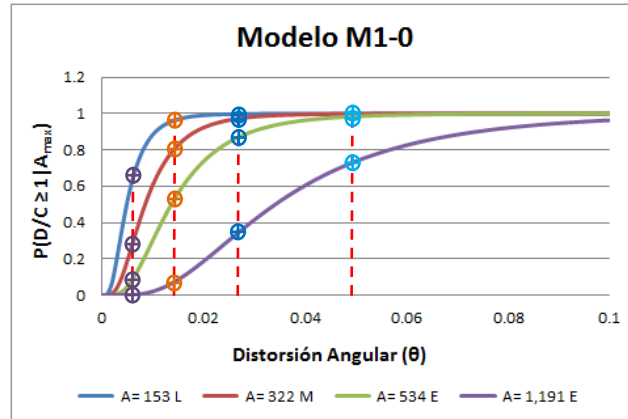


Figura VI-1 Ejemplo de la obtención de las probabilidades de falla para los valores frontera en los estados límite de daño por distorsión angular o drift para el modelo M1-0.

Para el costo de refuerzo del puente se tomó en cuenta la relación de la reparación del puente con diferentes estados límite de daño y el costo del refuerzo. La relación de costos se tomó de Sircar, et al., (2008). Esta relación de costos se presenta a través de índices de daño, los cuales relacionan el costo de la reparación del puente al costo de la construcción del puente en su estado inicial. Es así, que se tiene una relación de costo por cada uno de los estados de daño (0.0455 para daños ligeros, 0.25 para daño moderado, 0.8182 para daño extensivo y 1.3636 para daño completo). Estos valores fueron obtenidos de la columna central de cada uno de los grupos de columnas de la Figura VI-2.

El costo de reparación de un puente se obtiene mediante el producto de la probabilidad de falla por la relación del costo de la pérdida esperada por el costo de construcción de un puente nuevo por metro cuadrado. Para calcular el costo total de un puente con refuerzo, al cálculo anterior se agrega el costo de reparación, mano





de obra, más el costo del refuerzo. Con base en esto, podemos definir el costo total del refuerzo/rehabilitación esperado por medio de la ecuación VI-1.

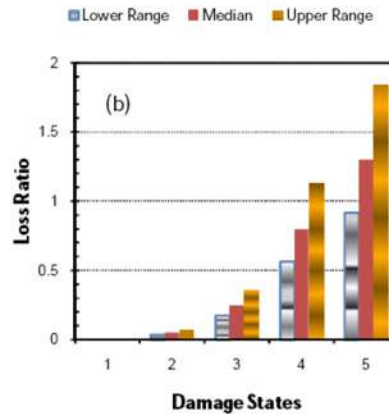


Figura VI-2 Relación de las razones de costo y los estados de daño. (Sircar, et al., 2008)

$$CTPSR = PF * RC * CP + CSR$$

VI-1

donde:

$CTPSR$  = costo total del puente con el sistema de refuerzo.

$PF$  = probabilidad de falla.

$RC$  = relación de costo de la pérdida esperada.

$CP$  = costo de construcción de un puente nuevo por metro cuadrado.

$CSR$  = costo del sistema de refuerzo.





## VI.2.1. Costos

Los costos que se consideraron para estimar el beneficio de pilas mediante encamisados de acero son los que se muestran en la ecuación VI-1. Por un lado el costo de construcción por metro cuadrado de puentes típicos en México, y por el otro lado el costo de la camisa metálica. Dichos costos se describen a continuación.

### VI.2.1.1. Costo De Los Puentes Típicos En México

Al no contar con una base de datos que permita determinar el costo de construcción y refuerzo de los puentes con geometría similar a la de los puentes que se construyen con mayor frecuencia en México, se asumieron los costos obtenidos en el trabajo desarrollado por Orozco (2013). En los resultados de su investigación se propone un costo por metro cuadrado de los puentes con geometría típica en el país de \$17,379.41. El valor propuesto considera las pérdidas económicas directa e indirecta. La primera de ellas representa el costo de reparación o remplazo de la estructura y la segunda corresponde a las consecuencias debidas a los daños ocasionados en las estructuras (aumento de materiales, suspensión de las vías de comunicación y pérdidas humanas). Adicionalmente, se deben agregar a este costo dos conceptos: la inflación que toma en cuenta el alza de precio en materiales, la mano de obra; y los costos indirectos de la obra. Ambos costos se consideraron y estimaron como función del costo directo, para lo cual se asumió que eran iguales al 30% del costo directo. Al tomar en cuenta lo antes descrito se obtuvo un costo por metro cuadrado de \$29,371.20. Haciendo las estimaciones pertinentes los costos obtenidos se presentan en la Tabla VI-I.

Tabla VI-I Costo de los Modelos de los Puentes

Costo De Los Modelos De Los Puentes.					
Modelo	Longitud (m)	Ancho del Puente (m)	Superficie (m <sup>2</sup> )	Costo/m <sup>2</sup>	Costo del Puente (\$)
1 y 2	40	10.85	434	29371.2	12,747,100.80
3 y 4	80	10.85	868	29371.2	25,494,201.60





**VI.2.1.2. Costo Del Encamisado Metálico**

El costo que se consideró para el encamisado de acero está integrado por el precio de la placa de acero y por el precio del material adicional, mano de obra, equipo y costos indirectos. Para reflejar estos aspectos en el costo del refuerzo se asume que su valor corresponde al 40% del precio del material. Para cada uno de los puentes de estudio se estimó el valor que representa el concepto antes descrito y se reportan en la columna 10 de la Tabla VI-II a la Tabla VI-V.

Para calcular el costo del material de acero necesario para realizar el refuerzo, se asumió que las columnas de la subestructura se reforzarán solamente en el punto donde se presenta la articulación plástica con una longitud de encamisado igual a la suma de la longitud de articulación plástica más 5 cm, así como el precio por kilogramo de acero igual a \$10.05 pesos (CostoNet, S.A. de C.V.). De la Tabla VI-II a la Tabla VI-V se ejemplifica el cálculo del encamisado de acero para los diferentes modelos. En dichas tablas se puede ver que el costo del encamisado está en función del diámetro de la columna y de la longitud de la articulación plástica. El costo total que se presenta en las tablas toma en cuenta el encamisado de las tres columnas que forman los puentes. A manera de resumen en la Figura VI-3 se muestran los costos totales de las Tabla VI-II a la Tabla VI-V. En la Figura VI-3 se muestra claramente el aumento del precio del encamisado de acero, esto se debe a que en la estimación del precio se toma en cuenta el diámetro de la columna, el espesor de la placa y la longitud del encamisado, lo cual crece como función del modelo 1 al 4.

**Tabla VI-II Costo Del Encamisado Del Modelo 1**

Costo Del Encamisado Del Modelo 1										
D (m)	Espesor De Placa	Área (m <sup>2</sup> )	L (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Y (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Precio Del Acero/kg	Costo de la Placa de Acero (\$)	Costo Adicional (\$)	Costo Total (\$)
1.15	0	0.00000	0.672	0.00000	7850	0.00	10.05	0.00	0.00	0.00
	3/8	0.01728		0.01160		91.07		915.29	366.12	3,844.22
	1/2	0.02307		0.01549		121.60		1222.07	488.83	5,132.68
	5/8	0.02887		0.01939		152.21		1529.68	611.87	6,424.65
	3/4	0.03470		0.02330		182.90		1838.13	735.25	7,720.15
	1	0.04639		0.03115		244.53		2457.55	983.02	10,321.73





Tabla VI-III Costo Del Encamisado Del Modelo 2

Costo Del Encamisado Del Modelo 2										
D (m)	Espesor De Placa	Área (m <sup>2</sup> )	L (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Y (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Precio Del Acero/kg	Costo de la Placa de Acero (\$)	Costo Adicional (\$)	Costo Total (\$)
1.25	0	0.00000	0.672	0.00000	7850	0.00	10.05	0.00	0.00	0.00
	3/8	0.01877		0.01261		98.96		994.55	397.82	4177.12
	1/2	0.02506		0.01683		132.11		1327.75	531.10	5576.55
	5/8	0.03137		0.02106		165.35		1661.78	664.71	6979.49
	3/4	0.03769		0.02531		198.67		1996.66	798.66	8385.96
	1	0.05038		0.03383		265.56		2668.92	1067.57	11209.46

Tabla VI-IV Costo Del Encamisado Del Modelo 3

Costo Del Encamisado Del Modelo 3										
D (m)	Espesor De Placa	Área (m <sup>2</sup> )	L (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Y (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Precio Del Acero/kg	Costo de la Placa de Acero (\$)	Costo Adicional (\$)	Costo Total (\$)
3.2	0	0.00000	0.900	0.00000	7850	0.00	10.05	0.00	0.00	0.00
	3/8	0.04795		0.04316		338.80		3404.92	1361.97	14300.67
	1/2	0.06396		0.05757		451.95		4542.15	1816.86	19077.01
	5/8	0.07999		0.07200		565.22		5680.49	2272.20	23858.07
	3/4	0.09604		0.08645		678.60		6819.96	2727.99	28643.85
	1	0.12818		0.11538		905.70		9102.28	3640.91	38229.58

Tabla VI-V Costo Del Encamisado Del Modelo 4

Costo Del Encamisado Del Modelo 4										
D (m)	Espesor De Placa	Área (m <sup>2</sup> )	L (m)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Y (kg/m <sup>3</sup> )	Peso (kg)	Precio Del Acero/kg	Costo de la Placa de Acero (\$)	Costo Adicional (\$)	Costo Total (\$)
3.3	0	0.00000	0.900	0.00000	7850	0.00	10.05	0.00	0.00	0.00
	3/8	0.04945		0.04451		349.37		3511.17	1404.47	14746.91
	1/2	0.06596		0.05937		466.05		4683.81	1873.52	19671.99
	5/8	0.08249		0.07425		582.84		5857.57	2343.03	24601.79
	3/4	0.09903		0.08914		699.75		7032.46	2812.98	29536.31
	1	0.13217		0.11897		933.89		9385.60	3754.24	39419.53



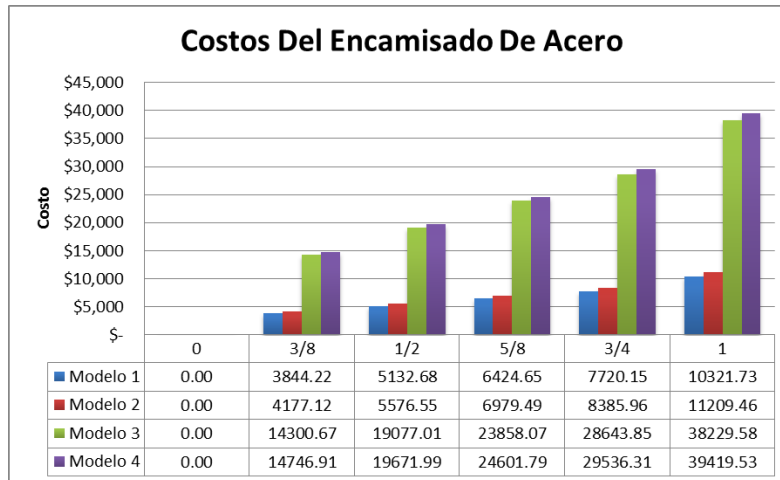


Figura VI-3 Comparativa de los costos del encamisado de acero en los diferentes modelos.

### VI.2.2. Determinación Del Espesor De La Placa De Acero Óptimo

Para conocer el espesor de la placa de acero óptimo se establecieron dos condiciones: la primera de ellas considera el efecto que tiene el espesor de la placa de acero en el incremento de la capacidad de resistencia a flexión de las columnas, mientras que en la segunda se considera el aumento del costo total que se tiene al implementar los diferentes espesores de placa.

Para poder hacer conclusiones y recomendaciones respecto del efecto que tiene el espesor de las placas, y como se considera que trabajan los encamisados de las columnas como función de las definiciones asumidas durante el proceso de análisis estructural (casing 0 y casing 1), se revisaron las curvas de ductilidad de la Figura V-28 a la Figura V-51. En estas figuras se puede observar que para una aceleración dada, al incrementar el espesor de placa de refuerzo muestra una disminución del daño que ésta presentaba para los casos sin refuerzos y con un espesor de placa menor, con base en esta observación podemos decir que el incremento del espesor de la placa de refuerzo sí tiene un efecto positivo en la resistencia a flexión de las pilas con geometría similar a la de los modelos de los caos de puentes considerados en este trabajo. Además, este fenómeno se amplifica cuando el casing es uno, esto significa cuando se considera que el encamisado contribuye a la resistencia y no solamente al confinamiento de la pila. Otro aspecto importante que nos permite verificar el efecto positivo que presentó esta técnica de refuerzo, se puede observar en el cambio de la posición de los puntos de desempeño, como se muestra





en la Figura VI-4, donde los puntos de desempeño tienden a localizarse en la zona de la izquierda de las curvas de capacidad (zona elástica), esta tendencia se agudiza conforme aumenta el espesor de la placa. Con base en las observaciones anteriores podemos concluir que la implementación de esta técnica de refuerzo, encamisado de acero modelado como casing 1, permite alcanzar incrementos apreciables de la capacidad a flexión de las columnas que conforman la subestructura de los modelos de los puentes considerados en este trabajo.

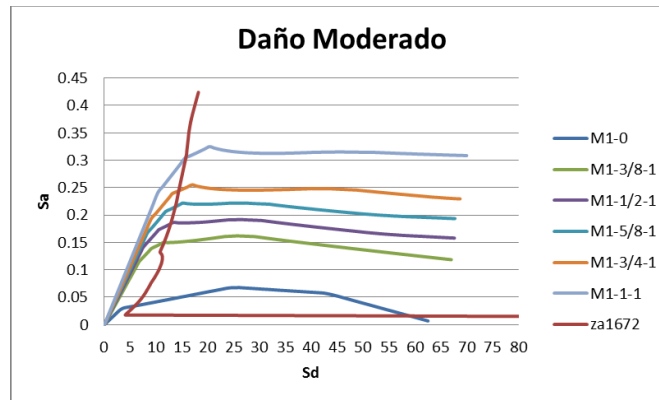


Figura VI-4 Cambio en la localización del punto de desempeño de la zona inelástica a la zona elástica por el efecto del aumento del espesor de la placa de acero.

Para tomar la decisión respecto al costo total del puente con el sistema de refuerzo a base de encamisado de placas de acero, costo-beneficio, se implementó la ecuación VI-1. Los resultados obtenidos de plantear la ecuación VI-1 para los modelos donde se consideró casing 1, contribución del refuerzo en la resistencia del elemento estructural, se presentan en la Figura VI-5, de donde se puede ver que no se refleja una diferencia importante entre los costos de refuerzos obtenidos para los diferentes espesores de camisas considerados en el trabajo. Por otro lado, se observa que la tendencia de los resultados de manera general se puede representar por un valor constante, por lo que concluimos que no hay necesidad de aplicar una regresión lineal o algún otro método para ajustar los datos y proponer una expresión que refleje la relación costo-beneficio del refuerzo mediante encamisados metálicos y su espesor.



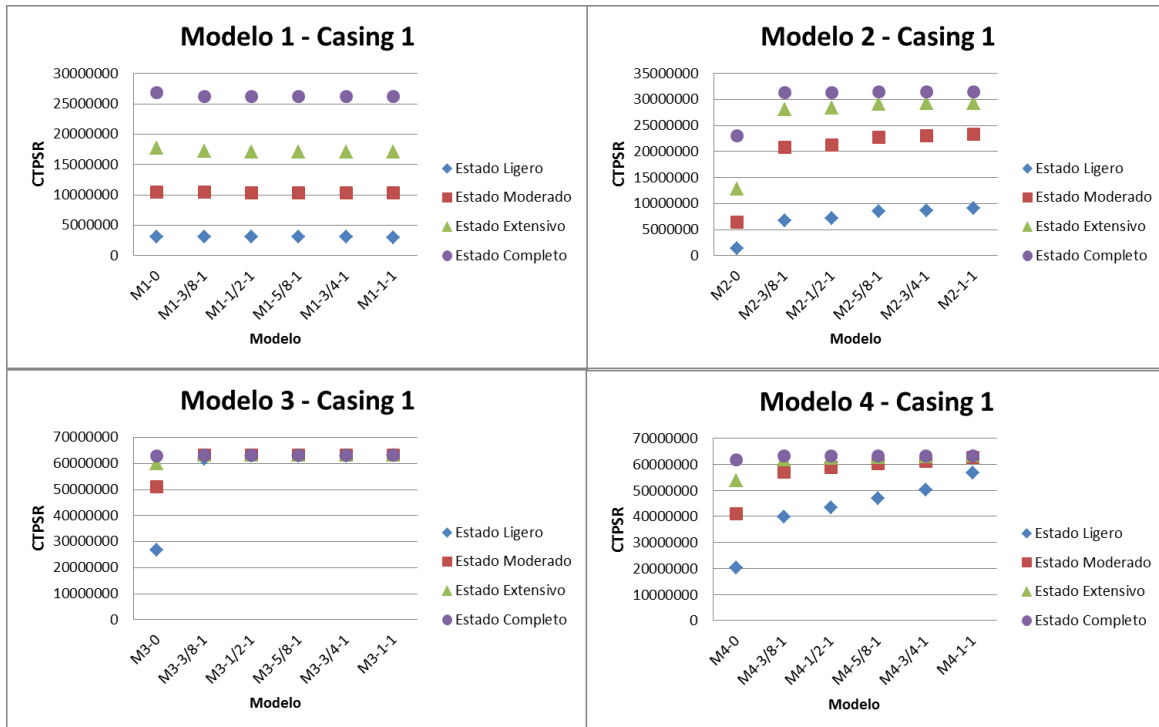


Figura VI-5 Costo total del puente con el sistema de refuerzo (CTPSR) obtenido por medio de la ecuación VI-1.

Tomando en cuenta los dos preceptos antes descritos (un mejor comportamiento y costo por parte de los diferentes espesores de placa de acero) se concluyó que el espesor de placa óptimo corresponde 3/8” para todos los casos considerados en este trabajo. El resultado se debió a que por un lado el espesor seleccionado nos brinda el aumento de capacidad de resistencia a flexión necesaria para prevenir que las pilas de los puentes presenten un daño importante ante diversas intensidades de demanda sísmica, además de que este valor nos ofrece el mínimo costo de refuerzo. Con base en el análisis de los resultados obtenidos se recomienda reforzar la pila de puentes con geometría similar a las aquí estudiadas con camisas de acero de 3/8".







# VII

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

**E**l objetivo principal de este trabajo fue el crear un modelo costo-beneficio para el sistema de refuerzo conocido como encamisados de acero y comúnmente implementado para el refuerzo de pilas de CR de puentes localizados en la red carretera Mexicana. El modelo costo-beneficio que se pensó en primera instancia que iba a surgir del trabajado efectuado eran expresiones que definieran el espesor de placa de acero óptimo, donde se vería reflejado el mejor comportamiento y costo mínimo de rehabilitación. Sin embargo, el resultado final a que se llegó con base en los resultados obtenidos de los análisis paramétricos desarrollados, nos llevaron a la conclusión de que el espesor de las placas de acero para reforzar las pilas de CR mediante dicha técnica es en general para todos los casos  $3/8''$ , esta alternativa cumple con las dos condiciones establecidas como criterios de comportamiento y costo mínimo de reparación. A continuación se presenta a manera de resumen cada una de las etapas que siguieron para llegar al resultado obtenido.

La demanda que se usó en el análisis de los modelos de los puentes fue aquella que nos reprodujera en cierta forma las condiciones sísmicas de la zona de la costa del pacífico. Por lo que se hizo uso de la Base Mexicana de Sismo Fuertes para obtener los acelerogramas registrados en estaciones cercanas a la Costa del Pacífico. Asimismo, los modelos analíticos que se plantearon corresponde a puentes que tuviesen una gran similitud con la geometría que presentan los puentes típicos construidos en la red carretera Mexicana, los cuales fueron excitados con la demanda antes definida y se estimó su comportamiento mediante de análisis pushover. Como resultado de esos estudios se obtuvieron curvas de fragilidad, las cuales, nos permiten estimar como la demanda sísmica afecta a los modelos de los puentes en su capacidad de resistencia a flexión. Cabe señalar que en este trabajo se estudió el efecto que tienen el encamisado si su proceso constructivo tiene como finalidad mejorar solamente la capacidad a ductilidad de las pilas, método constructivo que proporcione solamente confinamiento a la pila, o implementación de un método constructivo que permita que las camisas de acero contribuyan en la capacidad a flexión de la pilas, casos que se pueden considerar en el programa Sap2000 mediante el parámetro casing 0 y





casing 1. De los resultados obtenidos de los análisis pushover se determinó que el encamisado debe colocarse de tal forma que contribuya a la relación momento curvatura (casing 1) para obtener el resultado óptimo: mayor resistencia y menor costo de refuerzo. Adicionalmente, después de aplicar el modelo costo-beneficio se observó que la placa de 3/8" nos brindaba el mejor comportamiento y el costo mínimo y que no existen un incremento importante en la resistencia o en la disminución del costo de rehabilitación al incrementarse el espesor de las placas de refuerzo, concluyéndose así que este espesor es el óptimo para todos los casos de estudio.





## CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Como conclusión podemos decir que los resultados obtenidos en este trabajo difieren a los resultados que se esperaban obtener al inicio de la propuesta del mismo. En la propuesta inicial se pensaba obtener una influencia importante en la resistencia a flexión de las pilas como función del espesor de las placas, con lo que se obtendrían resultados que reflejarían una función costo-beneficio como función del espesor de las placas de acero de refuerzo. Sin embargo, los resultados presentaron un comportamiento constante en el costo de refuerzo al relacionarlo con el espesor de la camisa, indicándonos que el incremento que se alcanza en la resistencia a flexión de las pilas no es el suficiente para que sea reflejado en una disminución de las pérdidas esperadas y así disminuir su costo de rehabilitación. Siendo el resultado final que la placa de acero de refuerzo con espesor de 3/8" ofrece un aumento en la capacidad a flexión suficiente para que los cuatro casos de estudio (modelo 1 y 2 con claros de 20 m y longitud de pilas de 6 y 10 m respectivamente; modelo 3 y 4 con claros de 40 m y longitud de pilas de 6 y 10 m), alcancen las menores pérdidas después de la ocurrencia de terremotos que conduzcan a los puentes a los estados límite de daño considerados en este trabajo; además que esta opción ofrece el menor costo de refuerzo, ya que este es función del espesor de la placa (3/8", 1/2", 5/8", 3/4" y 1").

Para representar con una mejor aproximación la relación costo-beneficio, se propone como trabajo futuro:

- Tomar en cuenta un mayor número de geometrías que representen a los puentes de la Red Carretera Mexicana. Para tal fin, sería ideal contar con un inventario de puentes nacionales.
- Tomar un mayor número de acelerogramas para tener una mejor caracterización de la demanda.
- Hacer pruebas físicas de vibración ambiental como de modelos experimentales de las pilas con camisas de acero de los puentes que sirvan para calibrar los resultados obtenidos, y de esa manera tener una mejor comprensión del fenómeno real.
- Hacer pruebas de degradación del material del encamisado y esto relacionarlo con la capacidad que el encamisado produce.
- Realizar modelos costo-beneficio para encamisados implementados con otros tipos de materiales nuevos, como lo son las FRP.





## REFERENCIAS

ACI Committe 440, 2002. *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures (ACI 440.2R-02)*, Farmington Hills, Mich.: s.n.

Akbari, R., 2010. Seismic Fragility Analysis Of Reinforced Concrete Continuous Span Bridges With Irregular Configuration. *Structure and Infrastructure Engineering*.

Al-Mahaidi, R. & Kalfat, R., 2011. Investigation into CFRP laminate anchorage systems utilising bi-directional fabric wrap. *Composite Structures*, p. 1265–1274.

Buckle, I. et al., 2006. *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 - Bridges*, Buffalo: s.n.

COLA 1995, 1995. *Earthquake Hazard Reduction in Existing Reinforced Concrete Buildings and Concrete Frame Buildings with Masonry Infills*. City of Los Angeles: Unpublished.

Colombi, P. & Carlo, P., 2005. Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates. *Construction and building materials*, pp. 22-33.

CostoNet, S.A. de C.V., n.d. *CostoNet*. [Online]  
Available at: <http://www.costonet.com.mx/>  
[Accessed 24 Marzo 2013].

De Diego Villalón, A., Gutiérrez Jiménez, J. P. & Arteaga Iriarte, Á., 2008. *Utilización De Materiales Compuestos En La Construcción De Nuevos Puentes*. Madrid, s.n., pp. 1583 - 1592.

Elementa Soluciones Estructurales, 2005. *Elementa Soluciones Estructurales*. [En línea]  
Available at: <http://www.elese.cl/servicios/conocimiento/102-componentes-de-un-refuerzo.html>  
[Último acceso: 31 Enero 2012].

Federal Highway Administration (FHWA), 2006. *Seismic Retrofitting Manual for Highway Structures: Part 1 - Bridges*, Buffalo: s.n.

Grupo Solides, n.d. *Edificio Inteligente*. [Online]  
Available at: [http://www.gruposolides.com/03\\_soluciones02.htm](http://www.gruposolides.com/03_soluciones02.htm)  
[Accessed 26 Enero 2012].

Jackson, T. B., 1992. Seismic Retrofitting of Highway Bridges. In: *Bridge Inspection and Rehabilitation: A Practical Guide*. s.l.:John Wiley & Sons, INC, pp. 241-260.

Jara, M., Jara, J. M. & Álvarez, J. J., 2010. *Procedimientos de Evaluación y Rehabilitación de Pilas de Puentes Dañadas por Sismo*. Cordoba, Argentina, s.n.





Karsten, S. & Werner, S., 2007. Experimental and numerical investigations of bond between CFRP and concrete. *Construction and Building Materials*, p. 709–726.

Kramer, S. L., 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Primera ed. s.l.:Prentice Hall.

Mander, J. B., 1999. Fragility Curve Development For Assessing The Seismic Vulnerability Of Highway Bridges. *Research Progress and Accomplishments*, pp. 89-98.

Mirmiran, A. & Shahawy, M., 1996. A new concrete-filled hollow FRP A new concrete-filled hollow FRP. *Elsevier Science Limited*, pp. 263-268.

Molinares Amaya, N., 2003. Sistemas de Control Pasivos y Activos de Aislamiento de Base para Edificios Sometidas a Acciones Sísmicas. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*, Issue 14, pp. 60-92.

Montanaro, M. I., 2002. *Sistemas de Control de Vibraciones en Estructuras de Gran Altura.*, s.l.: s.n.

Nova Ágora, S.L, 2011. *interempresas.net*. [En línea]

Available at: [http://www.interempresas.net/Cerramientos\\_y\\_ventanas/Articulos/49535-Refuerzo-de-estructuras-con-materiales-compuestos-\(FRP\).html](http://www.interempresas.net/Cerramientos_y_ventanas/Articulos/49535-Refuerzo-de-estructuras-con-materiales-compuestos-(FRP).html)

[Último acceso: 26 Enero 2012].

Olmos, B. A., Roesset, J. M. & Jara, J. M., 2010. *Efectos dinámicos de sistemas de disipación de energía en la respuesta de puentes localizados en suelos de flexibilidad intermedia*. Cordoba, Argentina, s.n.

Orozco, M. A., 2013. *Modelos De Pérdida De Puentes De Longitud Media*, Tesis de maestría, División de Estudios de Postgrado, UMSNH: ..

Oviedo, J. A. & Duque, M. d. . P., 2006. Sistemas de Control de Respuesta Sísmica en Edificaciones. *Revista EIA*, Issue 6, pp. 105-120.

Padgett, J. E., Dennemann, K. & Ghosh, J., 2010. Risk-based seismic life-cycle cost-benefit (LCC-B) analysis for bridge retrofit assessment. *Structural Safety*, Issue 32, pp. 165-173.

Padgett, J. E., 2007. *Seismic Vulnerability Assesment of Retrofitted Bridges Using Probabilistic Methods*, Tesis de doctorado, Georgia Institute of Thecnology: ..

Pérez Valcárcel, J., n.d. *Reparación y Refuerzo de Estructuras*. s.l.:Departamento de Tecnología de la Construcción (Universidad de la Coruña).

Priestley, M. J. N., Seible, F. & Calvi, G. M., 1996. *Seismic Design And Retrofit Of Bridges*. Primera ed. Ney York: John Wiley & Sons, Inc..

Raina, V. K., 1996. *Concrete Bridge "Inspection, Repair, Strengthening, Testing and Load Capacity Evaluation"*. s.l.:McGraw-Hill, Inc..





Rendón Ospina, J. & Zambrano López, J., 2007. Refuerzo de Estructuras Frente a un Sismo. En: *Rehabilitación y Mantenimiento de Estructuras de Concreto*. s.l.:Paulo Helene & Fernanda Pereira Editores.

Schnerch, D., Dawood, M., Rizkalla, S. & Summer, E., 2007. Proposed Design Guidelines for Strengthening of Steel Bridges with FRP Materials. *Construction and Building Materials*, Issue 21, pp. 1001-1010.

Sircar, J., Mander, J. B. & Damjanovic, I., 2008. Loss Model For Seismically Damaged Bridges. *Segundo Simposio Internacional de Diseño de Puentes*, pp. 1-13.

Spencer, B. & Sain, M., 1997. Controlling Buildings: A New Frontier in Feedback. *IEEE Control Systems Magazine on Emerging Technology*, 17(6), pp. 19-35.

The Wikimedia Foundation, Inc., 2011. *Wikipedia*. [En línea]  
Available at: [http://en.wikipedia.org/wiki/Fibre-reinforced\\_plastic](http://en.wikipedia.org/wiki/Fibre-reinforced_plastic)  
[Último acceso: 25 Enero 2012].

Tíripiti Zacarías, H., 2012. *Influencia de Encamisados de Concreto en la Probabilidad de Falla de Puentes de Concreto Reforzado*, Tesis de maestría, División de Estudios de Postgrado, UMSNH: ..

Tsai, K.-C. & Lin, M.-L., 2002. Seismic Jacketing of RC Columns for Enhanced Axial Load Carrying Performance. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 25(4), pp. 389-402.

Villanueva Monroy, D., 2011. *Parámetros Óptimos de un Sistema de Aislamiento para Puentes Irregulares en Altura*, Tesis de maestría, División de Estudios de Postgrado, UMSNH: ..

Yan, Z., Pantelides, C. P. & Reaveley, L. D., 2008. *Seismic Retrofit of Bridge Columns Using Fiber Reinforced Polymer Composite Shells and Shape Modification*. Beijing, s.n.





# APENDICE



En este apéndice se muestran las tablas con base de datos para la evaluación de las curvas de fragilidad considerando la ductilidad de curvatura como estado límite de daño. Los intervalos usados para designar los diferentes estados límite de daño fueron tomados de Priestley, et al., (1996).

**Tabla A. 1 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-0**

M1-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.003978	0.00722952	76.52	1.8	0.41739402	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.01197351		3.0	0.92191737	0.6	Moderado	Daño en los costados
534		0.02133131		5.4	1.4993968	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.05223216		13.1	2.3949192	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

**Tabla A. 2 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-3/8-0**

M1-3/8-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.00401	0.00738088	62.15	1.8	0.43010121	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.01219278		3.0	0.93205303	0.6	Moderado	Daño en los costados
534		0.02071105		5.2	1.46187593	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.05965537		14.9	2.519793	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

**Tabla A. 3 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-1/2-0**

M1-1/2-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.003998	0.00707346	62.15	1.8	0.39055588	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.01210307		3.0	0.92766477	0.6	Moderado	Daño en los costados
534		0.02040057		5.1	1.44976882	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.05932302		14.8	2.51720319	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal





Tabla A. 4 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-5/8-0

M1-5/8-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.003989	0.00712882	62.15	1.8	0.40060557	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.0121277		3.0	0.93195125	0.6	Moderado	Daño en los costados
534		0.02036486		5.1	1.45027053	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.05965433		15.0	2.52502609	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 5 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-3/4-0

M1-3/4-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.003981	0.00700288	62.15	1.8	0.38478881	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.01207641		3.0	0.92972128	0.6	Moderado	Daño en los costados
534		0.02026242		5.1	1.44723469	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.05926885		14.9	2.52055086	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 6 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-1-0

M1-1-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.004045	0.0071956	62.15	1.8	0.39598865	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.01236873		3.1	0.9376902	0.6	Moderado	Daño en los costados
534		0.02065819		5.1	1.45063049	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.05993156		14.8	2.51572177	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 7 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-3/8-1

M1-3/8-1		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.002284	0.00293002	62.15	1.3	0.06908017	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.00492423		2.2	0.58823866	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
534		0.0119548		5.2	1.47520428	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.0308227		13.5	2.42232303	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal







Tabla A. 8 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-1/2-1

M1-1/2-1		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi\gamma$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.002264	0.00308443	62.15	1.4	0.12923515	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.00515716		2.3	0.64325321	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
534		0.01179015		5.2	1.47013097	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.03057068		13.5	2.42290813	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 9 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-5/8-1

M1-5/8-1		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi\gamma$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.002247	0.00301305	62.15	1.3	0.11335682	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
322		0.00476639		2.1	0.57199291	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
534		0.01135416		5.1	1.43998821	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1191		0.02887644		12.9	2.37343021	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos

Tabla A. 10 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-3/4-1

M1-3/4-1		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi\gamma$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.002233	0.002233	62.15	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
322		0.00394048		1.8	0.38795705	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
534		0.01006341		4.5	1.32556013	0.6	Moderado	Daño en los costados
1191		0.02862029		12.8	2.37076989	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos

Tabla A. 11 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M1-1-1

M1-1-1		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi\gamma$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	0.002208	0.002208	62.15	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
322		0.00370036		1.7	0.33634223	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
534		0.00856665		3.9	1.17578945	0.6	Moderado	Daño en los costados
1191		0.02835619		12.8	2.37275822	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos





Tabla A. 12 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-0

M2-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi\gamma$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.003367	0.00445935	108.52	1.3	0.10098171	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.01042334		3.1	0.95002569	0.6	Moderado	Daño en los costados
600		0.01703718		5.1	1.44137582	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
908		0.04421812		13.1	2.39511244	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 13 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-3/8-0

M2-3/8-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi\gamma$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.00346	0.00424632	62.15	1.2	0.02478494	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.01361607		3.9	1.18998242	0.6	Moderado	Daño en los costados
600		0.0236135		6.8	1.74054998	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
908		0.06234994		18.0	2.71149418	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 14 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-1/2-0

M2-1/2-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi\gamma$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.003452	0.00418973	62.15	1.2	0.01368283	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.01358458		3.9	1.18998173	0.6	Moderado	Daño en los costados
600		0.02324122		6.7	1.72697364	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
908		0.06373551		18.5	2.73578805	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 15 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-5/8-0

M2-5/8-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi\gamma$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.003446	0.00417311	62.15	1.2	0.01144786	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.01328381		3.9	1.16933199	0.6	Moderado	Daño en los costados
600		0.02201752		6.4	1.67462439	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
908		0.06007174		17.4	2.67832545	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal





Tabla A. 16 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-3/4-0

M2-3/4-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\Phi\gamma$	$\Phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\Phi$	$\lambda = f(\mu\Phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.003441	0.0042904	62.15	1.2	0.04061705	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.01355299		3.9	1.19084485	0.6	Moderado	Daño en los costados
600		0.02348653		6.8	1.74066515	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
908		0.06578517		19.1	2.77063227	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 17 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-1-0

M2-1-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\Phi\gamma$	$\Phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\Phi$	$\lambda = f(\mu\Phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.003433	0.00422705	62.15	1.2	0.02806905	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.01346357		3.9	1.18655309	0.6	Moderado	Daño en los costados
600		0.02299696		6.7	1.72192744	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
908		0.06462447		18.8	2.75515865	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 18 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-3/8-1

M2-3/8-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\Phi\gamma$	$\Phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\Phi$	$\lambda = f(\mu\Phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.002013	0.00227463	62.15	1.1	-0.0578109	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.00456907		2.3	0.63968442	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
600		0.00633432		3.1	0.96635622	0.6	Moderado	Daño en los costados
908		0.01265162		6.3	1.65815883	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos

Tabla A. 19 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-1/2-1

M2-1/2-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\Phi\gamma$	$\Phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\Phi$	$\lambda = f(\mu\Phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.002038	0.00235578	62.15	1.2	-0.0350972	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.00410011		2.0	0.51904433	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
600		0.00574146		2.8	0.85574449	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
908		0.01092167		5.4	1.49877982	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos





Tabla A. 20 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-5/8-1

M2-5/8-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.001996	0.00236559	62.15	1.2	-0.0101178	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.00391394		2.0	0.49339948	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
600		0.00576173		2.9	0.88009227	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
908		0.00989672		5.0	1.42105862	0.6	Moderado	Daño en los costados

Tabla A. 21 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-3/4-1

M2-3/4-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.002018	0.00246756	62.15	1.2	0.02112188	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.00431049		2.1	0.5789442	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
600		0.00573095		2.8	0.86377483	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
908		0.00933868		4.6	1.35205754	0.6	Moderado	Daño en los costados

Tabla A. 22 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M2-1-1

M2-1-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
209	0.002001	0.00257139	62.15	1.3	0.07080119	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
500		0.00503833		2.5	0.74342743	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
600		0.00598555		3.0	0.91570176	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
908		0.00976319		4.9	1.40497196	0.6	Moderado	Daño en los costados

Tabla A. 23 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-0

M3-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0009843	0.00171492	87.93	1.7	0.37519183	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
888		0.00482006		4.9	1.40861146	0.6	Moderado	Daño en los costados
997		0.00682973		6.9	1.75710918	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1425		0.0137969		14.0	2.46026867	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal





Tabla A. 24 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-3/8-0

M3-3/8-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi\gamma$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0009922	0.00140227	85.01	1.4	0.16592251	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
888		0.00447779		4.5	1.32696018	0.6	Moderado	Daño en los costados
997		0.00693821		7.0	1.76487387	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1425		0.01737663		17.5	2.68295651	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 25 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-1/2-0

M3-1/2-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi\gamma$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0009932	0.00118765	85.01	1.2	-0.0012021	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
888		0.00449255		4.5	1.32924437	0.6	Moderado	Daño en los costados
997		0.0070199		7.1	1.77557259	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1425		0.01576887		15.9	2.58486119	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 26 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-5/8-0

M3-5/8-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi\gamma$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.000994	0.00118833	85.01	1.2	-0.0014329	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
888		0.00410281		4.1	1.23769035	0.6	Moderado	Daño en los costados
997		0.00682273		6.9	1.74627718	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1425		0.0155664		15.7	2.57113303	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 27 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-3/4-0

M3-3/4-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi\gamma$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0009915	0.00118959	85.01	1.2	0.00214869	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
888		0.00396292		4.0	1.20551623	0.6	Moderado	Daño en los costados
997		0.00653814		6.6	1.70618929	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1425		0.01366954		13.8	2.44370618	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal





Tabla A. 28 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-1-0

M3-1-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_V$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0009946	0.00119634	85.01	1.2	0.00468234	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
888		0.00402071		4.0	1.21687427	0.6	Moderado	Daño en los costados
997		0.00664335		6.7	1.71903057	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1425		0.014603		14.7	2.50664155	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 29 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-3/8-1

M3-3/8-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_V$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0006029	0.0006029	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
888		0.0006029		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
997		0.0006029		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
1425		0.00184652		3.1	0.93930585	0.6	Moderado	Daño en los costados

Tabla A. 30 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-1/2-1

M3-1/2-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_V$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0006115	0.0006115	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
888		0.0006115		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
997		0.0006115		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
1425		0.0006115		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño

Tabla A. 31 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-5/8-1

M3-5/8-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_V$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0006158	0.0006158	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
888		0.0006158		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
997		0.0006158		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
1425		0.0006158		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño





Tabla A. 32 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-3/4-1

M3-3/4-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0006227	0.0006227	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
888		0.0006227		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
997		0.0006227		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
1425		0.0006227		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño

Tabla A. 33 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M3-1-1

M3-1-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	0.0006313	0.0006313	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
888		0.0006313		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
997		0.0006313		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
1425		0.0006313		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño

Tabla A. 34 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-0

M4-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0009436	0.00147927	119.93	1.6	0.2695999	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
693		0.00295235		3.1	0.9606554	0.6	Moderado	Daño en los costados
824		0.00496111		5.3	1.4796816	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1587		0.01292366		13.7	2.4371124	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 35 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-3/8-0

M4-3/8-0	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\phi_V$	$\phi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\phi$	$\lambda = f(\mu\phi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0009481	0.00162108	85.01	1.7	0.3563877	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
693		0.00319137		3.4	1.0337442	0.6	Moderado	Daño en los costados
824		0.0052103		5.5	1.5239336	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1587		0.01989152		21.0	2.8635887	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal





Tabla A. 36 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-1/2-0

M4-1/2-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_y$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0009517	0.00164374	85.01	1.7	0.3664773	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
693		0.00319497		3.4	1.0310817	0.6	Moderado	Daño en los costados
824		0.0052139		5.5	1.5208344	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1587		0.02142953		22.5	2.9342751	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 37 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-5/8-0

M4-5/8-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_y$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0009524	0.00164338	85.01	1.7	0.3655238	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
693		0.00325566		3.4	1.0491647	0.6	Moderado	Daño en los costados
824		0.00555892		5.8	1.5841734	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1587		0.02040152		21.4	2.8843798	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 38 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-3/4-0

M4-3/4-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_y$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0009529	0.00164352	85.01	1.7	0.3650884	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
693		0.00325498		3.4	1.0484321	0.6	Moderado	Daño en los costados
824		0.00555706		5.8	1.5833153	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1587		0.02064847		21.7	2.8958863	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 39 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-1-0

M4-1-0		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_y$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0009946	0.00168452	85.01	1.7	0.3468946	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
693		0.00329421		3.3	1.0175816	0.6	Moderado	Daño en los costados
824		0.00536303		5.4	1.5049432	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos
1587		0.02069958		20.8	2.8555278	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal







Tabla A. 40 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-3/8-1

M4-3/8-1		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_y$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0005821	0.0005821	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
693		0.0005821		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
824		0.00082254		1.4	0.1657577	0.6	Ligero	Grietas ligeras y desprendimiento parcial
1587		0.00899911		15.5	2.5582387	0.6	Colapso	Daños en toda la sección transversal

Tabla A. 41 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-1/2-1

M4-1/2-1		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_y$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0005888	0.0005888	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
693		0.0005888		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
824		0.0005888		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
1587		0.00710662		12.1	2.3106957	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos

Tabla A. 42 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-5/8-1

M4-5/8-1		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_y$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0005945	0.0005945	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
693		0.0005945		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
824		0.0005945		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
1587		0.00594222		10.0	2.122118	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos

Tabla A. 43 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-3/4-1

M4-3/4-1		Ductilidad De Curvatura						
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi_y$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0005997	0.0005997	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
693		0.0005997		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
824		0.0005997		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
1587		0.00374509		6.2	1.6517726	0.6	Severo	Daños principalmente en lados opuestos





Tabla A. 44 Valores base para encontrar el daño de ductilidad de curvatura del modelo M4-1-1

M4-1-1	Ductilidad De Curvatura							
A (cm/s <sup>2</sup> )	$\varphi\gamma$	$\varphi_{max}$	Lp (cm)	$\mu\varphi$	$\lambda = f(\mu\varphi, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	0.0006083	0.0006083	85.01	1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
693		0.0006083		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
824		0.0006083		1.0	-0.18	0.6	Despreciable	No hay daño
1587		0.00233445		3.8	1.1648634	0.6	Moderado	Daño en los costados





# APENDICE

En este apéndice se muestran las tablas con la base de datos para la evaluación de las curvas de fragilidad considerando la distorsión angular (drift) como estado límite de daño. Los intervalos usados para designar los diferentes estados límite de daño fueron tomados de Akbari (2010).

**Tabla B. 1 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-0**

M1-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	66.280	3.516	600	0.0059	-5.319577	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
322	85.644	6.117		0.0102	-4.765923	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
534	102.725	9.828		0.0164	-4.291654	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna
1191	153.719	24.543		0.0409	-3.376507	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

**Tabla B. 2 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-3/8-0**

M1-3/8-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	72.177	3.778	600	0.0063	-5.247814	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
322	90.383	6.136		0.0102	-4.76274	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
534	106.860	9.617		0.0160	-4.313376	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna
1191	183.591	26.122		0.0435	-3.314152	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna





**Tabla B. 3 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-1/2-0**

M1-1/2-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	72.519	3.785	600	0.0063	-5.24591	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
322	91.018	6.140		0.0102	-4.762089	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
534	107.981	9.645		0.0161	-4.310469	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna
1191	186.513	26.210		0.0437	-3.310777	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

**Tabla B. 4 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-5/8-0**

M1-5/8-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	72.735	3.786	600	0.0063	-5.245752	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
322	91.548	6.159		0.0103	-4.758999	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
534	108.745	9.672		0.0161	-4.307664	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna
1191	188.586	26.259		0.0438	-3.308925	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

**Tabla B. 5 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-3/4-0**

M1-3/4-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	72.961	3.792	600	0.0063	-5.244142	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
322	91.999	6.174		0.0103	-4.756534	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
534	109.286	9.671		0.0161	-4.307788	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna
1191	189.989	26.278		0.0438	-3.308213	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

**Tabla B. 6 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-1-0**

M1-1-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	72.903	3.793	600	0.0063	-5.243851	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
322	92.280	6.198		0.0103	-4.752784	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
534	110.279	9.735		0.0162	-4.301192	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna
1191	193.384	26.393		0.0440	-3.30385	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna





Tabla B. 7 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-3/8-1

M1-3/8-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	152.140	2.545	600	0.0042	-5.642995	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia
322	245.243	4.585		0.0076	-5.05414	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
534	293.719	7.373		0.0123	-4.579064	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1191	349.824	14.392		0.0240	-3.910292	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

Tabla B. 8 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-1/2-1

M1-1/2-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	170.754	2.461	600	0.0041	-5.676565	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia
322	276.806	4.413		0.0074	-5.092488	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
534	341.234	7.252		0.0121	-4.595666	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1191	411.266	14.506		0.0242	-3.902367	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

Tabla B. 9 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-5/8-1

M1-5/8-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	185.308	2.319	600	0.0039	-5.735707	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia
322	303.287	4.199		0.0070	-5.142202	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
534	386.506	7.088		0.0118	-4.618541	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1191	471.110	13.947		0.0232	-3.941644	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

Tabla B. 10 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-3/4-1

M1-3/4-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
153	186.826	1.917	600	0.0032	-5.926116	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia
322	312.934	3.679		0.0061	-5.27437	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
534	420.241	6.644		0.0111	-4.683276	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1191	529.300	13.994		0.0233	-3.93828	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna





Tabla B. 11 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M1-1-1

M1-1-1		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
153	190.289	1.590	600	0.0027	-6.11307	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia	
322	325.806	3.150		0.0052	-5.429622	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos	
534	460.597	5.827		0.0097	-4.814496	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
1191	644.442	14.294		0.0238	-3.917083	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	

Tabla B. 12 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-0

M2-0		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	46.617	5.933	1000	0.0059	-5.307192	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos	
500	65.355	14.789		0.0148	-4.393858	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	77.443	23.489		0.0235	-3.931227	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	
908	123.631	55.834		0.0558	-3.065381	0.6	Daño Completo	Colapso de la columna	

Tabla B. 13 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-3/8-0

M2-3/8-0		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	51.848	6.783	1000	0.0068	-5.173277	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos	
500	67.711	14.357		0.0144	-4.42349	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	79.003	21.484		0.0215	-4.020461	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	
908	124.948	50.481		0.0505	-3.166156	0.6	Daño Completo	Colapso de la columna	

Tabla B. 14 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-1/2-0

M2-1/2-0		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	51.991	6.792	1000	0.0068	-5.171951	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos	
500	67.927	14.279		0.0143	-4.429	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	79.171	21.294		0.0213	-4.029349	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	
908	125.005	49.882		0.0499	-3.178105	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	





**Tabla B. 15 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-5/8-0**

M2-5/8-0		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	52.416	6.714	1000	0.0067	-5.18359	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos	
500	67.969	13.936		0.0139	-4.453258	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	79.130	20.779		0.0208	-4.053832	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	
908	124.837	48.798		0.0488	-3.200058	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	

**Tabla B. 16 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-3/4-0**

M2-3/4-0		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	52.675	6.623	1000	0.0066	-5.197207	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos	
500	66.992	13.786		0.0138	-4.464116	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	78.007	21.046		0.0210	-4.041045	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	
908	122.869	51.647		0.0516	-3.143329	0.6	Daño Completo	Colapso de la columna	

**Tabla B. 17 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-1-0**

M2-1-0		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	52.573	6.725	1000	0.0067	-5.181908	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos	
500	66.421	13.965		0.0140	-4.451172	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	78.129	21.092		0.0211	-4.038852	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	
908	112.326	51.173		0.0512	-3.152537	0.6	Daño Completo	Colapso de la columna	

**Tabla B. 18 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-3/8-1**

M2-3/8-1		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	111.869	5.252	1000	0.0053	-5.429165	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos	
500	200.231	10.456		0.0105	-4.740589	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	223.650	12.193		0.0122	-4.58686	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
908	238.414	16.100		0.0161	-4.308961	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	





Tabla B. 19 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-1/2-1

M2-1/2-1		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	118.367	4.906	1000	0.0049	-5.497317	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia	
500	221.112	9.947		0.0099	-4.790464	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	246.699	11.527		0.0115	-4.643054	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
908	285.485	16.029		0.0160	-4.313343	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna	

Tabla B. 20 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-5/8-1

M2-5/8-1		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	130.507	4.681	1000	0.0047	-5.544244	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia	
500	239.818	9.415		0.0094	-4.84543	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	265.659	10.855		0.0109	-4.70312	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
908	315.268	14.523		0.0145	-4.412035	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	

Tabla B. 21 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-3/4-1

M2-3/4-1		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	138.461	4.548	1000	0.0045	-5.573156	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia	
500	258.112	9.217		0.0092	-4.866749	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	287.049	10.732		0.0107	-4.714572	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
908	341.387	14.231		0.0142	-4.432319	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	

Tabla B. 22 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M2-1-1

M2-1-1		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
209	157.415	4.240	1000	0.0042	-5.64331	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia	
500	293.238	8.902		0.0089	-4.901446	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
600	331.603	10.319		0.0103	-4.753797	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	
908	401.322	14.238		0.0142	-4.431827	0.6	Daño moderado	Perdida de sección	







Tabla B. 23 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-0

M3-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	504.912	0.859	600	0.0014	-6.729149	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1095.463	3.158		0.0053	-5.426959	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
997	1200.848	4.210		0.0070	-5.139372	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1425	1556.735	7.979		0.0133	-4.500129	0.6	Daño moderado	Perdida de sección

Tabla B. 24 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-3/8-0

M3-3/8-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	486.401	0.790	600	0.0013	-6.812399	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1076.468	3.077		0.0051	-5.453105	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
997	1165.602	4.393		0.0073	-5.096849	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1425	1468.069	9.010		0.0150	-4.378595	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

Tabla B. 25 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-1/2-0

M3-1/2-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	487.457	0.779	600	0.0013	-6.826546	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1085.415	2.988		0.0050	-5.482459	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
997	1182.996	4.254		0.0071	-5.129187	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1425	1501.997	8.533		0.0142	-4.433047	0.6	Daño moderado	Perdida de sección

Tabla B. 26 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-5/8-0

M3-5/8-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	487.629	0.775	600	0.0013	-6.831693	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1088.132	2.956		0.0049	-5.493228	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
997	1186.074	4.222		0.0070	-5.136573	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1425	1505.671	8.490		0.0142	-4.438041	0.6	Daño moderado	Perdida de sección





Tabla B. 27 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-3/4-0

M3-3/4-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	489.434	0.761	600	0.0013	-6.850052	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1101.829	2.819		0.0047	-5.540725	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
997	1211.642	4.018		0.0067	-5.186195	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
1425	1557.068	7.897		0.0132	-4.51051	0.6	Daño moderado	Perdida de sección

Tabla B. 28 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-1-0

M3-1-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	487.077	0.789	600	0.0013	-6.814172	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1086.283	2.999		0.0050	-5.478751	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
997	1184.816	4.256		0.0071	-5.128623	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1425	1506.872	8.501		0.0142	-4.436781	0.6	Daño moderado	Perdida de sección

Tabla B. 29 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-3/8-1

M3-3/8-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	504.992	0.309	600	0.0005	-7.751344	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1254.915	0.768		0.0013	-6.841025	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
997	1502.107	1.063		0.0018	-6.515835	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
1425	2017.945	1.728		0.0029	-6.029791	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia

Tabla B. 30 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-1/2-1

M3-1/2-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	505.928	0.283	600	0.0005	-7.839591	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1257.653	0.703		0.0012	-6.929328	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
997	1457.919	0.815		0.0014	-6.78162	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
1425	2076.661	1.161		0.0019	-6.427648	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia





Tabla B. 31 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-5/8-1

M3-5/8-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	507.685	0.256	600	0.0004	-7.939898	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1261.421	0.636		0.0011	-7.030273	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
997	1462.190	0.737		0.0012	-6.882504	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
1425	2082.958	1.049		0.0017	-6.528711	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia

Tabla B. 32 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-3/4-1

M3-3/4-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	508.730	0.240	600	0.0004	-8.005714	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1263.662	0.595		0.0010	-7.096628	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
997	1464.730	0.690		0.0011	-6.948718	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
1425	2086.704	0.983		0.0016	-6.594585	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia

Tabla B. 33 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M3-1-1

M3-1-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
223	510.810	0.207	600	0.0003	-8.152933	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
888	1268.117	0.513		0.0009	-7.244019	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
997	1469.779	0.595		0.0010	-7.096292	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
1425	2094.151	0.848		0.0014	-6.742276	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia

Tabla B. 34 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-0

M4-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	343.170	2.201	1000	0.0022	-6.29898	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
693	738.623	5.536		0.0055	-5.376483	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
824	827.689	7.534		0.0075	-5.068342	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1587	1168.332	20.502		0.0205	-4.067238	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna





Tabla B. 35 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-3/8-0

M4-3/8-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	349.598	2.207	1000	0.0022	-6.296257	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia
693	753.546	5.451		0.0055	-5.391975	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
824	838.469	7.282		0.0073	-5.102295	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1587	1210.378	20.519		0.0205	-4.066399	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

Tabla B. 36 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-1/2-0

M4-1/2-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	348.634	2.200	1000	0.0022	-6.299252	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia
693	748.283	5.448		0.0054	-5.39258	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
824	832.354	7.391		0.0074	-5.087492	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1587	1158.942	20.576		0.0206	-4.063615	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

Tabla B. 37 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-5/8-0

M4-5/8-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	348.932	2.209	1000	0.0022	-6.295442	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia
693	749.587	5.471		0.0055	-5.388385	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
824	835.139	7.446		0.0074	-5.080065	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1587	1162.371	20.602		0.0206	-4.062382	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

Tabla B. 38 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-3/4-0

M4-3/4-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	349.277	2.209	1000	0.0022	-6.295261	0.6	Casi ningún Daño	Primera Fluencia
693	750.363	5.467		0.0055	-5.38908	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos
824	835.375	7.427		0.0074	-5.082579	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1587	1164.442	20.601		0.0206	-4.062406	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna





Tabla B. 39 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-1-0

M4-1-0		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	349.939	2.206	600	0.0037	-5.785658	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
693	750.675	5.449		0.0091	-4.881498	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
824	835.077	7.365		0.0123	-4.580177	0.6	Daño moderado	Perdida de sección
1587	1169.659	20.601		0.0343	-3.55159	0.6	Daño extensivo	Colapso incipiente de la columna

Tabla B. 40 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-3/8-1

M4-3/8-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	453.927	1.085	1000	0.0011	-7.00636	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
693	993.206	2.374		0.0024	-6.223347	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
824	1173.576	3.050		0.0031	-5.972614	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
1587	1713.669	10.357		0.0104	-4.750064	0.6	Daño moderado	Perdida de sección

Tabla B. 41 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-1/2-1

M4-1/2-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	453.080	0.976	1000	0.0010	-7.111741	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
693	995.627	2.145		0.0021	-6.324522	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
824	1181.906	2.547		0.0025	-6.152957	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
1587	1849.273	9.041		0.0090	-4.886041	0.6	Daño moderado	Perdida de sección

Tabla B. 42 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-5/8-1

M4-5/8-1		Distorsión Angular (Drift)						
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño
189	459.856	0.901	1000	0.0009	-7.191561	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
693	1007.161	1.974		0.0020	-6.407541	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
824	1196.589	2.346		0.0023	-6.235257	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia
1587	1955.974	7.847		0.0078	-5.027688	0.6	Daño moderado	Perdida de sección





Tabla B. 43 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-3/4-1

M4-3/4-1		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
189	464.980	0.839	1000	0.0008	-7.2633	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia	
693	1015.595	1.832		0.0018	-6.482129	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia	
824	1207.482	2.179		0.0022	-6.309073	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia	
1587	2084.156	6.853		0.0069	-5.16304	0.6	Daños ligeros	Grietas y desprendimientos	

Tabla B. 44 Valores base para encontrar la distorsión angular (drift) del modelo M4-1-1

M4-1-1		Distorsión Angular (Drift)							
A (cm/s <sup>2</sup> )	V (ton)	D (cm)	H (cm)	$\theta$	$\lambda = f(\theta, \xi)$	$\xi$	Estado de Daño	Descripción de Daño	
189	472.288	0.731	1000	0.0007	-7.401371	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia	
693	1026.783	1.589		0.0016	-6.624776	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia	
824	1222.213	1.891		0.0019	-6.450544	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia	
1587	2241.057	4.831		0.0048	-5.51266	0.6	Casi ningun Daño	Primera Fluencia	

