

# 4.- DINÁMICA ESTRUCTURAL EN LOS CÓDIGOS DE DISEÑO: Acelerogramas vs. Espectros de Diseño.

*(Structural Dynamics in the Design Codes: Accelerogram vs. Design Spectrum)*

## INTRODUCCIÓN.-

El siguiente capítulo se encuentra dividido en tres partes con la finalidad del estudio de nuestros códigos de construcción donde se contempla el diseño sísmico.

La Parte A, se describen los códigos de diseño sísmico que se aplican en la ciudad de Hermosillo Sonora; la parte B, se presenta una evaluación entre los tres códigos objeto de estudio para observar las diferencias entre seguridad que se obtienen con la aplicación de cada uno de estos; y finalmente la parte C, donde se presenta la evaluación de cinco sismos históricos en un sistema con un grado de libertad (SDF's) para obtener los espectros sísmicos de cada uno, para después implementar la comparativa entre estos espectros y los espectros de diseño contemplados en los tres códigos de estudio.

Cada parte de este capítulo tiene como objetivo hacer la comparativa entre los códigos de diseño para la localidad y también una comparativa con cinco sismos conocidos.

**Parte A.-** Descripción de consideraciones para diseño sísmico en los códigos de construcción de Reglamento de Construcción de Hermosillo, Sonora (RCHS); Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF) y Código de Diseño Sísmico de CFE.

**Parte B.-** Evaluación y comparativa entre los tres códigos y la seguridad que cada uno representa en nuestras estructuras al momento de su aplicación.

**Parte C.-** Evaluación de cinco sismos históricos a través de un SDF's para obtener el espectro de pseudo- aceleración de cada sismo, para su comparativa con nuestros códigos de diseño.

## **PARTE A: CÓDIGOS DE DISEÑO**

**(Design Codes)**

### **4.1 CÓDIGOS DE DISEÑO.**

**(Design codes)**

En el presente capítulo analizare y estudiare tres diferentes códigos o manuales, los cuales son válidos para el análisis sísmicos de estructuras en la región. Los cuales son:

**1.- Reglamento de Construcción del Distrito Federal. (94)**

**2.- Reglamento de Construcción de Hermosillo, Sonora. (87)**

**3.- Manual de Diseño Sísmico de CFE. (93)**

Las consideraciones que se tomaran para la aplicación de estos tres códigos son:

- 1.- Se considerara la zona sísmica B, según la regionalización de CFE.
- 2.- Se consideraran un Factor de Ductilidad igual a la unidad  $Q=1$ .
- 3.- Se consideraran los espectros correspondientes para los tres códigos.
- 4.- Se aplicaran los espectros para los tres tipos de suelo.

Los tres códigos mencionados pueden ser aplicados en la localidad para el estudio y diseño de estructuras, por ello un objetivo de este estudio es comprar los resultados que se pueden obtener de los tres códigos en forma cuantitativa y también

el grado de mitigación en rango lineal de estos, en correlación a cinco sismos objetivos de estudios que son:

- 1).- “El Centro”, California, 1940. Magnitud= 6.95.
- 2).- Loma Prieta 1989, Corralitos 90. Magnitud= 6.93.
- 3).- Parkfield 1966, Cholame #2 65. Magnitud= 6.19.
- 4).- San Fernando 1971, Pacoima Dam 164. Magnitud= 6.61.
- 5.) Ciudad de México 1985, SCT1850919BT. Magnitud= 8.10.

En el desarrollo de este capítulo analizare la diferencia del coeficiente de cortante de basal que se aplican a las estructuras en función del *Periodo Natural de Vibración (Dinámica)*, para las estructuras que se diseñan con cada código, así como también, la relación del coeficiente basal que implica en cada código normalizándolo al código de la localidad, Reglamento de Construcción de Hermosillo, Sonora.

Para la correlación de los tres códigos considerare el estudio para cada uno de los tipos de suelo correspondientes y que pudieran encontrarse en su localidad.

También estudiare los cinco registros sísmicos anteriormente mencionados, en un ***Sistema de Un Simple Grado de Libertad (SDFs)***, esto con el fin de obtener la respuesta que tendrán estos sistemas. Y con ello obtener los espectros de *Pseudo-Velocidad*, *Pseudo-Desplazamiento* y *Pseudo-Aceleración*, para después correlacionarlos con los espectros de diseño que tenemos para cada uno de los códigos y para cada tipo de suelo.

## 4.2 ZONIFICACIÓN.

### (Zoning)

Con base a un estudio de riesgos sísmicos, se encontró que para fines de diseño sísmico la República Mexicana se encontrara dividida en cuatro zonas según la Figura 4.2.1.

Para efectos del reglamento de construcción de la ciudad de Hermosillo (1987), para el Manual de Diseño Sísmico de CFE (1993), y para el reglamento de construcción del DF (2004), se hacen las consideraciones de las zonas en base a la Figura.4.2.1.

Para fines de diseño sísmico, el Estado de Sonora se considera dividido en dos zonas sísmicas: B y C, para efectos del estudio de la ciudad de Hermosillo, se encuentra dentro de la zona sísmica: B.

La zona B se considera de menor intensidad sísmica, mientras que la zona C se considera de mayor intensidad y de probabilidad sísmica.

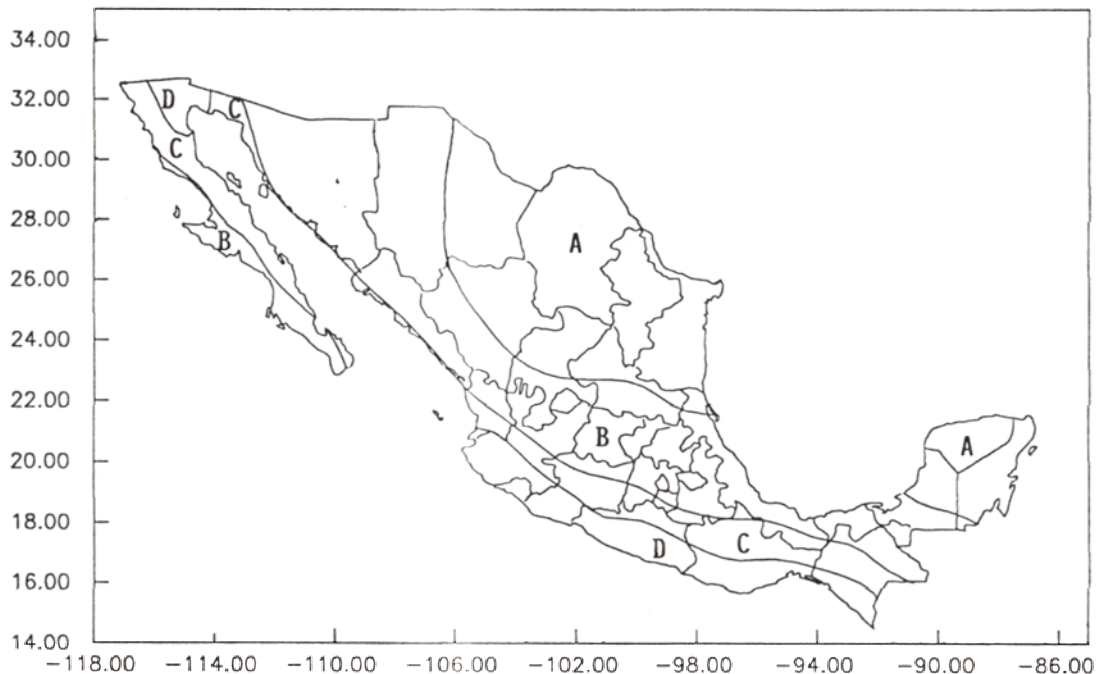


Fig.4.2.1. Regionalización sísmica de la república mexicana.

### 4.3 COEFICIENTE SÍSMICO, “c”.

#### (Seismic coefficient “c”)

El coeficiente sísmico “c”, es el cociente de la fuerza cortante horizontal que debe considerarse que actúa en la base de la edificación por efectos del sismo,  $V_b$ , como fracción del peso de la edificación sobre el mismo nivel,  $W_b$ .

Con este fin se tomara como base de la estructura el nivel a partir del cual sus desplazamientos con respecto al terreno circundante comienzan a ser significativo.

Para calcular el peso total de la estructura se deberá tomar las cargas muertas y vivas que se especifican en los mismos reglamentos para efectos sísmicos.

El coeficiente sísmico para las edificaciones clasificadas dentro del grupo B, se tiene, según Manual de Diseño Sísmico CFE 1993 (MDSCFE), Reglamento de Construcción de Hermosillo, Sonora (RCHS) y Reglamento de Construcción del Distrito Federal (RCDF), las Tabla 4.3.1, 4.3.2 y 4.3.4, respectivamente para cada código.

MANUAL DE DISEÑO SÍSMICO CFE 1993

Zona sísmica	Tipo de suelo	$a_0$	c	$T_a$ (s)	$T_b$ (s)	r
B	I	0.04	0.14	0.2	0.6	1/2
	II	0.08	0.3	0.3	1.5	2/3
	III	0.1	0.36	0.6	2.9	1

Tabla 4.3.1. Coeficientes sísmicos para Zona B y los diversos tipos de suelo, según MDSCFE.

REGLAMENTO DE CONSTRUCCIÓN DE HERMOSILLO. (1987)

Zona sísmica	Tipo de suelo	$a_0$	c	$T_a$ (s)	$T_b$ (s)	r
B	I	0.03	0.16	0.3	0.8	1/2
	II	0.045	0.2	0.5	2	2/3
	III	0.06	0.24	0.8	3.3	1

Tabla. 4.3.2. Coeficientes sísmicos para Zona B y los diversos tipos de suelo, según RCHS.

REGLAMENTO DE CONSTRUCCIÓN DEL DISTRITO FEDERAL. (2004)

Zona sísmica	Tipo de suelo	$a_0$	c	$T_a$ (s)	$T_b$ (s)	r
B	I	0.03	0.16	0.2	0.6	1/2
	II	0.045	0.32	0.3	1.5	2/3
	III	0.06	0.4	0.6	3.9	1

Tabla. 4.3.3. Coeficientes sísmicos para Zona B y los diversos tipos de suelo, según Bazan y Meli.

Tratándose de construcciones del Grupo A, estos valores de coeficientes sísmicos se multiplicaran por:

- Según MDSCFE: 1.50.
- Según RCHS: 1.30.
- Según RCDF: 1.50.

Notando que el factor de seguridad sísmica para estructuras del grupo A, se incrementan hasta en un 50% para MDSCFE y RCDF, mientras que para RCHS, solamente se incrementa en un 30%.

Este factor adicional se considera para edificaciones de suma importancia y todas aquellas que se requieren que sigan de pie después de un sismo de diseño.

#### **4.4 FACTOR DE REDUCCIÓN SÍSMICO “Q”.**

##### **(Seismic reduction factor “Q”)**

Con fines de diseño, las fuerzas sísmicas para análisis estático y los espectros para análisis dinámico modal, se calcularán en base a lo estipulado en cada uno de los reglamentos.

Siendo este factor, lo que permite hacer la reducción de fuerzas elásticas de diseño sísmico, mediante este factor que refleja la capacidad del sistema estructural para deformaciones inelásticas ante fuerzas laterales alternantes sin perder su capacidad (ductilidad).

Esto, dividiendo los coeficientes sísmicos para el análisis estático sobre el factor de reducción según las propiedades estructurales y el resultado se multiplica por el peso total del edificio ( $V_b=Wc/Q$ ). Y para el caso análisis dinámico modal se dividirán las ordenadas de los diversos espectros sobre el factor de reducción “Q”.

Respecto a los desplazamientos totales en los dos análisis, se deberán de multiplicar el desplazamiento total por “Q”, para obtener los desplazamientos reales que se tendrán en la estructura y para efectos de considerar efectos de segundo orden si  $\Delta/H \leq 0.08 V/W$ , o para efectos de considerar la separación entre edificios.

El factor “Q” podrá diferir en las dos direcciones ortogonales en las que se analizan la estructura. Este factor depende del comportamiento de la estructura y varía desde 1 a 4, dependiendo de los materiales estructurales, sistema estructural y el nivel de detalles en los elementos.

Para la aplicación del factor de ductilidad, las estructuras deberán de satisfacer los requisitos señalados en cada uno de los códigos, para efectos de este análisis consideraremos un factor de ductilidad igual a la unidad.

## 4.5 ESPECTRO DE DISEÑO.

### (Design Spectrum)

Cuando se aplica el análisis dinámico modal, este se hace bajo las hipótesis:

- I. La estructura se comporta elásticamente.
- II. La ordenada del espectro de aceleración para diseño sísmico,  $a$ , es expresada en fracción de la aceleración de la gravedad, esta se obtiene por las siguientes expresiones:

$$a = a_o + (c - a_o) \frac{T}{T_a}; \quad \text{Si } T < T_a.$$

$$a = c; \quad \text{Si } T_a < T < T_b.$$

$$a = c \left(\frac{T_b}{T}\right)^r; \quad \text{Si } T > T_b.$$

Los parámetros que intervienen en estas ecuaciones son los que se encuentran en las tablas 4.3.1 para MDSCFE, Tabla 4.3.2 para RCHS y Tabla 4.3.3 para RCDF.

- III. La ordenada espectral especificada tiene en cuenta los efectos de amortiguamiento, por lo que, no se deberá de hacer ninguna reducción al espectro a expensas del Factor de ductilidad.

Dicho análisis considera el coeficiente sísmico en fracción de la aceleración de la gravedad,  $a$ ; para el caso donde no se conoce el  $T_n$  (periodo natural de vibración de la estructura) se deberá de tomar el valor máximo correspondiente del espectro de diseño, en el caso contrario se podrá entrar a la tabla y obtener el coeficiente sísmico correspondiente en fracción de la gravedad, para cada periodo natural de la estructura.

En las Figuras 4.5.1, 4.5.2 y 4.5.3, podemos observar los espectros de diseño sísmico, que se pueden utilizar para la consideración de coeficiente sísmico para las fuerzas laterales, según MDSCFE Figura 4.5.1, RCHS Figura 4.5.2 y RCDF Figura

4.5.3. Podemos notar cómo para los tres códigos, los coeficientes sísmicos en fracción de la aceleración de la gravedad varían en valores, y siendo que los tres están considerados para una misma Zona B y para los mismos tipos de suelo.

El espectro para RCDF, es el que considera las ordenas más grandes, mientras que para el Reglamento de Construcción de Hermosillo, Sonora; se considera la ordenas más pequeñas.

De la misma forma, observando las Figuras 4.5.1 a 4.5.3 apreciamos que para el periodo natural de vibración de la estructura  $T_n=1.233$  seg, del primer modo, para los tres códigos el coeficiente sísmico varia.

El objetivo de este estudio es identificar según los tres códigos posibles a considerar para el análisis, el grado de demanda sísmica que estos representa a la estructura en estudio contra la capacidad sísmica-resistente del edificio obtenida por la curva ***Pushover*** (*Cortante basal - Desplazamiento*).

También, identificar el grado de daño que sufriría la estructura para los diferentes tipos de suelo, puesto que se diseñó bajo Zona B y tipo de suelo II, en particular con los otros tipos de suelo bajo lo que no se diseñó ( Tipo I y Tipo III).

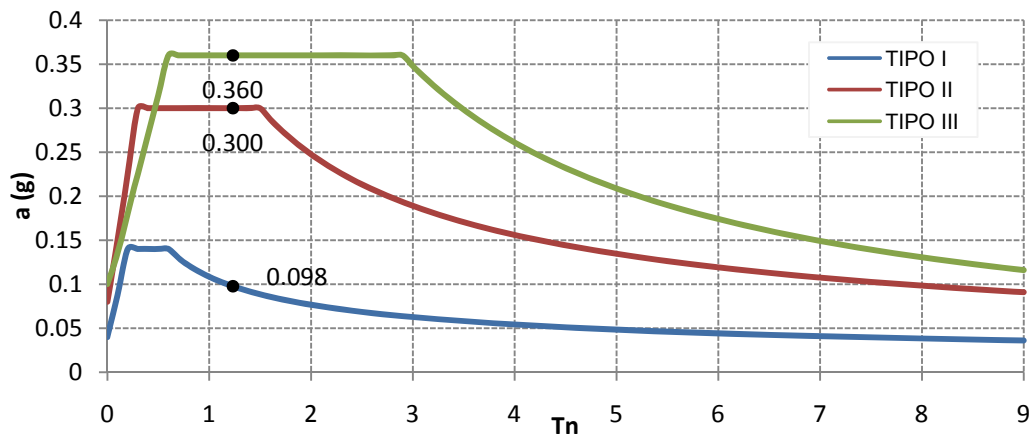


Fig. 4.5.1. Espectro de diseño sísmico, para Zona B y los diversos tipos de suelo, según el Manual de Diseño Sísmico de CFE 1993.

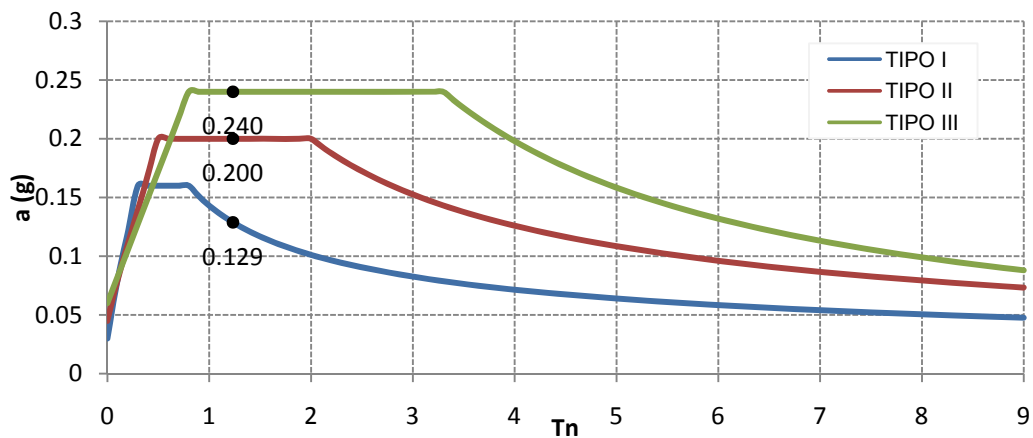


Fig. 4.5.2. Espectro de diseño sísmico, para Zona B y los diversos tipos de suelo, según el Reglamento de Construcción de Hermosillo, Sonora.

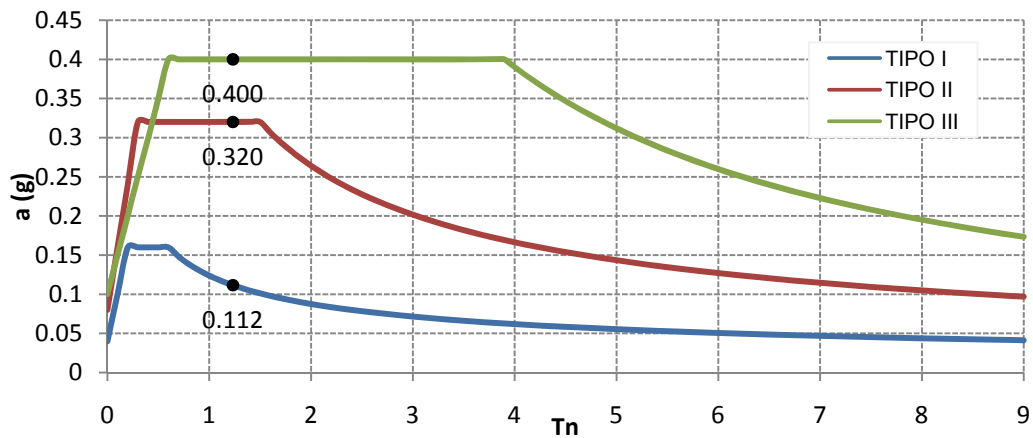


Fig. 4.5.3. Espectro de diseño sísmico, para Zona B y los diversos tipos de suelo, según el Reglamento de Construcción del Distrito Federal 2004.

## 4.6 CLASIFICACIÓN DE TERRENO SEGÚN SU RIGIDEZ.

### (Soil classification according of stiffness)

El movimiento del suelo en sitios de terreno blando es muy diferente del que ocurre en terreno firme debido a la amplificación dinámica por efectos locales que sufren las ondas sísmicas al propagarse a través de formaciones de suelos blandos.

Las interfaces entre estratos y las fronteras laterales producen un fenómeno de difracción múltiple que genera interferencias constructivas y destructivas que a su vez originan amplificaciones y atenuaciones, respectivamente. La amplificación de sitio que experimenta el movimiento sísmico constituye un efecto fundamental del cual depende la caracterización de los depósitos de suelo para fines de microzonificación sísmica.

La respuesta de un depósito de suelo ante excitación sísmica es función de varios factores que están relacionados con la irregularidad de la geometría y la heterogeneidad de los materiales que definen el depósito.

Para fines prácticos, esta complejidad se puede reducir si la amplificación de las ondas sísmicas debida a efectos locales se relaciona exclusivamente con dos parámetros que miden las características más relevantes del depósito real, tales como son el periodo dominante de vibración y la velocidad efectiva de propagación del sitio.

Atendiendo a la respuesta del sitio ante excitación sísmica se adopta una clasificación del terreno de cimentación según su estratigrafía, que es función del periodo dominante de vibración y la velocidad efectiva de propagación del sitio.

Una vez conocidos los parámetros dinámicos del sitio, el terreno de cimentación se clasifica en:

**TIPO I:** Depósitos de suelo formados solamente por estratos con velocidad de propagación de 700 m/s o módulo de rigidez de 8000 Ton/m<sup>2</sup>. Terreno firme, tal como tepetate, arenisca medianamente cementada, arcilla muy compacta o suelos con

características similares. (Roca:∞ Golpes SPT,  $\gamma_s=2.0 \text{ T/m}^3$  o Suelo Firme: >50 Golpes SPT,  $\gamma_s=1.8 \text{ T/m}^3$ )

**TIPO II:** Suelos de baja rigidez, tal como arenas no cementadas o limos de mediana o alta compacidad, arcillas de mediana compacidad o suelos de características similares. (15-50 Golpes SPT,  $\gamma_s=1.5 \text{ T/m}^3$ )

**TIPO III:** Arcillas blandas muy comprensibles. Los terrenos cuyas propiedades se desconozcan se supondrán pertenecientes al Tipo 3. (15< Golpes SPT,  $\gamma_s=1.3 \text{ T/m}^3$ )

Como un objetivo de mi estudio en el ramo de la clasificación de tipo de suelo, relacionare el cambio de demanda sísmica sobre la capacidad sísmica-resistente del edificio, en el caso donde se considere por especulación un tipo de suelo erróneo al suelo que existe realmente en el sitio.

Mostrando los cambios de cortante basal vs desplazamientos, que ocurrirán en la estructura por cambio de tipo de suelo, analizando el incremento o disminución de la seguridad que restara en el edificio por el hecho de una mala o errónea consideración del tipo de suelo.

## PARTE B: EVALUACIONES COMPARATIVA DE LOS CÓDIGOS. (Comparative Evaluation of codes)

### 4.7. ESPECTROS SÍSMICOS DE DISEÑO. (Design Seismic Spectrum)

Los espectros sísmicos de diseño, son lo que correlacionan los cortantes basales o fuerzas laterales que se deberán de inducir a la estructura para analizarla y diseñarla por fuerzas sísmicas aplicadas estáticamente.

Dichos espectros varían de acuerdo al código de cada ciudad, en mi caso me enfocare a los espectro que se manejan para los tres tipos de códigos (CFE, RCHS y RCDF) anteriormente mencionados.

Los espectros de diseño es la respuesta media a partir de las respuestas de un sistema de un grado de libertad, ante un número de sismo determinado y con ello se traza una envolvente que sea la media entre las respuestas de los sistemas antes los sismos seleccionados.

Los espectros sísmicos nos grafican las *pseudo-aceleración vs periodo fundamental*, el cual al estudiar el comportamiento dinámico de la estructuras obtenemos los modos de vibración de ésta y los periodos fundamentales, mismo valor se utiliza en el espectro para encontrar el *coeficiente sísmico basal "c"*, el cual se multiplica por el peso total del edificio, lo que nos resulta el cortante basal del mismo y se deberá de aplicar esta fuerza como fuerzas laterales según la forma modal en forma estática.

$$V_b = \frac{A}{g} w \quad 4.7.1$$

Donde  $c = A/g$ , que se obtiene del espectro del diseño y  $w$  es el peso total del edificio.

Es de interés el comparar los espectros de diseño de *pseudo-aceleración*, en los tres códigos aplicables en tres formas distintas, que son variando las propiedades de los suelos, desde la consideración del suelo más rígido (Tipo I) hasta el más flexible (Tipo III).

#### **4.7.1.1 SUELO TIPO I (Soil type I)**

Iniciare con el tipo de suelo I, el cual se considera entre un suelo de roca o muy denso, en este tipo de suelo las ondas sísmicas se transmiten muy rápido ( $V_s=720-360$  m/s), lo cual tiende a tener periodo de vibración muy bajo lo cual afectaría a estructuras muy rígidas por lograr producir el fenómeno de amplificación.

Hasta ahora según los códigos estudiados tiene espectros determinados para este tipo de suelo y para la zona, mismos que se pueden ver en la Figura 4.7.1.1.1 y 4.7.1.1.2.

En la figura 4.7.1.1.1, se puede apreciar los espectros de diseño para la zona B y tipo de suelo I, correspondiente al Grupo B de los tres códigos. Podemos estimar que para este caso el espectro del RCHS es consistentemente igual de seguro que los otros códigos, siendo aún más seguro para estructuras de largos periodos de vibración, mayores que  $T_n=0.60$  seg, siendo CFE el espectro de menor ordenada.

De igual forma, en la figura 4.7.1.1.2 los valores de las ordenas para CFE y RCDF se deberán de multiplicar por un factor de 1.5, mientras que RCHS se multiplica por un factor 1.3, esto en estructuras de suma importancia que deberán de estar de pie después de un sismo extraordinario. Observando que el espectro del RCDF se incrementa superiormente a los otros dos en  $T_n$  cortos, mientras que para  $T_n$  mas grandes tiende a tener los mismos valores que RCHS.

Es interesante estudiar y comparar el grado de seguridad que ofrece cada uno de estos códigos normalizados al código local RCHS, de forma inicial tenemos que las estructuras del Grupo A en los códigos RCDF y CFE se incrementa el espectro en un 50% más, mientras que para el código local RCHS se incrementa en un 30%.

En las figuras 4.7.1.1.3 y 4.7.1.1.4, se muestra una comparativa entre los tres códigos. Ésta es una relación de la pseudo-aceleración de cada espectro, en forma normalizada al espectro de la localidad RCHS.

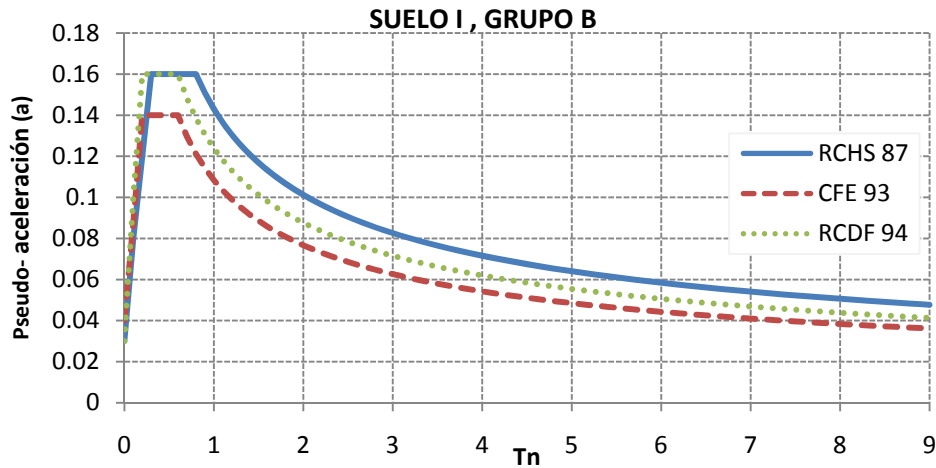


Figura. 4.7.1.1.1 Comparación del Espectros de Diseño de Pseudo-Aceleración, para Zona B.

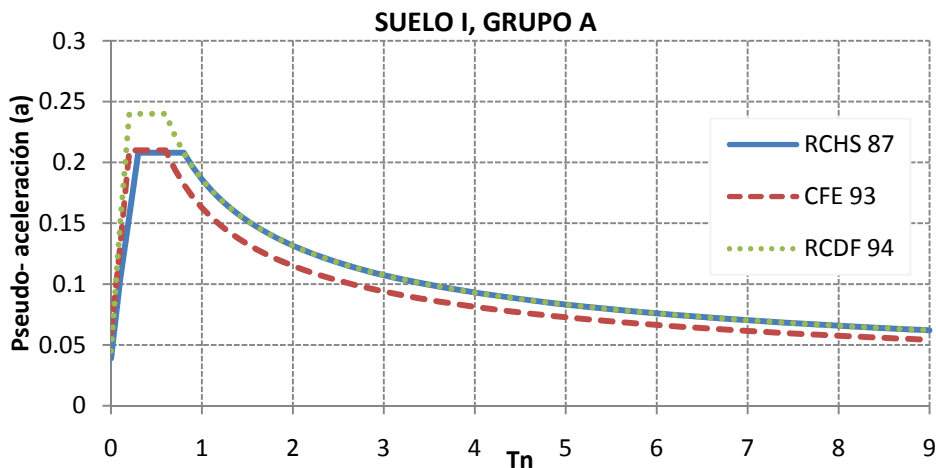


Figura. 4.7.1.1.2 Comparación del Espectros de Diseño de Pseudo-Aceleración, para Zona B.

Observaremos, que en el grupo B el reglamento local RCHS ofrece mejor seguridad para las estructuras de periodos largos ( $T_n > 0.2$  seg), mientras que para estructuras de periodo corto ( $T_n < 0.2$  seg) la seguridad es superior para los otros dos códigos RCDF y CFE.

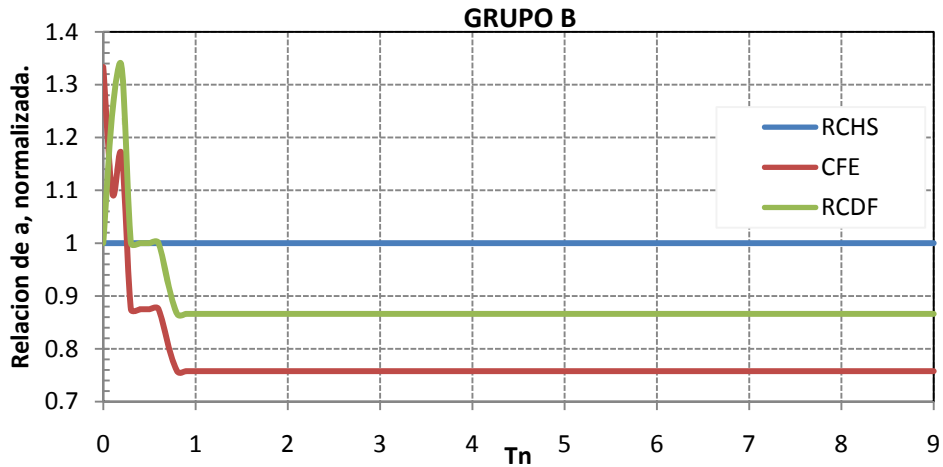


Figura. 4.7.1.1.3 Relación entre Pseudo-Aceleración de los tres códigos de diseño sísmico, normalizados al espectro de RCHS. Espectros de Diseño para Zona B.

También, se observa que en las estructuras del Grupo A, el código local RCHS tiende a tener menor seguridad en estructuras de periodo corto ( $T_n < 0.80 \text{seg}$ ), mientras que en estructuras con periodos mayores ofrece una seguridad similar al RCDF, siendo CFE el espectro con las menores ordenadas en este intervalo.

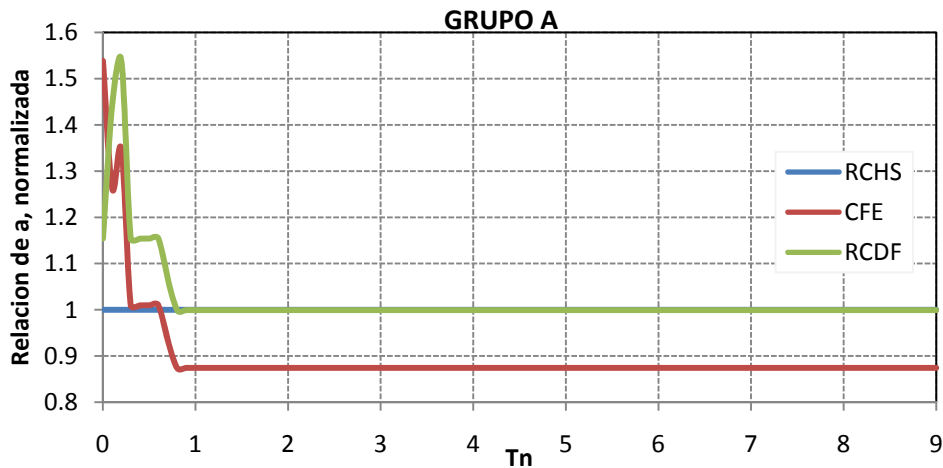


Figura. 4.7.1.1.4 Relación entre Pseudo-Aceleración de los tres códigos de diseño sísmico, normalizados al espectro de RCHS. Espectros de Diseño para Zona B.

La figura 4.7.1.1.5, está organizada en tres partes: a).- Comparativa de Cortante de Piso ( $F_j$ ); b).- Comparativa de cortante de piso normalizado al córtate basal del RCHS ( $F_j/V_b$ ) y c).- Relación de momento de volteo por piso normalizado al momento de volteo de base del RCHS ( $M_j/M_b$ ). La comparativa entre varias cantidades que representa cada uno de los códigos para las estructuras esta representadas en estas gráficas, muy en particular la relación que existe entre los cortantes basales que cada uno representa en la estructura, normalizados al código local (RCHS) siendo para cada uno  $V_{b\ CFE}=0.75$ ,  $V_{b\ RCHS}=1.00$  y  $V_{b\ RCDF}=0.86$ . Estos valores se ven representados en manera directa con la seguridad de la estructura.

De la figura 4.7.1.1.5a, se deduce que los cortantes de piso y en especial el cortante basal varia en proporción a los valores anteriormente expuestos, puesto que se dan en relación directa.

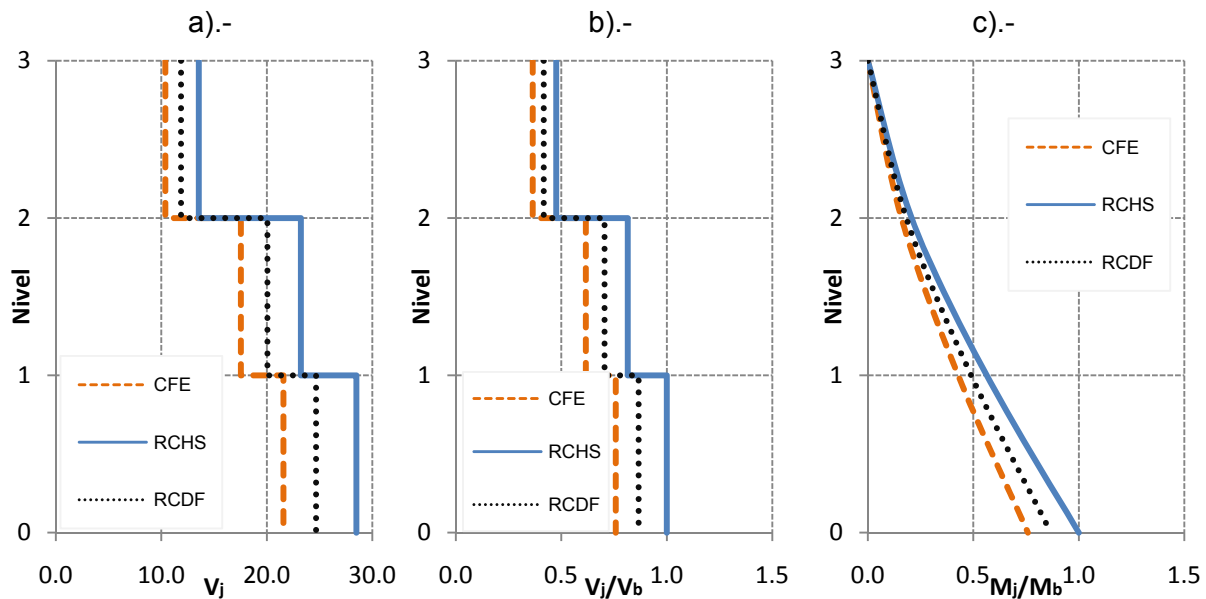


Figura. 4.7.1.1.5 Comparativa entre los tres códigos de diseño: a).- Comparativa de Cortante de Piso ( $F_j$ ), b).- Comparativa de cortante de piso normalizado al córtate basal del RCHS ( $F_j/V_b$ ), c).- Relación de momento de volteo por piso normalizado al momento de volteo de base del RCHS ( $M_j/M_b$ ).

### 4.7.1.2 SUELO TIPO II (Soil type II)

El tipo de suelo II, el cual se considera entre un suelo medio denso; en este tipo de suelo las ondas sísmicas se transmiten a velocidades más baja ( $V_s=180$  m/s), lo cual tiende a tener periodo de vibración medios lo cual afectaría a estructuras medianas, las que convencionalmente existen en la ciudad de Hermosillo.

En la figura 4.7.1.2.1, observamos los espectros de diseño para la zona B y tipo de suelo II, correspondiente al Grupo B de los tres códigos. Podemos estimar que para este caso el espectro del RCHS es menor su ordenada en relación a los otros códigos, para periodos cortos y largos de vibración. Mientras que para estructuras del grupo A, figura 4.7.2, los valores de las ordenadas para CFE y RCDF son casi el doble del valor que implica la aplicación del RCHS. Tanto en periodos cortos y largos de vibración.

El grado de seguridad que ofrece cada uno de estos códigos normalizados al código local RCHS, de forma inicial tenemos que las estructuras del Grupo A en los códigos RCDF y CFE se incrementa el espectro en un 50% más, mientras que para el código local RCHS se incrementa en un 30%.

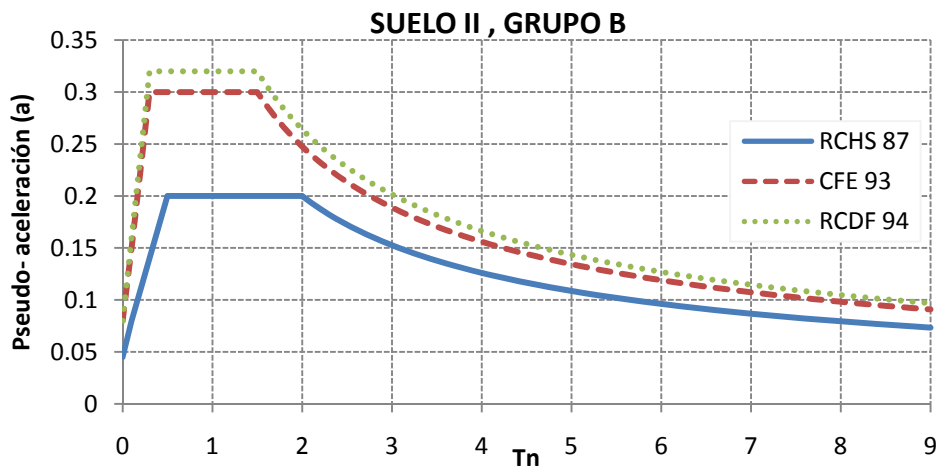


Figura. 4.7.1.2.1 Comparación del Espectros de Diseño de Pseudo-Aceleración, para Zona B.

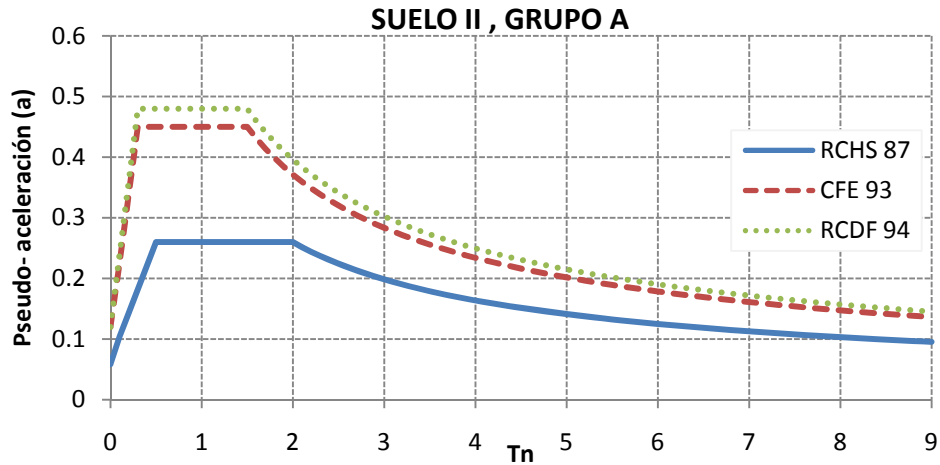


Figura. 4.7.1.2.2 Comparación del Espectros de Diseño de Pseudo-Aceleración, para Zona B.

En las figuras 4.7.1.2.3 y 4.7.1.2.4, se muestra una comparativa entre los tres códigos. Ésta es una relación de la pseudo-aceleración de cada espectro, en forma normalizada al espectro de la localidad RCHS.

Observamos que en el grupo B, el reglamento local RCHS tiende a tener las ordenadas menores en cuanto a las pseudo-aceleraciones, mientras que los códigos CFE y RCDF representan hasta 2.3 veces mayor la pseudo-aceleración para periodos de vibración cortos ( $T_n < 2.00$  seg) y 1.3 veces en periodos largos ( $T_n > 2.00$  seg).

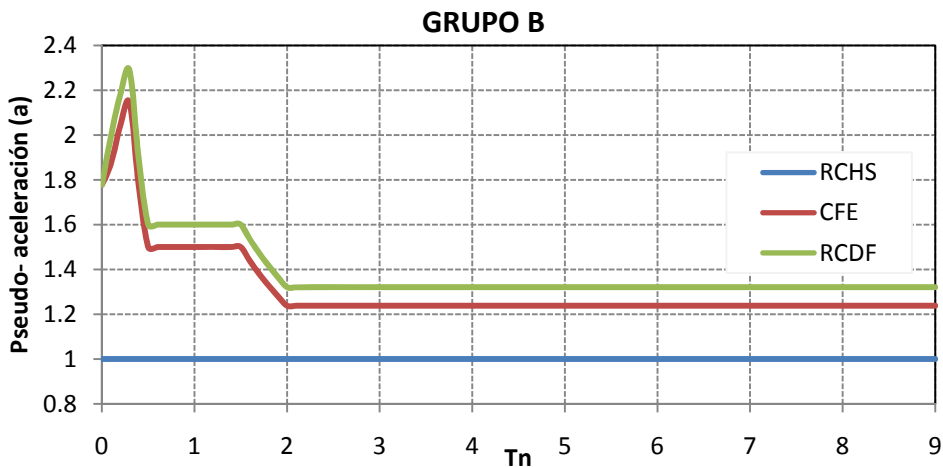


Figura. 4.7.1.2.3 Relación entre Pseudo-Aceleración de los tres códigos de diseño sísmico, normalizados al espectro de RCHS. Espectros de Diseño para Zona B.

También, se observa que en las estructuras del Grupo A, los códigos CFE y RCDF tienen ordenadas de “a” muy superiores a la del espectro del RCHS, hasta 2.6 veces mayor para periodos cortos ( $T_n < 2.00$  seg) y 1.5 veces en periodos largos de vibración ( $T_n > 2.00$  seg).

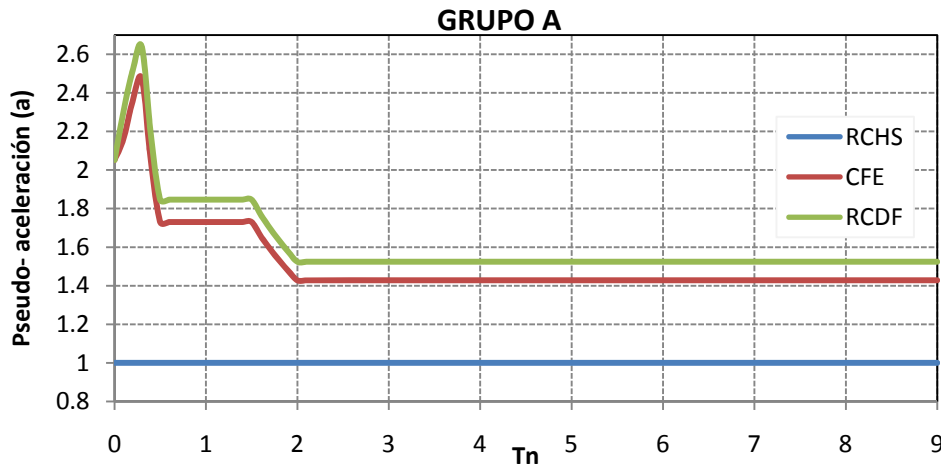


Figura. 4.7.1.2.4 Relación entre Pseudo-Aceleración de los tres códigos de diseño sísmico, normalizados al espectro de RCHS. Espectros de Diseño para Zona B.

La figura 4.7.1.2.5, está organizada en tres partes: a).- Comparativa de Cortante de Piso ( $F_j$ ); b).- Comparativa de cortante de piso normalizado al córtate basal del RCHS ( $F_j/V_b$ ) y c).- Relación de momento de volteo por piso normalizado al momento de volteo de base del RCHS ( $M_j/M_b$ ). La comparativa entre varias cantidades que representa cada uno de los códigos para las estructuras esta representadas en estas gráficas, muy en particular la relación que existe entre los cortantes basales que cada uno representa en la estructura, normalizados al código local (RCHS) siendo para cada uno  $V_b_{CFE}=1.50$ ,  $V_b_{RCHS}=1.00$  y  $V_b_{RCDF}=1.60$ . Estos valores se ven representados en manera directa con la seguridad de la estructura.

De la figura 4.7.1.2.5a, se deduce que los cortantes de piso y en especial el cortante basal varia en proporción a los valores anteriormente expuestos, puesto que se dan en relación directa.

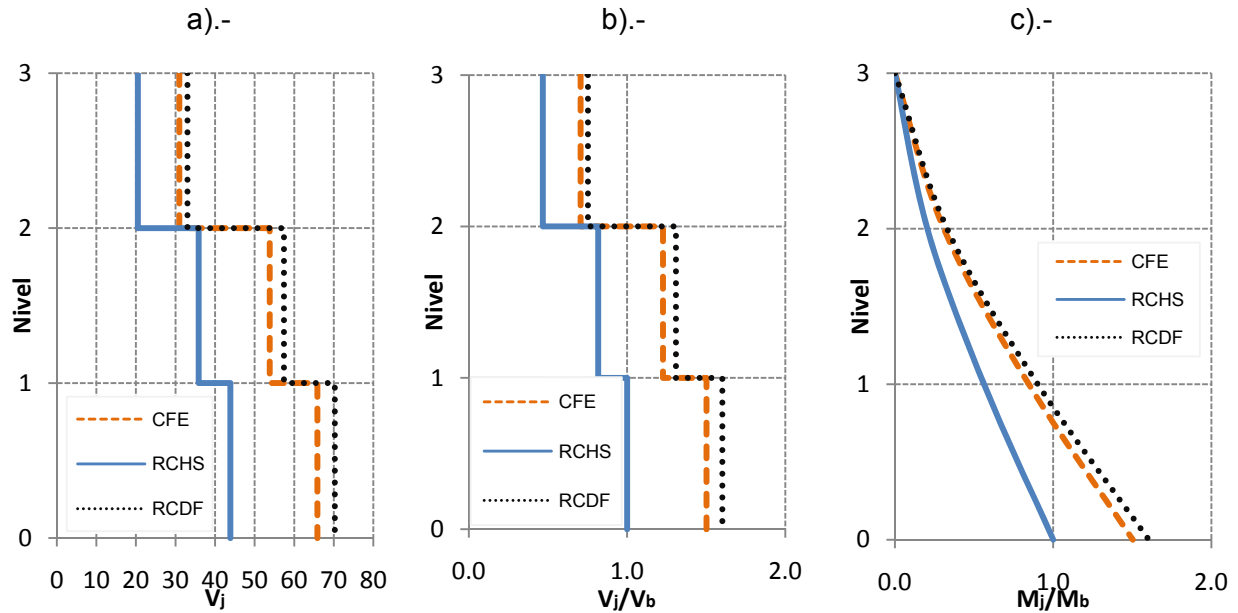


Figura. 4.7.1.2.5 Comparativa entre los tres códigos de diseño: a).- Comparativa de Cortante de Piso ( $F_j$ ), b).- Comparativa de cortante de piso normalizado al córtate basal del RCHS ( $F_j/V_b$ ), c).- Relación de momento de volteo por piso normalizado al momento de volteo de base del RCHS ( $M_i/M_b$ ).

### 4.7.1.3 SUELO TIPO III (Soil type III)

El tipo de suelo III, el cual se considera un suelo donde la roca firme se encuentra a profundidad suficiente como para presentarse movimientos dinámicos amplificados por efectos locales. Éste es un suelo blando ( $V_s=90$  m/s), este suelo tiene periodos de vibración largos, esto en relación al espesor de terreno sedimentado.

En la figura 4.7.1.3.1, observamos los espectros de diseño para la zona B y tipo de suelo III, correspondiente al Grupo B de los tres códigos. Podemos estimar que para este caso el espectro del RCHS es menor su ordenada en relación a los otros códigos, para periodos cortos y largos de vibración. Mientras que para estructuras del grupo A, figura 4.7.2, los valores de las ordenadas para RCDF son más del doble del

valor que implica la aplicación del RCHS, tanto en periodos cortos y largos de vibración. Mientras que para CFE las ordenadas son en promedio 1.6 veces mayores.

El grado de seguridad que ofrece cada uno de estos códigos normalizados al código local RCHS, de forma inicial tenemos que las estructuras del Grupo A en los códigos RCDF y CFE se incrementa el espectro en un 50% más, mientras que para el código local RCHS se incrementa en un 30%.

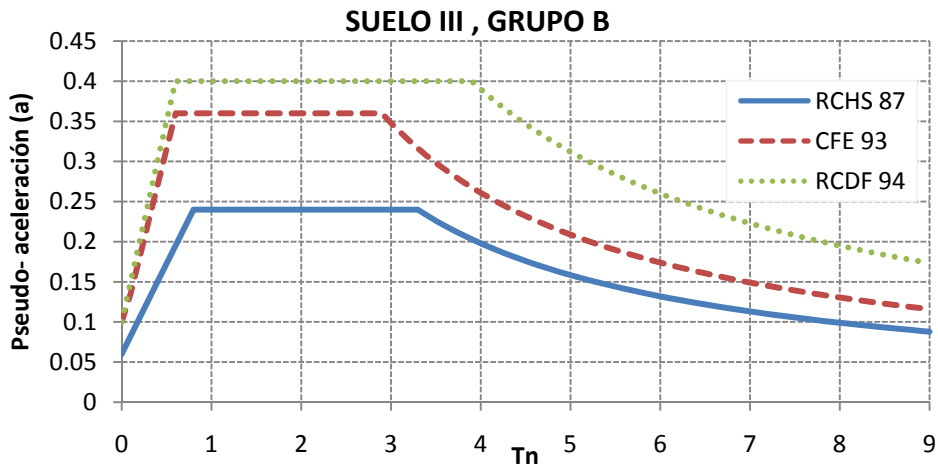


Figura. 4.7.1.3.1 Comparación del Espectros de Diseño de Pseudo-Aceleración, para Zona B.

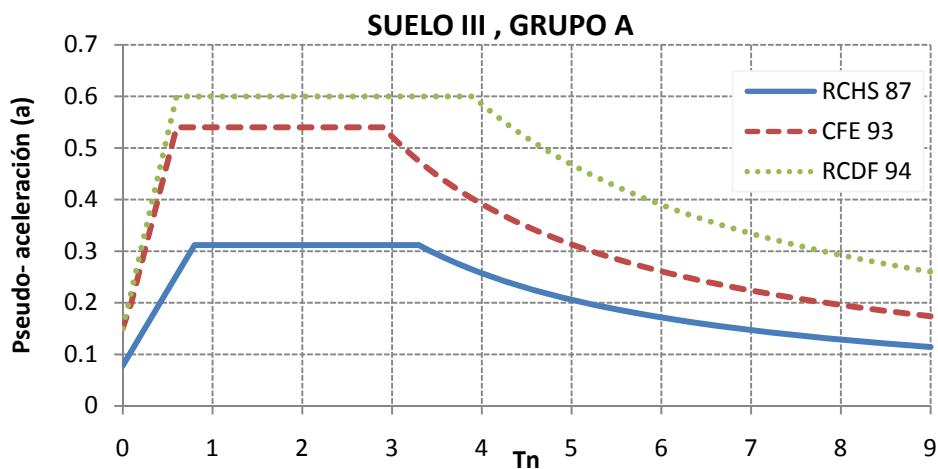


Figura. 4.7.1.3.2 Comparación del Espectros de Diseño de Pseudo-Aceleración, para Zona B.

En las figuras 4.7.1.3.3 y 4.7.1.3.4, se muestra una comparativa entre los tres códigos. Ésta es una relación de la pseudo-aceleración de cada espectro, en forma normalizada al espectro de la localidad RCHS. Observamos que en el grupo B, el reglamento local RCHS tiende a tener las ordenadas menores en cuanto a las pseudo-aceleraciones, mientras que los códigos CFE representa 1.5 veces mayor la ordenada para periodos cortos ( $T_n < 3.0$  seg) y de 1.3 veces para periodos largos de vibración. A su vez el RCDF simboliza un incremento en la seguridad en promedio mayor a 1.6 veces respecto al RCHS.

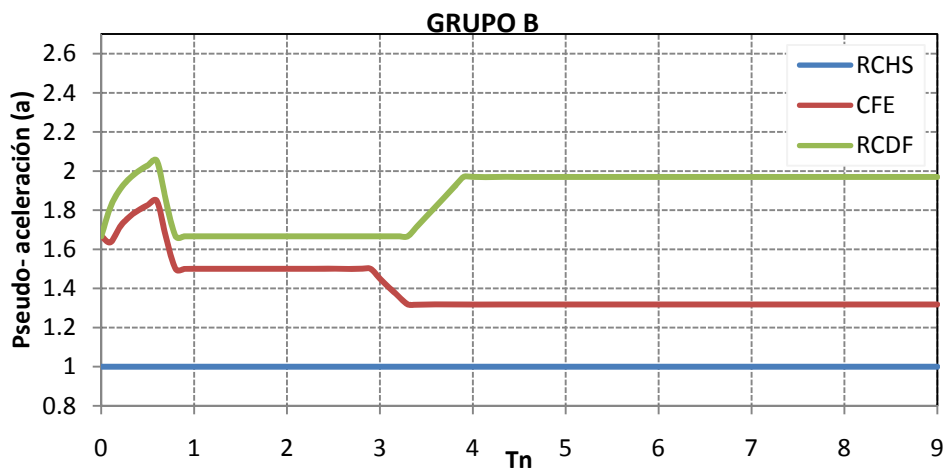


Figura. 4.7.1.3.3 Relación entre Pseudo-Aceleración de los tres códigos de diseño sísmico, normalizados al espectro de RCHS. Espectros de Diseño para Zona B.

También, se observa que en las estructuras del Grupo A, los códigos CFE y RCDF tienen ordenadas de “a” muy superiores a la del espectro del RCHS, hasta 2.4 veces mayor para periodos cortos.

La figura 4.7.1.3.5, está organizada en tres partes: a).- Comparativa de Cortante de Piso ( $F_j$ ); b).- Comparativa de cortante de piso normalizado al córtate basal del RCHS ( $F_j/V_b$ ) y c).- Relación de momento de volteo por piso normalizado al momento de volteo de base del RCHS ( $M_j/M_b$ ). La comparativa entre varias cantidades que representa cada uno de los códigos para las estructuras esta representadas en estas gráficas, muy en particular la relación que existe entre los cortantes basales que cada uno representa en la estructura, normalizados al código local (RCHS) siendo para cada

uno  $V_b_{CFE}=1.50$ ,  $V_b_{RCHS}=1.00$  y  $V_b_{RCDF}=1.66$ . Estos valores se ven representados en manera directa con la seguridad de la estructura.

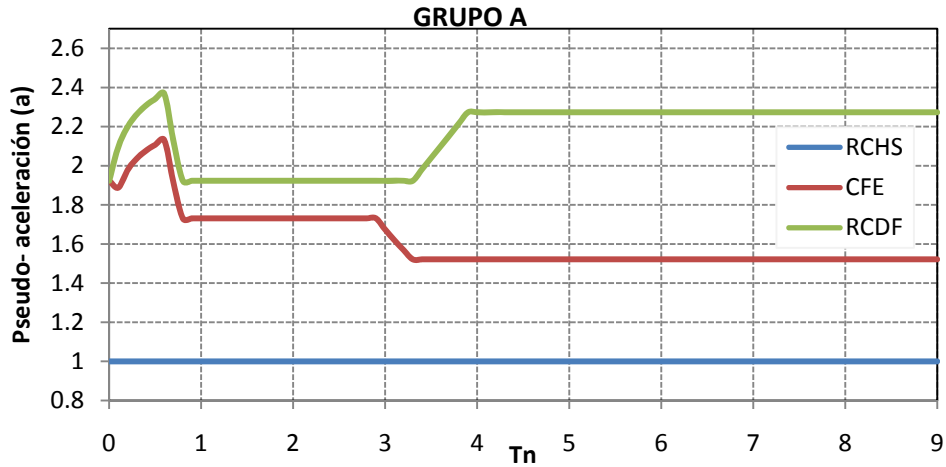


Figura. 4.7.1.3.4 Relación entre Pseudo-Aceleración de los tres códigos de diseño sísmico, normalizados al espectro de RCHS. Espectros de Diseño para Zona B.

De la figura 4.7.1.3.5a, se deduce que los cortantes de piso y en especial el cortante basal varía en proporción a los valores anteriormente expuestos, puesto que se dan en relación directa.

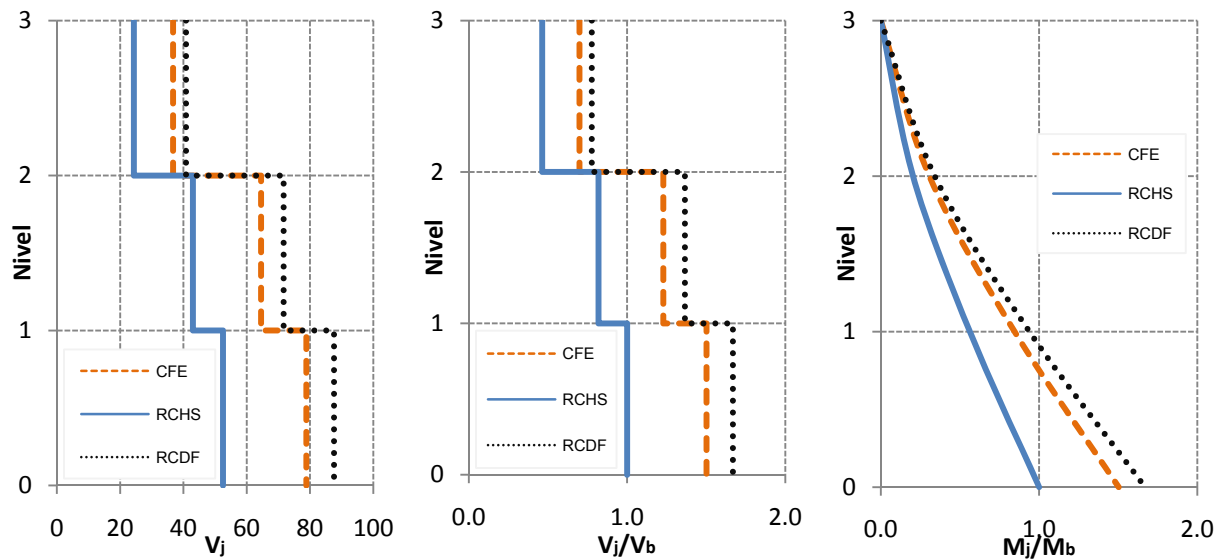


Figura. 4.7.1.3.5 Comparativa entre los tres códigos de diseño: a).- Comparativa de Cortante de Piso ( $F_j$ ), b).- Comparativa de cortante de piso normalizado al córtate basal del RCHS ( $F_j/V_b$ ), c).- Relación de momento de volteo por piso normalizado al momento de volteo de base del RCHS ( $M_j/M_b$ ).

## PARTE C: EVALUACIÓN COMPARATIVA: Acelerogramas vs Espectros de Diseño.

(Comparative Evaluation: Accelerogram vs. Design Spectrum)

### 4.8 ANÁLISIS DINÁMICO EN LA GENERACIÓN DEL ESPECTRO DE DISEÑO.

(Dynamic Analysis in the Generation Spectrum of Design)

El análisis dinámico de sistemas estructurales basados en Un Grado de Libertad (SDFs) Figura 4.8.1, dan paso al desarrollo de los espectros de diseños de los diversos códigos de diseño nacionales o internacionales, fundados en la estadística de los sismos ocurridos a través de la historia y la cercanía que estos tienen con las fallas tectónicas ya conocidas.

Los registros de las estaciones sismológicas dan paso a la generación de los espectros de diseño, solo basta con evaluar para cada sismo en un SDFs en la ecuación 4.8.1 con diferentes propiedades, variando los periodos fundamentales de vibración, y

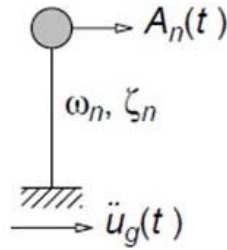
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = -m\ddot{u}_g(t) \quad 4.8.1$$

Para obtener así la respuesta máxima de desplazamiento de cada sistema ante dicho sismo, después evaluando el desplazamiento máximo en la ecuación 4.8.2, se obtiene el punto correspondiente a dicho sistema en la gráfica *Periodo Fundamental de Vibración vs Pseudo-aceleración*.

$$A(t) = \omega_n^2 D(t) \quad 4.8.2$$

Aplicando el conocimiento en que  $\omega = 2\pi/T_n$ , para aplicarlo después a la ecuación 4.8.2, entonces tenemos:

$$A = \omega_n^2 D = \left(\frac{2\pi}{T_n}\right)^2 D \quad 4.8.3$$



Análisis dinámico de sistema SDF.

Figura 4.8.1 Sistema de Un Grado de Libertad evaluado en un acelerograma.

La variable  $A$  es conocida como pseudo-aceleración estando en unidades de la gravedad, esto con la finalidad de evitar alguna confusión con la aceleración que produce en sí el sismo ante la estructura. Siendo esta la que participa o se encuentra en los espectros de diseño para ser multiplicados por el peso de la estructura, para obtener las fuerzas laterales equivalentes, por lo cual se le asocia al máximo cortante basal (Ecuación 4.8.4) que produce el sismo determinado ante las estructura con las propiedades en particular.

$$V_b = A/g w \quad 4.8.4$$

La relación  $A/g$ , comúnmente es más fácil o conocida como **Cortante Basal "c"** en los diversos códigos de construcción.

Para el caso de deducir el espectro de diseño de la pseudo-velocidad, se deberá de hacer el mismo procedimiento, solamente que ahora evaluaremos el desplazamiento máximo por la frecuencia natural de vibración  $\omega$ , donde resulta:

$$V = \omega_n D = 2\pi/T_n D \quad 4.8.5$$

#### 4.9. EVALUACIÓN COMPARATIVA: Espectro de Respuesta Sísmico. (Comparative Evaluation: Earthquake Response Spectrum)

Evaluando los cinco sismos objeto de estudio en un sistema de un solo grado de libertad (SDFs), mediante la aplicación de la ecuación que gobierna la dinámica estructural de los sistemas SDF's (Ecuación 4.8.1), para obtener los desplazamientos máximos de cada uno de los sistemas.

Conociendo estos desplazamientos máximos y evaluándolos en la ecuación 4.8.2 o 4.8.3, se obtiene la *pseudo-aceleración* del sistema ante este sismo determinado para SDF's, mismo resultado es aplicable a sistemas con varios grados de libertad, a través de la siguiente ecuación:

$$u_n(t) = \Gamma_n \phi_n D_n(t) \quad 4.9.1$$

Donde  $\Gamma_n$  es el coeficiente de participación,  $\phi_n$  es el vector de la forma modal y  $D_n$  es el desplazamiento máximo del SDF's, todos del *nth modo* en estudio.

La respuesta máxima de los SDF's, ante cada uno de los sismos, determinada por Análisis en Historial de Respuesta (RHA) [Ecuación 4.8.1 y 4.8.3] para obtener la pseudo-aceleración, se puede apreciar en la figura 4.9.1.

Esta figura está organizada en cinco partes: a).- Espectro de respuesta para el sismo de "El Centro 1940"; b).- Espectro de respuesta para el sismo de "México 1985"; c).- Espectro de respuesta para el sismo de "Loma Prieta 1989"; d).- Espectro de respuesta para el sismo de "Parkfield 1966" y e).- Espectro de respuesta para el sismo de "San Fernando 1971".

Podemos deducir que los sismos de "El Centro 1940", "Loma Prieta 1989", "Parkfield 1966" y "San Fernando 1971", tienden a afectar a estructura con bajo periodo de vibración, es decir, estructuras muy rígidas. Mientras que el sismo de "México 1985" presenta mayores ordenadas en periodos de vibración cercanos a 2 segundos, lo cual tiende a afectar mayormente a estructuras cercanos a este periodo de vibración.

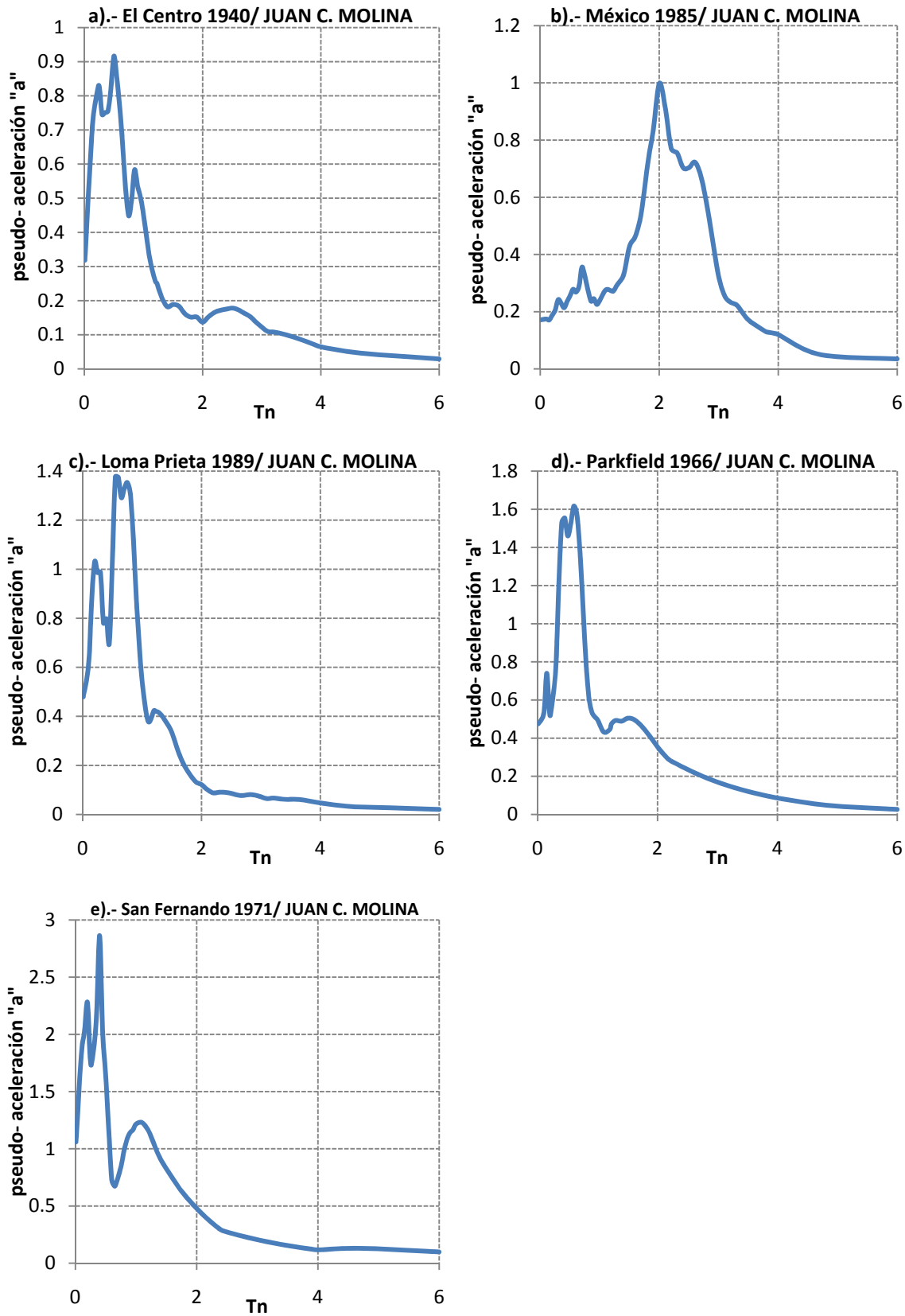


Figura 4.9.1. Respuesta de SDF's; Pseudo- aceleración vs Periodo Fundamental de vibración (Espectro de Respuesta), Para el sismo de: "El centro 1940", México 1985, Loma Prieta 1989, Parkfiel 1966 y San Fernando 1971.

#### **4.10. EVALUACIÓN COMPARATIVA: Espectro de Respuesta Sísmico vs. Espectro de Diseño.**

##### **(Comparative Evaluation: Earthquake Response Spectrum vs. Design Spectrum)**

Actualmente en los diversos códigos de diseño sísmico se especifican los espectros de diseño que se deberán de utilizar para diseñar las estructuras de las localidades, este concepto suscito por M. A. Biot en 1932, puesto que es la suma de todas las respuestas de todos los posibles sistemas ante posibles sismos, determinados por estadísticas de aparición.

Éste concepto común entre los ingenieros estructurales es una forma fácil y práctica, de diseñar las estructuras futuras ante posibles fuerzas laterales sísmicas; las respuestas de los sistemas se espera que estén dentro del rango elástico en algún sismo común, mientras que para sismos extraordinarios se espera que las estructuras entren al rango inelástico y se desarrolle las diversas formas de mitigación de las fuerzas sísmicas, a través del amortiguamiento y ductilidad.

Comúnmente los espectros de diseño sísmico se desarrollan en SDF's con amortiguamiento del 5%, ( $\zeta=5\%$ ).

La finalidad de este capítulo de la investigación, es revelar la forma de obtener los espectros de diseño para cada sismo en específico, así como también, evaluar matemáticamente nuestros códigos de diseño sísmico bajo la teoría de cinco sismos extraordinarios y conocidos; para conocer el grado de mitigación que tendríamos en nuestras estructuras al diseñarlas con estos códigos e hipotéticamente se presentaran los sismos en la localidad.

***La finalidad es estudiar que las estructuras diseñadas con estos códigos, hipotéticamente no quedaría re-utilizables después de algún sismo de esta magnitud e incluso pudieran colapsar, por ello la importancia de conocer más las propiedades no lineales de las estructuras y obtener matemáticamente los factores a utilizar, como es el factor de ductilidad y no simplemente suponerlo.***

***De la misma forma, el objetivo de mi investigación es el de progresar en los tipos de análisis que se realizan para el diseño de estructuras, puesto que al incorporar mejores análisis en nuestras estructuras, mejores podemos suponer los factores utilizados.***

***Es evidente que nuestro reglamento local de la ciudad de Hermosillo, debe de avanzar a realizar análisis estáticos no lineales (Pushover), puesto que manifiesta las propiedades correctas de nuestras estructuras y nos muestra los puntos de fallas de las estructuras, considerando también que nos proporciona el comportamiento de la estructura para el rango lineal y no lineal, mismo comportamiento nos resulta reutilizable al momento de evaluar directamente los efectos que pudiesen tener algún sismo determinado en alguna estructura que se conozca la curva pushover; solo con evaluar la pseudo- aceleración del sistema ante el sismo con un SDF's.***

La solución de la ecuación 4.8.3 para la respuesta máxima de un SDF's ante los acelerogramas objeto de estudio, nos denotan los espectros de respuesta para cada sismo, los cuales se pueden interpretar en la gráfica de los espectros de diseño de los diversos códigos de diseño sísmico en estudio, esto con la finalidad de analizar el grado de la ordenada de pseudo- aceleración de los sismos versus el grado de las ordenadas que cubren o tienen nuestros códigos de diseño sísmico.

La Figura 4.10.1, nos muestra en una gráfica comparativa de *Periodo Fundamental de vibración vs. Pseudo- Aceleración* las ordenas que poseen nuestros códigos de diseño, contrapuesto a las ordenas de los espectros correspondientes a los cinco sismos en estudio.

Podemos observar que en la Figura 4.10.1a de los espectros de diseño vs espectros sísmicos para el código de CFE 93, las ordenadas de los espectros sísmicos sobrepasan las ordenadas de los valores de pseudo- aceleración para los espectros del código de CFE. También en la Figura 4.10.1b para el código del Reglamento de Construcción de Hermosillo Sonora, las ordenadas son menores del código vs las ordenadas que demandan los espectros de lo sismo de estudio.

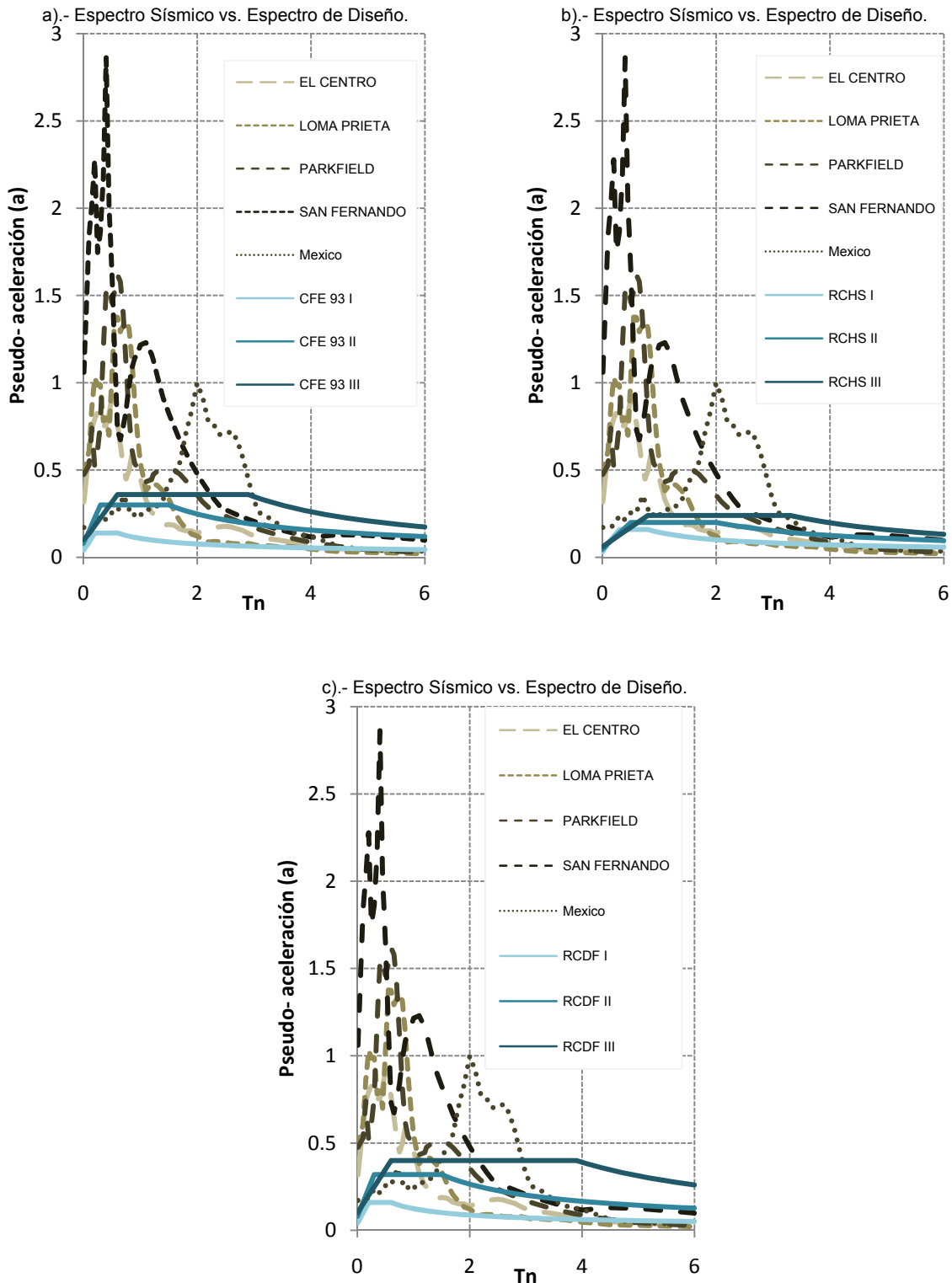


Figura 4.10.1. Comparación de pseudo-aceleración de los diversos espectros de diseño enmarcados en los códigos: a).- CFE 1993, b).- RCHS 1987 y c).- RCDF 1994. Contra los espectros de respuesta de cinco sísmicos históricos: “El centro 1940”, México 1985, Loma Prieta 1989, Parkfiel 1966 y San Fernando 1971.

Por último, en la Figura 4.10.1c para el código del Reglamento de Construcción del Distrito Federal, las ordenas de pseudo- aceleración son inferiores a las requeridas para los cinco sismos en estudio.

Basado en los resultados de la comparativa, entre los espectros de los cinco sismos versus los espectros de diseño de los códigos de construcción, los cuales nos indican que nuestros códigos no están contemplados para resistir, hipotéticamente estos sismos, dentro del rango linealmente elásticos; por ello la importancia de la aplicación de Métodos Estáticos No Lineales (Pushover) para conocer mejor los puntos de fallas de nuestras estructuras y para conocer con más precisión las propiedades de éstas.