

CAPÍTULO IV

TORSIÓN ACCIDENTAL POR EFECTO DE VARIACIÓN DE CARGA NORMAL SOBRE AISLADORES FPS

RESUMEN

La efectividad de los aisladores FPS (Frictional Pendulum System) al igual que su rigidez dependen de la carga vertical que actúa sobre ellos; estudios realizados revelan que la variación de la carga normal sobre los aisladores genera excentricidades instantáneas de rigidez y de resistencia friccional del sistema de aislamiento.

En este capítulo se analizan estructuras de tres y seis pisos, se varía la carga normal sobre un grupo de aisladores y se determina en cuanto se incrementan los desplazamientos en el borde del sistema de aislación y en el último piso.

Los resultados obtenidos se comparan con las respuestas que se tienen en un modelo con excentricidad de masa $e_X = e_Y = 0.015 H$, igual en todos los pisos, siendo H la altura total del edificio, con el propósito de ver si esta excentricidad estática cubre el problema de torsión accidental por efecto de variación de la carga axial en estructuras con aisladores FPS.



Por otra parte, k_{ef} es la rigidez efectiva o rigidez secante. Las ecuaciones de estas dos ramas del modelo constitutivo de un FPS, son las siguientes:

$$k_e = \frac{\nu W}{q_y} \quad (4.1)$$

$$k_p = \frac{W}{R} \quad (4.2)$$

Donde ν es el coeficiente de fricción del material que recubre al deslizador, W es el peso normal que actúa sobre el FPS, q_y es el desplazamiento de fluencia del FPS y R es el radio de curvatura del FPS. Se aprecia que la rigidez depende de la carga normal W que gravita sobre el aislador.

Ahora bien, durante la acción de un sismo la carga axial o normal no es constante, esta cambia ya que algunos elementos trabajan a compresión y otros a tracción, al variar la carga axial W , se cambia la rigidez de los FPS generando torsión en planta, pues se modifica la posición del Centro de Rigidez CR. Puede verse el problema como que cambia el Centro de Rigidez CR, o como que cambia el Centro de Masa CM. Concretamente, cuando se presenta una acción dinámica en estructuras con este tipo de aisladores, la estructura puede sufrir levantamiento al deslizarse sobre una superficie cóncava y dicho levantamiento puede provocar impacto, se genera entonces un momento de volcamiento que es inducido por las fuerzas de inercia en la superestructura.

Como consecuencia de lo mencionado se generan variaciones de carga normal sobre los aisladores y se presentan excentricidades de resistencia en planta en el sistema de aislamiento.

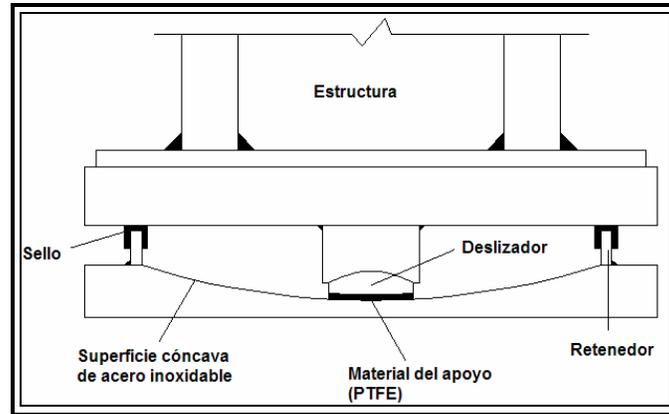


Figura 4.2: Detalle de un aislador FPS

Representar el comportamiento de este tipo de aisladores ha sido motivo de numerosas investigaciones. Con los primeros estudios, se desarrollaron modelos de análisis simplificados, los cuales buscaban representar el comportamiento bilineal predominante de los aisladores FPS, los resultados de numerosas pruebas y ensayos fueron obtenidos a partir de la hipótesis de que los aisladores tendrían pequeñas deformaciones. No obstante debido a observaciones en eventos sísmicos recientes, las grandes deformaciones y los efectos de $P-\Delta$ asociados han sido tratados como un posible aspecto que debe considerarse en el diseño de aisladores. Por esta razón, los modelos con grandes deformaciones deben ser usados en el diseño de sistemas aislados con FPS, para las cuales es particularmente importante la consideración de la variación de fuerza axial en el aislador, ya que dicha variación puede inducir efectos de torsión accidental que no es tomada en cuenta por los modelos que actualmente se emplean en el diseño. Otro aspecto fundamental que debe ser analizado con mucha atención es la evaluación de la fuerza normal N , para la cual es necesario considerar la aceleración vertical del suelo y el verdadero acoplamiento lateral – vertical de la estructura.



Los programas de análisis estructural tales como 3D-BASIS y SAP2000, tienen incorporados modelos de FPS dentro de sus librerías de elementos con comportamiento no lineal, sin embargo, cabe recalcar que estos modelos han sido desarrollados bajo la hipótesis de que los aisladores tendrán pequeñas deformaciones, que si bien es cierto es un modelo satisfactorio para la estimación de las respuestas globales del sistema, no representan la cinemática real de deformaciones en los aisladores (grandes deformaciones), y estos modelos tampoco permiten considerar efectos como el levantamiento (uplifting) e impacto en los mismos. (Almazán 2001).

4.2.- ESTUDIOS REALIZADOS

Almazán (2001) estudió la influencia de la precisión en el modelamiento de estructuras con FPS. Para ello analizó dos modelos de estructuras con este tipo de aislamiento, en dicho estudio se incrementó los grados de complejidad, desde un modelo simplificado, que no considera la respuesta vertical del sistema, que asume pequeñas deformaciones en los aisladores y una fuerza normal N constante, igual al peso sobre el aislador, hasta llegar a un modelo exacto que considera el acoplamiento del movimiento lateral y vertical del sistema, para ello se asumió grandes deformaciones en los aisladores, que pueden presentarse sobre todo ante la acción de sismos impulsivos. Los modelos fueron comparados, y se observó que las respuestas globales de la estructura tales como deformaciones en aisladores, deformaciones en la estructura, pese a ser evaluados desde modelos estructurales diferentes, eran similares, con una sobrestimación del modelo simplificado. No obstante, grandes discrepancias en los valores de cortante basal y de deformaciones de



entrepiso fueron observadas, dependiendo del grado de correlación estadística entre las componentes del movimiento vertical y horizontal, por ejemplo, con una pequeña correlación, menor a 0.15, un modelo estructural simple puede todavía ser usado dentro de un 15% de error.

Otro aspecto fundamental que se debe mencionar es que el impacto vertical que se produce entre el deslizador y la superficie de deslizamiento, genera dos efectos que deben ser analizados. El primero es que el cortante basal en las columnas aumenta debido al incremento de la fuerza normal N , pues al incrementar N , el valor de la fuerza de fricción también crece y el aislador tiende a detenerse, es ahí cuando esfuerzos significativos de corte son transmitidos a la columna soportada, y este efecto es más crítico cuando no existen vigas de fundación o una losa que conecte las columnas. El segundo efecto es que se produce una disparidad en la distribución de deformaciones en las columnas de primer piso cuando no existe una vinculación entre los aisladores, por lo que se debe evitar el levantamiento de la estructura cuando no se pueda vincular a las columnas entre sí.

Una de las conclusiones a las que llega Almazán es que los efectos locales como la variación en las fuerzas de contacto normales, las grandes deformaciones y el levantamiento de la estructura, parecen no afectar considerablemente a la respuesta global del sistema, es más, los sistemas aislados con FPS parecen reducir dichos efectos naturalmente. Por eso Almazán recomienda considerarlos en el modelado del aislamiento y diseño de la estructura, para calcular las respuestas locales como las deformaciones de



la superestructura y las fuerzas normales del aislador, especialmente para las estructuras que podrían ser afectadas por terremotos impulsivos de foco cercano, y para los casos en los que se espere una correlación estadística importante entre las componentes de movimiento horizontal y vertical.

4.3.- ANÁLISIS FÍSICO DEL PROBLEMA

La torsión accidental en estructuras sobre aisladores FPS, es un problema en cuyo análisis se debe considerar una serie de condicionamientos, por ejemplo, la acción simultánea de las componentes lateral y vertical de la sollicitación dinámica, la consideración especial de que el aislador no se desplaza en una superficie plana sino en una superficie esférica, la correcta evaluación de la fuerza normal N , entre otros.

El presente trabajo constituye una aproximación en el análisis del comportamiento de los aisladores FPS, se sabe de antemano que una modelación exacta del problema requiere un refinamiento de los modelos empleados, de los condicionamientos y del proceso de análisis. No obstante, en el presente capítulo, el problema ha sido analizado variando la carga axial sobre un grupo de aisladores lo que a su vez implica la variación de la rigidez en planta en el sistema de aislamiento. Para ejemplificar el problema, se empieza analizando un pórtico simple, que consta de dos pisos y dos vanos.

Sobre la estructura mencionada anteriormente actúan además de las cargas gravitacionales, cargas laterales por efecto de la acción sísmica.



Ante la acción de las cargas estáticas, la estructura simétrica mostrada a continuación (figura 4.3), tiene una carga axial de $30T$ en las columnas exteriores del primer piso.

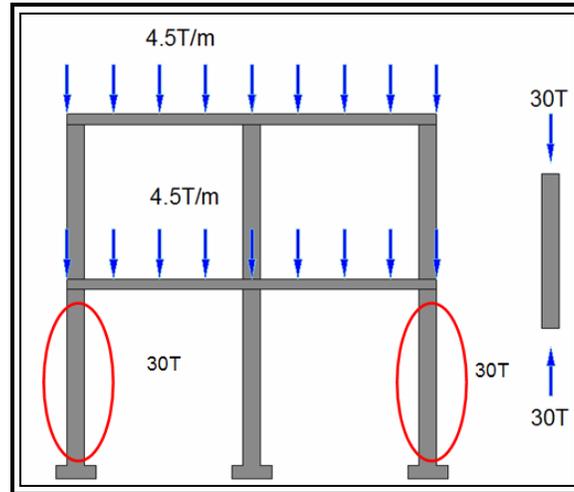


Figura 4.3: Estructura con cargas gravitacionales

Cuando mencionada estructura es sometida a acciones sísmicas el comportamiento de esta es distinto, ahora se superponen los efectos de las acciones gravitatorias y los efectos de las acciones dinámicas, estas últimas son representadas a través de cargas laterales (figura 4.4).

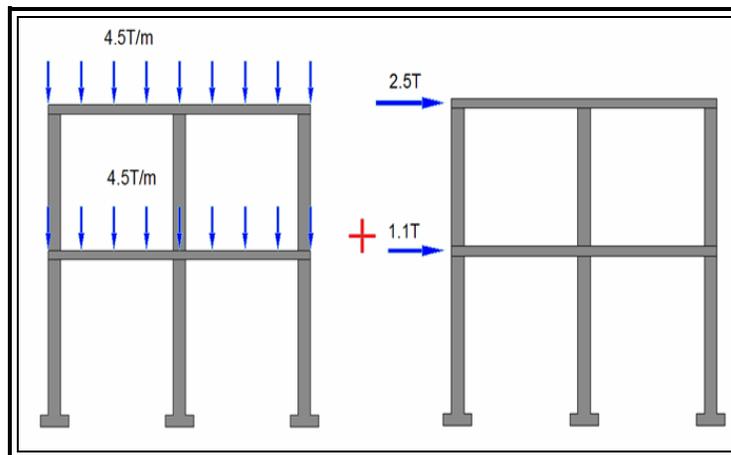


Figura 4.4: Estructura con cargas gravitacionales y acción dinámica



Como resultado de la acción conjunta de cargas gravitatorias y cargas dinámicas, se produce variación de la carga axial sobre los elementos que se están analizando, tal como se muestra en la figura 4.5. Recordando que el presente ejemplo ha sido desarrollado únicamente con fines explicativos.

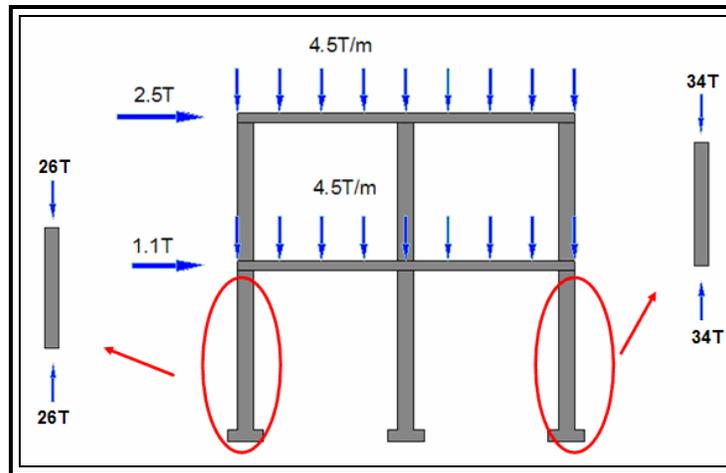


Figura 4.5: Variación de carga axial sobre los elementos ante la acción de cargas gravitatorias y acciones dinámicas

Si por otra parte, a la estructura antes descrita se le induce la acción de un determinado sismo y se obtiene la historia de reacciones verticales para un apoyo exterior (figura 4.6), se puede visualizar claramente como varía la carga axial sobre los apoyos a medida que la acción sísmica es aplicada. Se ve como la historia de reacciones empieza en 30T que corresponde al valor de la reacción al inicio del análisis dinámico, es decir cuando sobre la estructura solamente actúan las cargas gravitacionales (figura 4.3). Posteriormente existen instantes en los cuales la reacción en el apoyo es incluso menor al valor de 30T, ya que algunos elementos de la estructura empiezan a “descargarse”, mientras que en otros se presentará un incremento de carga vertical.

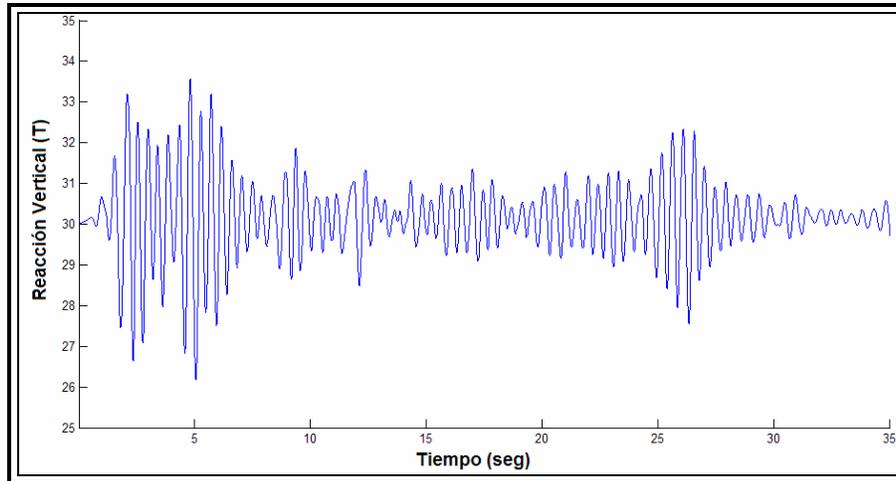


Figura 4.6: Historia de reacciones en el apoyo exterior

Una vez que se ha puesto de manifiesto la variación de carga normal sobre los apoyos en estructuras con base fija, consideremos ahora una estructura con aisladores de tipo friccional (figura 4.6), el momento de volteo que se genera por el levantamiento de la estructura, cuando esta se desliza sobre la superficie cóncava del aislador, hace variar la carga axial sobre los aisladores FPS, lo cual genera variación instantánea de la rigidez y resistencia friccional en el sistema de aislamiento, pues la rigidez lateral del aislador es función del peso que gravita sobre él (ecuación 4.2).

Los efectos de este comportamiento de los aisladores FPS han sido anteriormente descritos, pero conviene mencionar que las fuerzas de contacto normales durante una acción sísmica pueden variar de 0.2 a 2 veces la carga axial debido a las cargas gravitatorias, incluso puede alcanzar valores sobre 5 si el levantamiento ocurre debido al momento de volteo en la estructura (Almazán 2001).

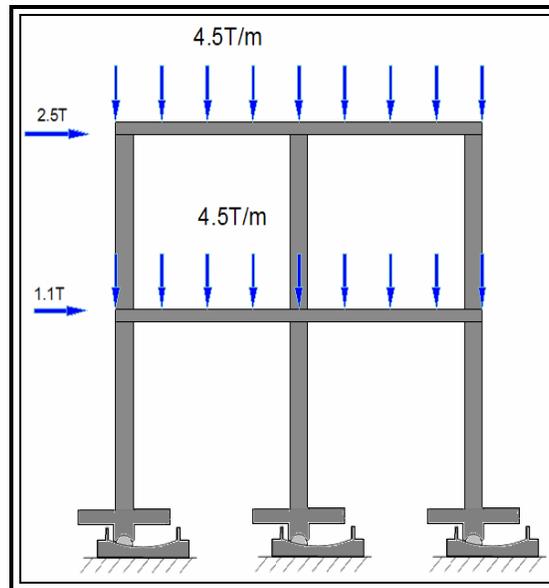


Figura 4.7: Estructura con FPS.

Es fundamental entonces tomar en cuenta estos aspectos del comportamiento de los aisladores FPS, y se evidencia la necesidad de continuar investigando en pos de mejorar nuestra comprensión sobre estos dispositivos.

4.4.- MODELO EMPLEADO EN EL ANÁLISIS

Para el análisis sísmico de estructuras con aisladores FPS existen varios modelos, con distintos niveles de complejidad. Los modelos lineales son ampliamente usados en la actualidad, ya que estos reproducen con bastante exactitud las respuestas globales del sistema, tales como el desplazamiento lateral de la superestructura y del aislamiento. En este caso se ha considerado un modelo numérico de cálculo que considera tres grados de libertad por planta para la superestructura, los cuales se agrupan en un vector denominado (u), y tres grados de libertad para el sistema de aislamiento, los cuales se agrupan en un vector denominado (q), estos son medidos en el centro de masa (CM) de cada piso. Los grados de libertad considerados corresponden a dos



desplazamientos horizontales perpendiculares entre si y una rotación de piso con respecto al eje perpendicular a la losa, como se muestra en la figura 4.8. El método utilizado es el de Masa corregida, se ha empleado una rigidez secante K_{ef} para los aisladores FPS (figura 4.1). Adicionalmente se consideran dos componentes sísmicas actuando simultáneamente.

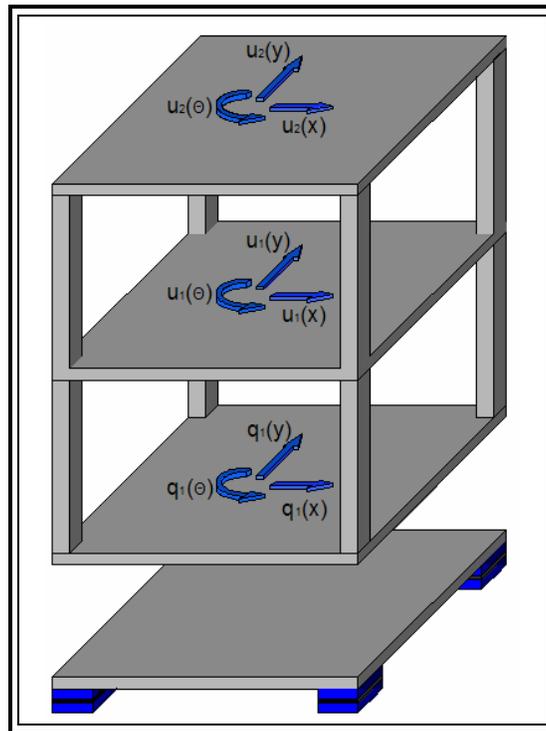


Figura 4.8: Modelo considerado en el análisis

4.5.- VARIACIÓN DE LA CARGA AXIAL

Como se mencionó en un inicio la efectividad de los aisladores FPS (Frictional Pendulum System) al igual que su rigidez depende de la carga vertical que actúa sobre ellos (ecuación 4.2). Estudios realizados denuncian que la variación en planta de la carga normal sobre los aisladores generada por el



momento volcante de la superestructura, genera excentricidades instantáneas de rigidez y de resistencia friccional del sistema de aislamiento.

En este estudio se analizan 4 estructuras de hormigón armado, dos de ellas de tres pisos y las dos restantes de seis pisos. Las mencionadas estructuras tienen relaciones de aspecto r de 1 y 0.5. En la figura 4.7 se muestra la geometría de la estructura de 3 pisos con $r = 0.5$. La altura del primer entrepiso es de 4.5 m., y la de los restantes pisos es de 3.0 m., similar consideración se aplicó al resto de estructuras.

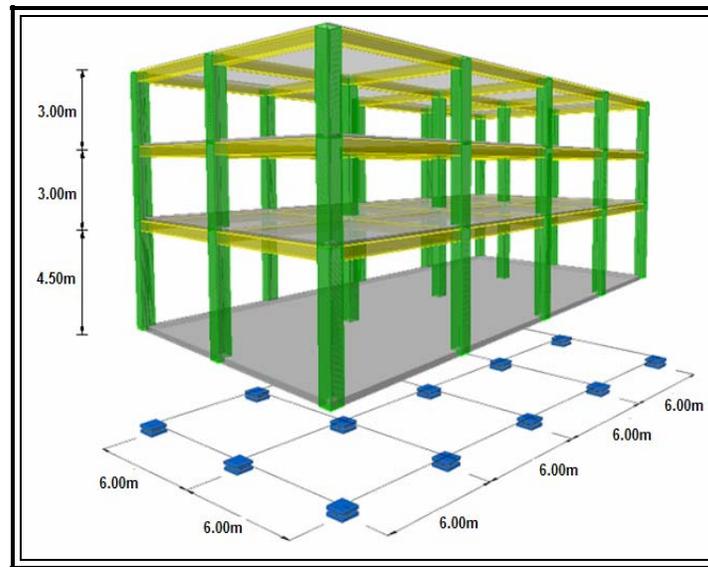


Figura 4.9: Geometría de edificio de 3 pisos con $r=0.5$

La razón de incluir en el presente estudio estructuras con varias relaciones de aspecto y varios números de pisos, es analizar la influencia que tienen en el comportamiento de las estructuras, tanto las relaciones de esbeltez, definidas como la relación entre la altura total del edificio y su dimensión en planta perpendicular al sentido de análisis, y la relación de planta, que corresponde



justamente a la relación entre las dimensiones en planta de la estructura analizada, pues en este capítulo se estudian dos cosas, en primer lugar la variación de las deformaciones de los bordes en la superestructura y en el sistema de aislación y en segundo lugar el grado de validez de la propuesta de Almazán (2001), quien propone introducir una excentricidad estática de masa para considerar de manera conservadora el incremento de deformación en los bordes de la estructura. Dicha excentricidad se plantea que sea proporcional a la altura del edificio (H) y no a la mayor dimensión en planta, que es la práctica habitual.

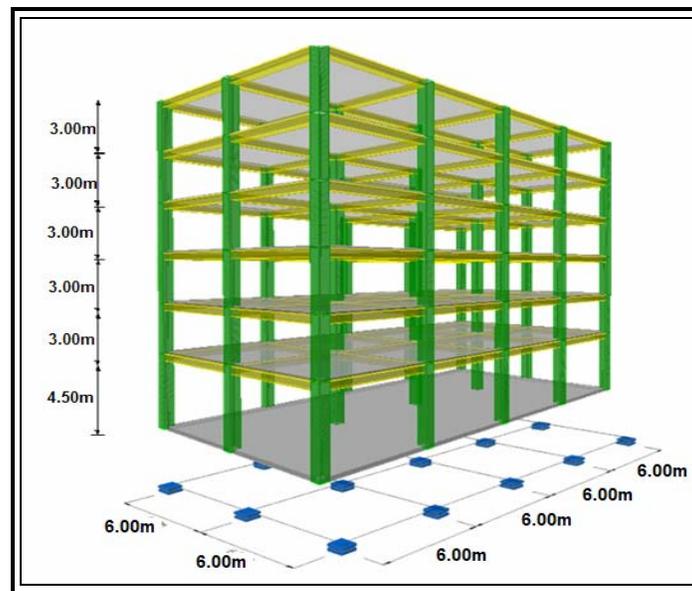


Figura 4.10: Geometría de edificio de 6 pisos con $r=0.5$

Las dimensiones de los elementos estructurales de cada una de las estructuras analizadas se muestran en la tabla 4.1. Se consideró un módulo de elasticidad del hormigón $E = 1800000 \text{ T/m}^2$, factor de amortiguamiento de la superestructura $\xi^{(s)} = 0.05$; período objetivo del sistema de aislación de 2 seg., coeficiente de



fricción de los FPS igual a $\nu = 0.04$, adicionalmente se ha considerado el 30% del sismo en la direccional perpendicular al sentido de análisis, se ha trabajado con las dos componentes horizontales ortogonales de la acción sísmica, pero no se ha considerado la componente vertical del movimiento. La carga viva se consideró 0.2 T/m^2 y la carga muerta se indica en la última columna de la tabla 4.1. Para determinar la matriz de masa se consideró el 25% de la carga viva.

Tabla 4.1: Características de los edificios analizados

Pisos	r_1	Ejes de columnas		Dimensiones		Carga (T/m^2)
		n	m	Columnas	Vigas	
3	1.0	3	3	50/50	40/40	0.6
	0.5	3	5	50/50	40/40	0.6
6	1.0	3	3	70/70 (1 a 2)	50/70	0.90 (1 y 2)
				65/65 (3 a 4)	45/60	0.85 (3 y 4)
				60/60 (5 a 6)	40/60	0.80 (5 y 6)
	0.5	3	5	70/70	50/70	0.90 (1 y 2)
				65/65	45/60	0.85 (3 y 4)
				60/60	40/60	0.80 (5 y 6)

En la tabla 1, n es el número de ejes de columnas paralelas al eje X, m es el número de columnas paralelas al eje Y.

Para cada edificio se consideraron 7 casos de incrementos de carga normal sobre los aisladores de 0, 5, 10, 15, 20, 25 y 30%, con lo cual se busca representar una situación crítica que puede presentarse durante la acción dinámica. No obstante, es importante manifestar que esta consideración no responde al verdadero comportamiento de los aisladores FPS, sobre todo en cuanto se refiere a la evaluación de la fuerza normal N, pues en el presente estudio se considera que la fuerza N se mantiene constante para el resto de aisladores, lo cual no es consistente con respecto a los estudios con modelos



exactos que se han desarrollado anteriormente (Almazán 2001), en los cuales se ha observado que la fuerza N no es constante, pues durante una acción sísmica las fuerzas de contacto normales pueden variar de 0.2 a 2 veces la carga axial debido a las cargas gravitatorias, e incluso puede alcanzar valores más altos cuando se presenta levantamiento de la estructura por impacto de los aisladores contra la superficie de deslizamiento cóncava y se genera momento de volteo en la estructura. Para la consideración de la acción sísmica se generaron cuatro acelerogramas sintéticos compatibles con el espectro de respuesta elástico, para la zona de mayor peligrosidad sísmica del Código Ecuatoriano de la Construcción, para perfiles de suelo S1, S2, S3 y S4

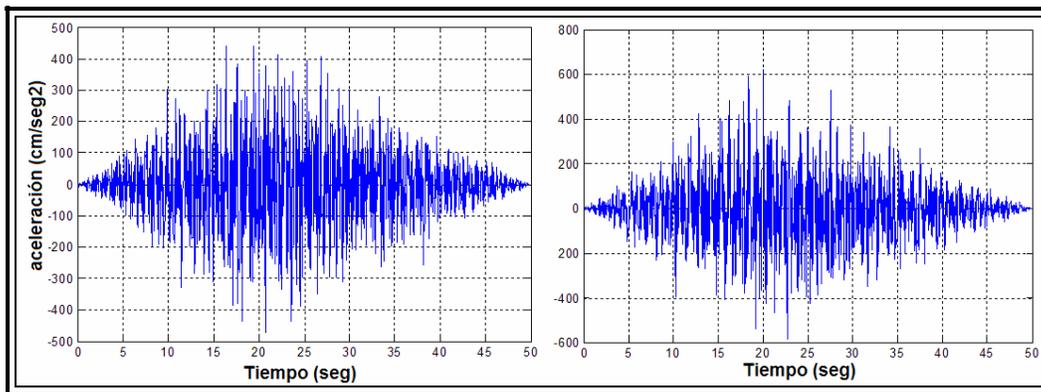


Figura 4.11: Acelerograma para perfil S1 (izquierda) y para perfil S2 (derecha)

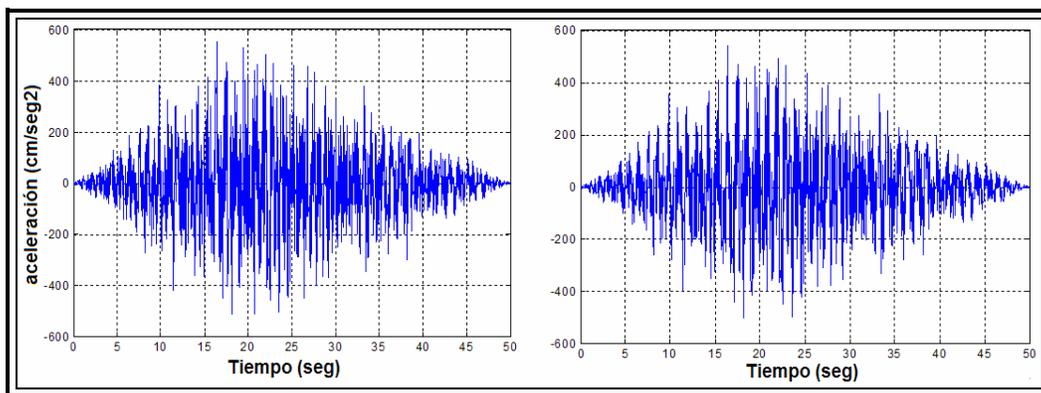


Figura 4.12: Acelerograma para perfil S3 (izquierda) y para perfil S4 (derecha)



Los sismos considerados tienen una duración de 50 seg. Tomando en cuenta el número de estructuras analizadas, los respectivos incrementos de carga y los sismos considerados, resultan 116 casos que se han considerado en el presente estudio.

En la figura 4.13 se aprecia el esquema de la planta del sistema de aislamiento, el cambio del peso normal sobre los aisladores y el consecuente cambio de la rigidez, se ha tomado únicamente en los aisladores de la última columna que están sombreados. El aumento de la carga normal, incrementa la rigidez de la última fila de aisladores, con lo cual se modifica la posición del CR. No obstante se recalca que en el presente trabajo la carga normal N para el resto de aisladores se mantiene constante.

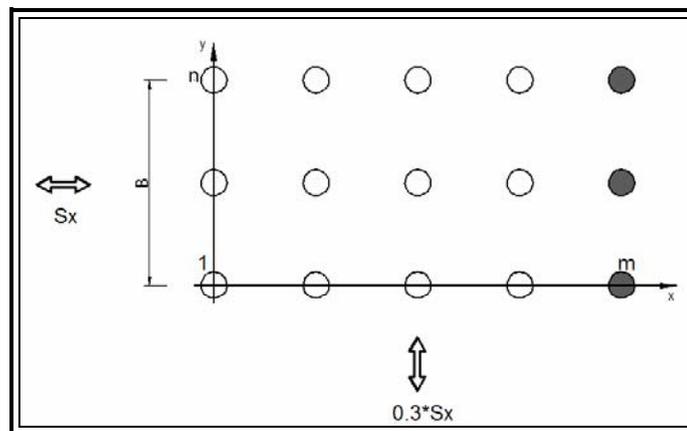


Figura 4.13: Planta tipo, nomenclatura y dirección de los sismos actuantes

En la figura 4.13 se muestra además la acción conjunta de las dos componentes sísmicas horizontales, el 100% de acción sísmica actuando en dirección X y en el eje Y actúa el 30% de la misma acción sísmica considerada en X , esto de acuerdo al modelo que se ha considerado en el análisis.



La variación del Centro de Rigidez (CR) en función del incremento de carga normal, tanto para las estructuras de tres pisos y seis pisos se indica en la figura 4.14, para una relación de forma de 1, y en la figura 4.15 para una relación de forma de 0.5. Se aprecia que la excentricidad varía de 0 al 3.5% de la dimensión perpendicular al sismo en sentido X. Para el edificio de 6 pisos se tiene la misma variación del CR, del sistema de aislamiento.

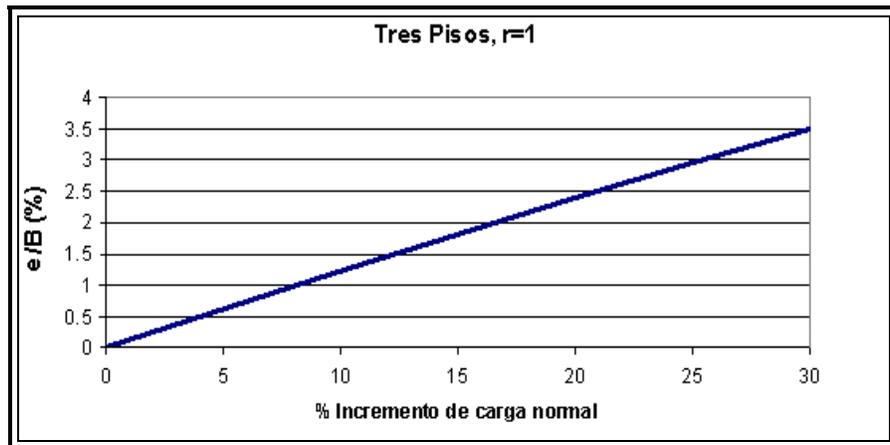


Figura 4.14: Variación del CR, del sistema de aislamiento para una relación de aspecto igual a 1.

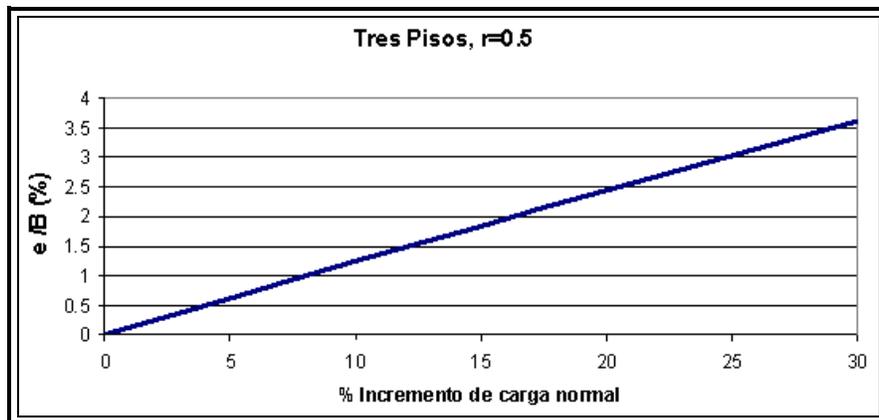


Figura 4.15: Variación del CR, del sistema de aislamiento para una relación de aspecto igual a 0.5.



4.5.1 Resultados Obtenidos

Sea u_n el desplazamiento lateral máximo en el borde y en el último piso de una de las estructuras considerando el incremento de la carga normal y sea u_0 lo propio pero sin considerar la carga normal. El término u^* representa el incremento o decremento del desplazamiento lateral en el último piso, por efecto de la variación de la carga normal (Ecuación 4.3). En forma similar se define q_n como el desplazamiento lateral máximo en el borde del sistema de aislación considerando incremento de la carga normal y q_0 como el desplazamiento lateral máximo en el borde del sistema de aislación pero sin considerar la variación de carga normal. El incremento de desplazamiento en el borde del último piso y en el borde del sistema de aislamiento será:

$$u^* = (u_n - u_0) / u_0 \quad (4.3)$$

$$q^* = (q_n - q_0) / q_0. \quad (4.4)$$

Con estas acotaciones, en las figuras 4.16 y 4.17 se presentan los valores de u^* y q^* para las dos estructuras de 3 pisos y en las figuras 4.18 y 4.19 para las estructuras de 6 pisos. Primero se ha colocado para el caso en el cual la planta de la estructura analizada es cuadrada $r = 1$ y luego para una configuración en planta rectangular con relación de forma $r = 0.5$

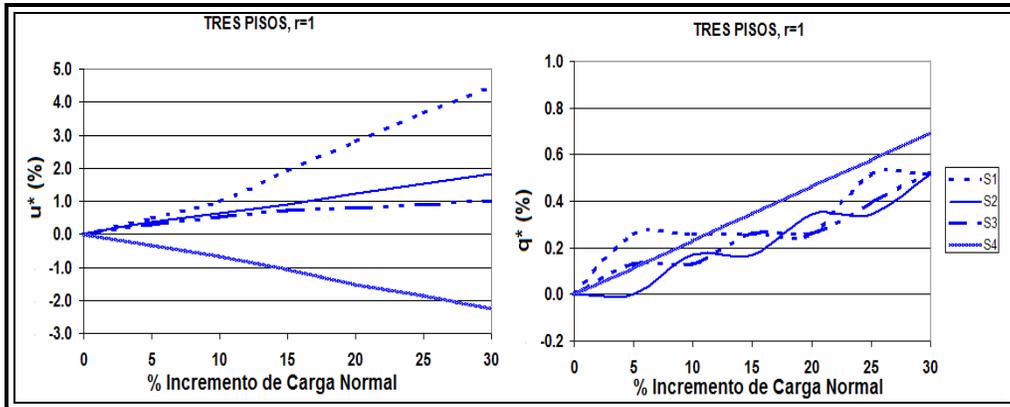


Figura 4.16: Variación del desplazamiento en el borde del último piso y aislamiento. 3 pisos y $r = 1$.

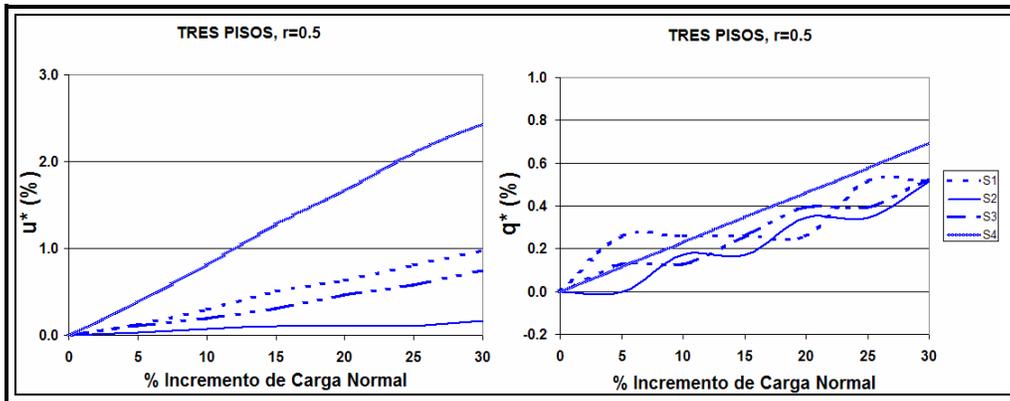


Figura 4.17: Variación del desplazamiento en el borde del último piso y aislamiento. 3 pisos y $r = 0.5$.

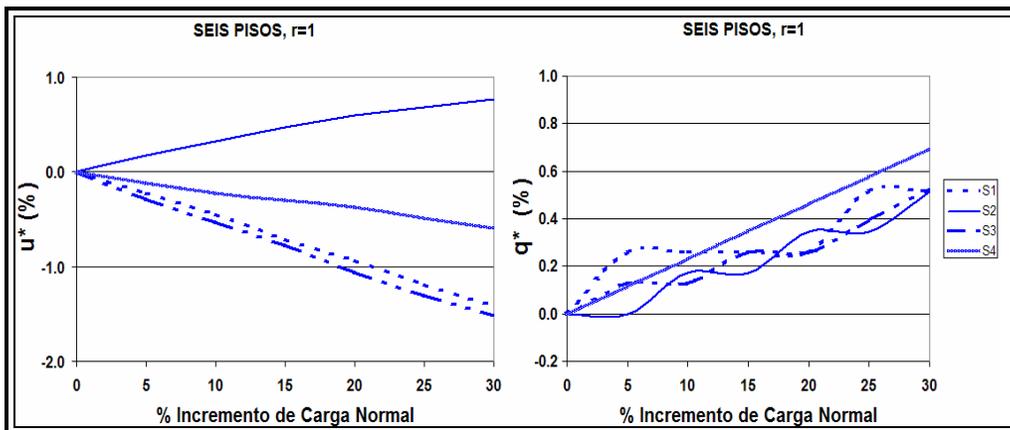


Figura 4.18: Variación del desplazamiento en el borde del último piso y aislamiento. 6 pisos y $r = 1$.

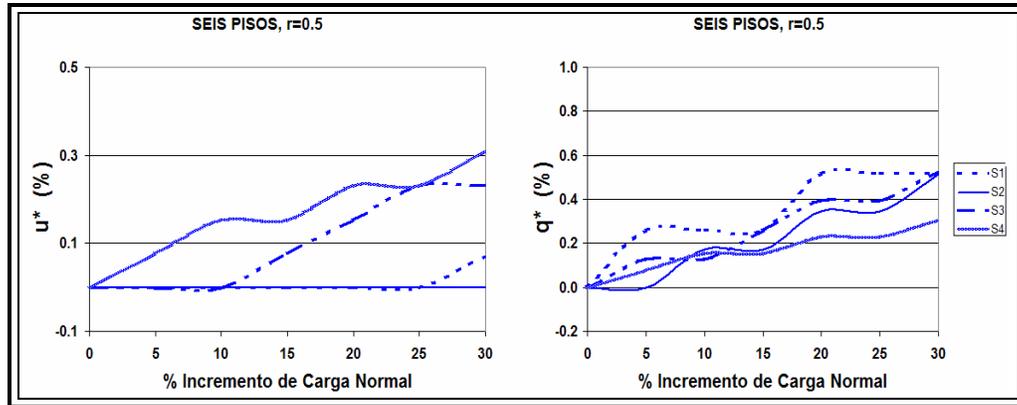


Figura 4.19: Variación del desplazamiento en el borde del último piso y aislamiento. 6 pisos y $r = 0.5$.

En los casos analizados se aprecia que la variación de desplazamientos en los bordes del último piso de la superestructura es menor al 5% y en el sistema de aislamiento es menor al 1%. Todo esto con respecto al análisis de la estructura sin variación de la carga normal. Esto confirma lo que ha resultado de investigaciones anteriores, en el sentido de que los aisladores FPS tienden a controlar naturalmente los efectos de torsión en estructuras con excentricidad de masa. No obstante investigaciones realizadas por Almazán y De la Llera (1998 y 2002) han mostrado que las variaciones de rigidez y de resistencia en planta en estructuras sobre aisladores FPS, inducidas por el momento de volteo, pueden producir incrementos en las deformaciones de borde de los entrepisos que pueden alcanzar valores de hasta 50% en estructuras esbeltas y torsionalmente flexibles, razón por la cual es claro que no se diseñarán estructuras flexibles soportadas sobre aisladores FPS. Por otra parte, las estructuras analizadas tienen un valor de Ω que está alrededor de la unidad, siendo Ω la relación de la frecuencia torsional con relación a la frecuencia traslacional, según se la definió en el capítulo III.



Ahora, interesa conocer si la propuesta de Almazán (2001) de considerar una excentricidad estática $e_X = e_Y = 0.015 H$ cubre los valores encontrados y mostrados en las figuras 4.12 a 4.15. Esto se muestra en las figuras 4.18 a 4.21; las líneas horizontales que están en la parte superior de cada una de estas gráficas son las obtenidas al considerar excentricidades $e_X = e_Y = 0.015 H$ para los diferentes tipos de suelo.

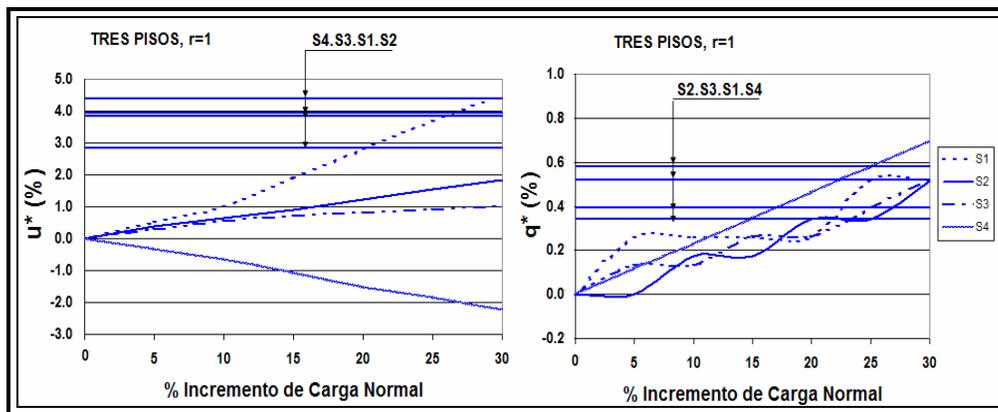


Figura 4.20: Comparación de resultados con propuesta de Almazán y De la Llera. 3 pisos $r=1$

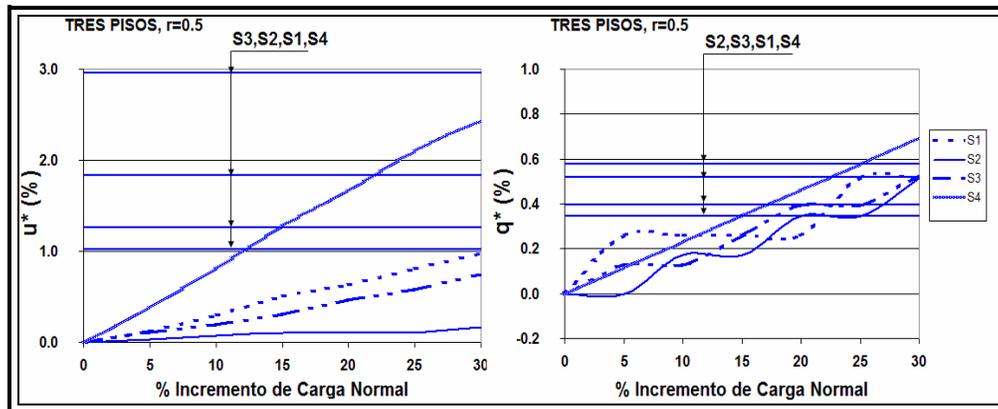


Figura 4.21: Comparación de resultados con propuesta de Almazán y De la Llera, 3 pisos $r = 0.5$.

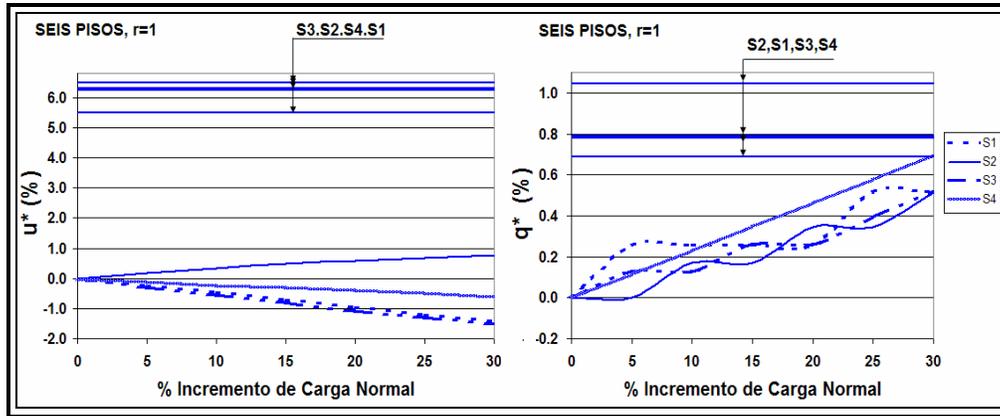


Figura 4.22: Comparación de resultados con propuesta de Almazán y De la Llera, 6 pisos y $r = 1$.

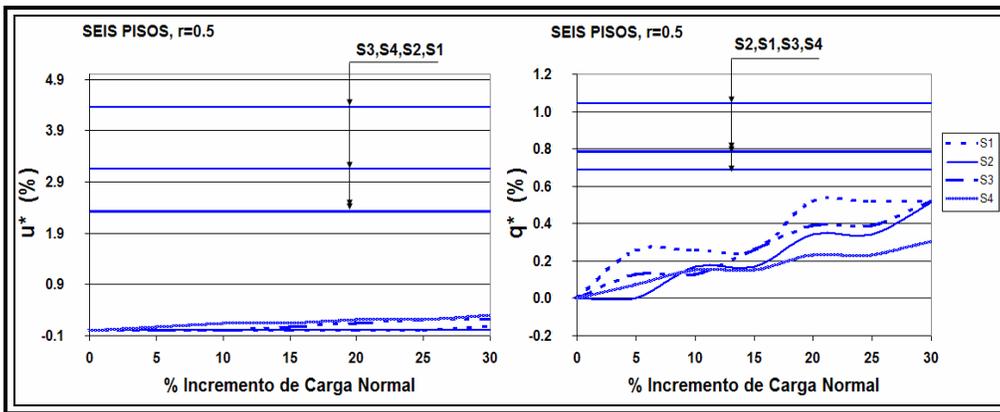


Figura 4.23: Comparación de resultados con propuesta de Almazán y De la Llera, 6 pisos y $r = 0.5$.

Se aprecia que en la mayor parte de los casos lo cubren. Únicamente para algunos casos en que la variación de la carga normal es del 30% no lo cubre pero en general la propuesta resulta adecuada para estimar el incremento de deformaciones en los bordes de una estructura.

4.6.- NORMATIVA SÍSMICA

La propuesta de Almazán (2001) que ha sido validada en el presente capítulo, es el resultado de haber analizado el comportamiento de 50 edificios de 3, 6 y 9



pisos ante la acción de ocho eventos sísmicos, cuatro de ellos impulsivos: Newhall, Sylmar (Northridge, 1994), JMA (Kobe, 1995) y Lucerne Valley (Landers, 1992); dos no impulsivos amplificados por un factor de dos: El Centro (Imperial Valley, 1940) y Melipilla (Chile, 1985); y dos sismos artificiales compatibles con el Código Chileno para aislación sísmica. Es así que Almazán y De la Llera concluyeron que una excentricidad estática $e_X = e_Y = 0.015 H$ es apropiada para incluir las amplificaciones en las deformaciones de los bordes en la base y la superestructura, debidas a torsión accidental por variación de la carga normal que conduce a variación de rigidez en los FPS.

Cabe mencionar que esta propuesta resultó adecuada cuando las estructuras analizadas eran rígidas, pero cuando se modeló estructuras flexibles la propuesta ya no cubría del todo los casos analizados. De aquí se desprende una condición que ya es conocida, no se harán estructuras flexibles.

Por otra parte, es fundamental resaltar la eficiencia de los dispositivos FPS para disminuir y controlar naturalmente los efectos de torsión.



REFERENCIAS

1. Almazán J. L., De La Llera J. C., And Inaudi J., (1998), "Modeling aspects of structures isolated with the frictional pendulum system", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 27, 845-867.
2. Almazán J.L, (2001), *Torsión accidental y natural de estructuras aisladas con el sistema Péndulo Friccional*, Tesis para optar por el grado de Doctor en ciencias de la Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile.
3. Almazán J. L., (2002), "Procedimiento simplificado para considerar torsión accidental en estructuras aisladas con FPS", *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. VIII Jornadas*, 8 p., Valparaíso, Chile.
4. Casarotti C., (2004), *Bridge Isolation and Dissipation Devices*. Tesis para optar por el grado de Master en Ciencias de la Ingeniería, University of Pavia and ROSE School. 164p, Pavia, Italia.