

CAPÍTULO II

REDUCCIÓN DE LOS EFECTOS DE TORSIÓN CON LA INCORPORACIÓN DE AISLADORES DE BASE

RESUMEN

En el presente capítulo se analizan dos estructuras de un piso, cuyas relaciones de aspecto son 0.5 y 0.75. Las estructuras son analizadas con y sin aisladores de base, se les somete a la acción dinámica de cinco registros sísmicos, se obtienen para cada caso los desplazamientos tanto en los pórticos extremos como en el centro de masa y se calcula el factor de amplificación torsional Γ .

Se comparan los resultados para el caso de base empotrada y base aislada, para cuantificar la reducción del efecto de torsión mediante la incorporación de aisladores de base.



2.1.- INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el uso de aisladores de base se ha convertido en una opción válida para la protección de sistemas estructurales ante acciones sísmicas. No obstante existen muchos aspectos sobre su comportamiento que aún no han sido profundizados lo suficiente. Son conocidas las bondades de estos dispositivos en cuanto a reducir los desplazamientos relativos en la superestructura y por lo tanto reducir los esfuerzos en los elementos estructurales, pero los aisladores de base también mejoran la respuesta torsional de la estructura, pues con su introducción se produce una reducción importante de las deformaciones de borde de los entresijos, lo cual minimiza los efectos de torsión en las estructuras aisladas. En el presente capítulo se verifica la reducción de la respuesta torsional en estructuras con aislamiento de base, mediante la cuantificación del indicador de amplificación torsional (Γ), el cual relaciona el desplazamiento de borde con respecto al desplazamiento en el centro de masas, como se verá más adelante. En tal virtud es importante empezar definiendo algunos conceptos fundamentales.

2.2.- EXCENTRICIDAD ESTÁTICA EN EDIFICIOS CON BASE EMPOTRADA

Por definición, la excentricidad estática es la distancia que existe entre el centro de masa CM y el centro de rigidez CR de una estructura. Partiendo de este concepto, es importante definir lo que es Centro de Masa y Centro de Rigidez.

2.2.1 Centro de Masa

El centro de Masa (CM) es el punto en el que se considera que está concentrada la masa de cada piso, y al estar ella posicionada en ese lugar



produce el mismo efecto que cada una de las masas del piso actuando en su posición real.

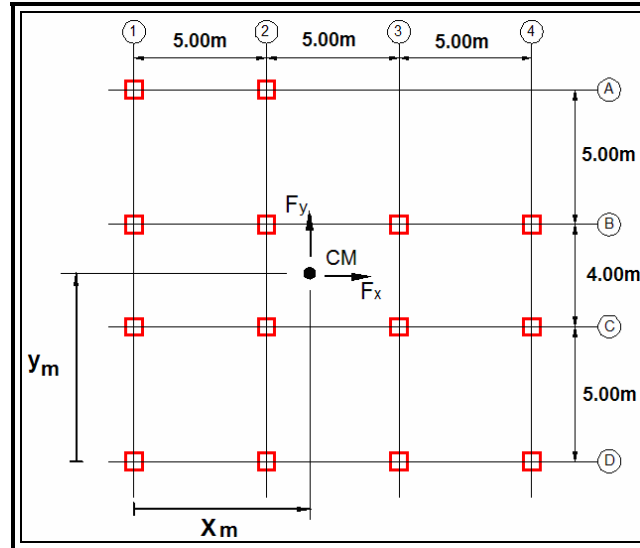


Figura 2.1: Centro de Masa CM

En la figura 2.1 se muestra la ubicación del centro de masa CM para una planta irregular. Nótese que se ha colocado además las fuerzas F_x y F_y , provenientes de la acción sísmica, en sentido x y en sentido y, respectivamente.

2.2.2 Centro de Rigidez

El Centro de Rigidez de un nivel es el punto en el cual al aplicar una fuerza cortante horizontal el nivel se traslada sin rotar.

Cuando consideramos a las rigideces de cada pórtico como fuerzas, las líneas de rigidez se definen como la línea de acción de la resultante en cada sentido.

En tal virtud tendremos la línea de rigidez en el sentido X y la línea de rigidez



en el sentido Y, la intersección entre estas líneas es el centro de rigidez CR. Se resalta que el centro de rigidez siempre existe para estructuras de un piso y para estructuras de varios pisos que sean compensables, es decir estructuras en las cuales el CR es colineal en todos los pisos.

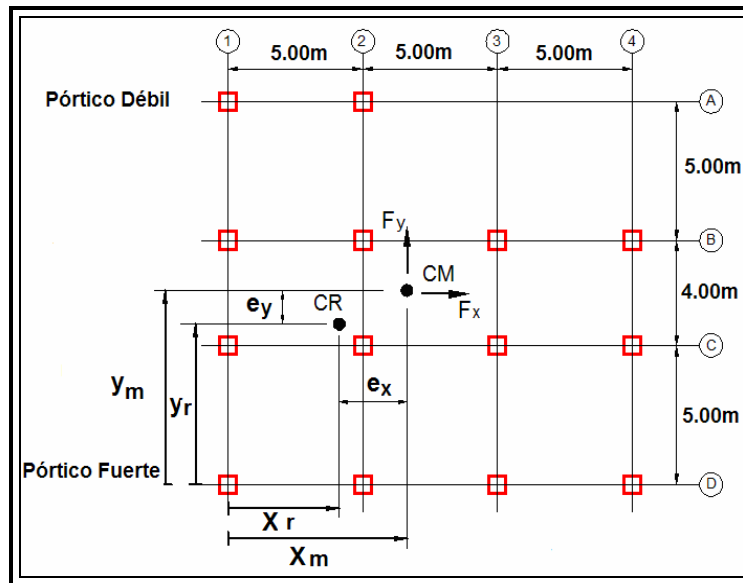


Figura 2.2: Centro de Rigidez CR

Es importante recalcar que las fuerzas horizontales debidas a la acción sísmica actúan en el CM, y si el centro de masa CM no coincide con el centro de rigidez CR, es evidente que la estructura además de desplazarse, rotará, pues recordando la definición de centro de rigidez, fácilmente concluimos que si la estructura presenta rotaciones, estas serán con respecto al CR.

La excentricidad estática queda definida por e_x y e_y . Para efectos de diseño se debe considerar una excentricidad e_d , la cual es igual a la excentricidad estática e_s , mayorada por un factor de amplificación dinámica, más la



excentricidad accidental que es función de un porcentaje de la distancia de la planta en dirección perpendicular al sentido del análisis sísmico considerado.

$$e_d = \alpha e_s + \beta L \quad (2.1)$$

$$e_d = \delta e_s - \beta L \quad (2.2)$$

En las ecuaciones 2.1 y 2.2, α y δ son los factores que modifican la excentricidad natural de entrepiso e_s para tomar en cuenta el comportamiento dinámico (con un diseño estático). El factor α amplifica las fuerzas calculadas estáticamente en los pórticos donde la torsión es desfavorable, mientras que δ indica la porción del cortante favorable que la torsión causa en algunos pórticos y que puede restarse del cortante directo. β es el factor de excentricidad accidental, se expresa en porcentaje y varía entre el 5% y 15%, L es la dimensión máxima en planta de la estructura, perpendicular a la dirección del análisis sísmico que se considera. De las ecuaciones planteadas se utiliza como excentricidad de diseño a la que ocasione los efectos más desfavorables en la estructura.

Cuando multiplicamos la excentricidad de diseño por el cortante de cada piso, obtenemos los momentos de torsión, estos son lo que generarán fuerzas de torsión adicionales en cada pórtico. Los momentos de torsión se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$M_{ti} = V_i (\alpha e_{si} + \beta L_i) \quad (2.3)$$



$$M_{ti} = V_i (\delta e_{si} - \beta L_i) \quad (2.4)$$

Donde V_i es el cortante del piso i , e_{si} es la excentricidad estática del piso i , L_i es la distancia perpendicular a la dirección del análisis sísmico en el piso i .

Las normativas de diseño sismorresistente determinan los valores de α y δ distintas maneras. En el caso del CEC 2000, el análisis estático se simplifica notablemente, ya que en mencionado código los valores de α y δ son iguales a la unidad. Por lo tanto, no hace falta calcular el centro de rigidez CR, ni la excentricidad estática, simplemente se considera que las fuerzas laterales en cada uno de los pisos actúan en el centro de masa CM, y se aplica además un momento torsor adicional debido a la torsión accidental.

2.3.- TORSIÓN ACCIDENTAL EN EDIFICIOS CON BASE EMPOTRADA

La torsión accidental puede generarse por dos causas: variación del centro de masa y variación del centro de rigidez. Esto surge como consecuencia de ciertas hipótesis consideradas en el diseño y que no son llevadas fielmente a la etapa constructiva. Por ejemplo, en el análisis sísmico se trabaja con determinadas secciones en los elementos estructurales, se supone determinada calidad de los materiales y de sus propiedades mecánicas, se asume cierta distribución de las cargas etc. Pero difícilmente estos parámetros son reflejados en la construcción, lo que implica que inevitablemente tendremos variación del centro de masa CM, variación del centro de rigidez CR, o de ambos.



Pero existen otras fuentes de incertidumbre que pueden dar origen a torsión accidental, estas son: a) La incorporación de la rotación del suelo en el análisis sísmico; b) la respuesta inelástica de una estructura; c) la determinación del Centro de Resistencia de una estructura en base a la capacidad sísmica resistente de los pórticos; entre otros. En la actualidad el tema sigue siendo motivo de estudio.

Acorde con la filosofía de diseño actual, las estructuras, al ser sometidas a eventos dinámicos intensos, deben ser capaces de soportar deformaciones significativas sin perder su capacidad de carga. En estructuras asimétricas estas deformaciones provienen principalmente de la traslación lateral y de la rotación de sus entrepisos. Es en este sentido que este tipo de estructuras debe soportar las deformaciones laterales y las deformaciones debidas a la torsión sin exceder los límites permitidos.

Los códigos y normativas vigentes para el diseño sismorresistente toman en cuenta los efectos de torsión ya que ellos causan grandes daños en elementos estructurales y no estructurales y por esto estipula que se considere una torsión adicional a la torsión real de la estructura. La torsión accidental se calcula considerando que la masa de todos los pisos está desplazada transversalmente hacia cualquiera de los dos lados, del centro de masa de cada piso, una distancia igual al 5% de la dimensión de la edificación en ese piso, medida perpendicularmente a la dirección bajo estudio.



2.4.- AMPLIFICACIÓN TORSIONAL (INDICADOR Γ)

Para medir la amplificación de borde por torsión en estructuras con y sin aislamiento se usan los siguientes parámetros:

$$\Gamma_{b/2}^{(b)} = \max(\Gamma_{-b/2}^{(b)}, \Gamma_{b/2}^{(b)}) \quad (2.5)$$

$$\Gamma_{\pm b/2}^{(b)} = 100 \left(\frac{\max \|q_{x(\pm b/2)}\|}{\max \|q_x\|} - 1 \right) \% \quad (2.6)$$

En donde $\Gamma_{b/2}^{(b)}$ es el parámetro que mide la amplificación torsional, $q_{x(\pm b/2)}$ es el desplazamiento de borde correspondiente a los pórticos extremos, q_x es el desplazamiento en el centro de masas.

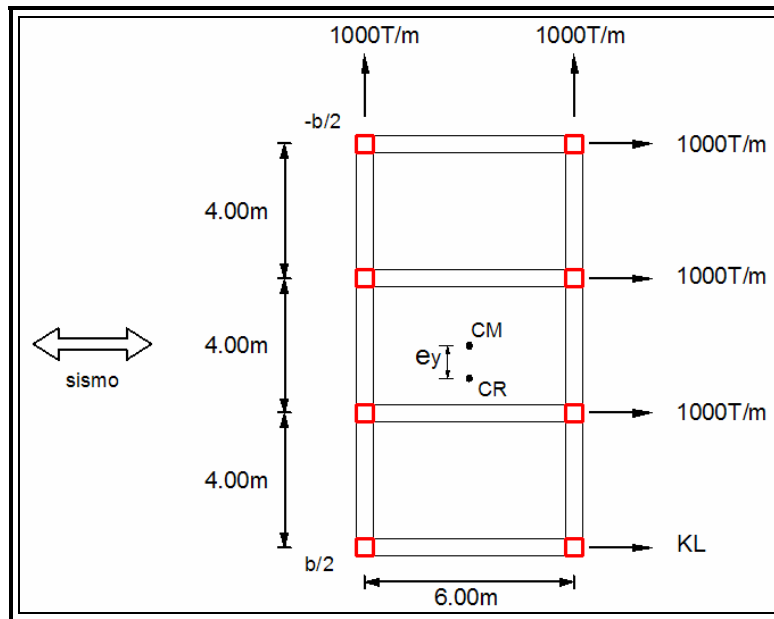


Figura 2.3: Ejemplo para cálculo de indicador Γ , $r = 0.5$

Se presenta en las figuras 2.3 y 2.4 los ejemplos desarrollados con fines didácticos, para la obtención del indicador de amplificación torsional (Γ). Las



estructuras analizadas son de un piso con y sin aislamiento de base, para el segundo caso se impuso un periodo objetivo de 2 seg.

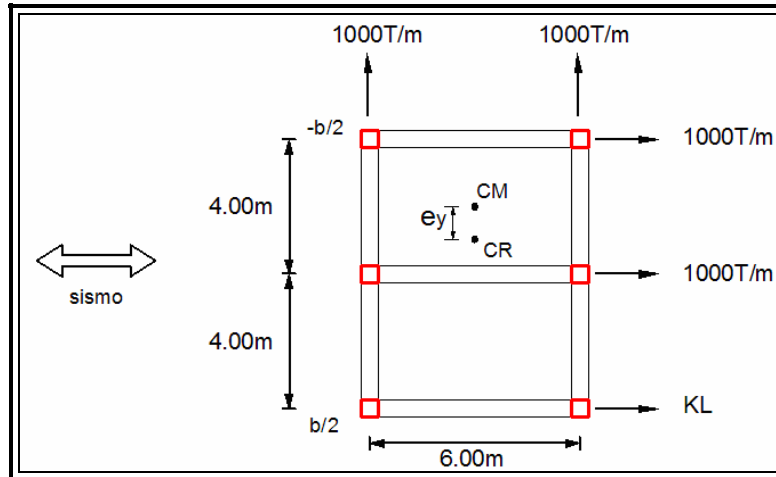


Figura 2.4: Ejemplo para cálculo de indicador Γ , $r = 0.75$

Se toma excentricidades de hasta el 45% de la dirección perpendicular al sentido de análisis considerado, con lo cual se busca tomar en cuenta una amplia gama de condiciones de excentricidad que pudieran presentarse. Con esto se exagera el efecto torsional en la estructura, lo cual se refleja en los resultados obtenidos para el parámetro Γ . La acción sísmica ha sido inducida por los siguientes registros sísmicos:

- Sismo del Perú, sentido el 9 de noviembre de 1974.
- Sismo de Chile, sentido el 3 de marzo de 1985.
- Sismo del Centro mayorado por un factor de 2.
- Sismo compatible con el espectro elástico del Código Ecuatoriano de la construcción para perfil de suelo S2.



- Sismo compatible con el espectro elástico del Código Ecuatoriano de la construcción para perfil de suelo S1.

Los acelerogramas de los registros sísmicos antes mencionados se muestran a continuación:

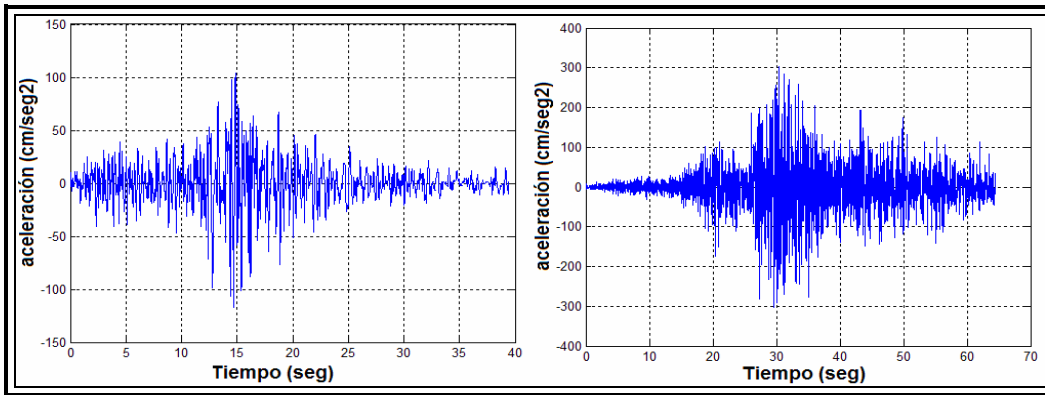


Figura 2.5: Acelerograma sismo Perú (1974) a la izquierda y de Chile (1985) a la derecha

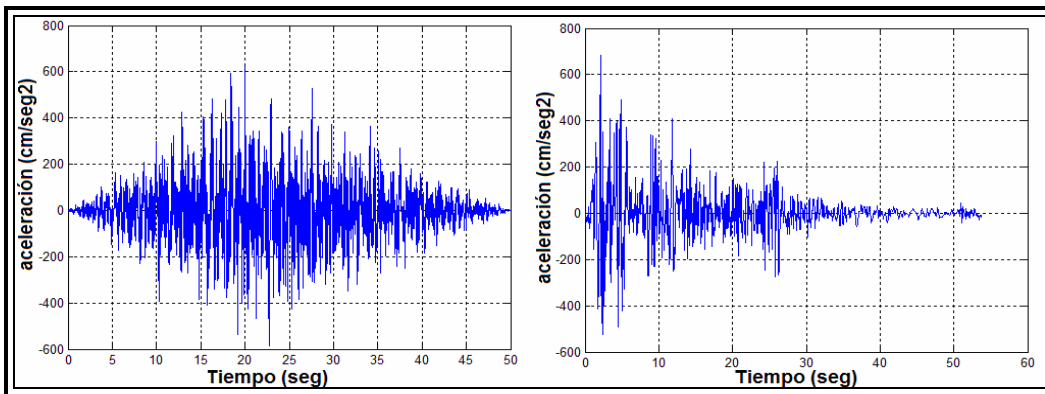


Figura 2.6: Acelerograma para perfil S2 (izquierda) y 2xCentro (derecha)

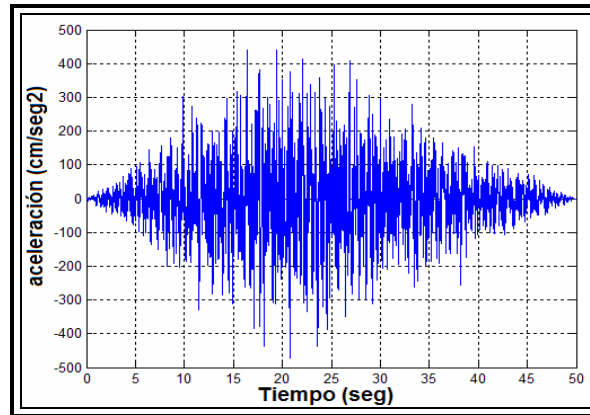


Figura 2.7: Acelerograma para perfil S1

En el extremo $b/2$, los pórticos de las figuras 2.3 y 2.4 tienen una rigidez K_L , la misma que tomará valores de rigidez lateral que introducen distintos valores de excentricidad estática en la estructura, desde 0 hasta 45% de la dimensión en planta perpendicular al sentido de análisis, con incrementos de 5%.

Se realiza el análisis dinámico de las estructuras, tanto para base empotrada como para base aislada, se calculan los desplazamientos en los pórticos extremos y en el centro de masa. Con la información antes mencionada se obtiene el parámetro Γ (ecuación 2.5 y 2.6) para cada uno de los registros sísmicos considerados y para cada una de las excentricidades consideradas.

Los resultados obtenidos para la estructura con relación de aspecto $r=0.5$ se muestran en las figuras 2.8, 2.9 y 2.10 que corresponden a la relación entre el operador Γ y la excentricidad estática en la estructura con base fina y con aislamiento sísmico. Mientras que los resultados obtenidos para la estructuras con relación de aspecto $r=0.75$ se muestran en las figuras 2.11, 2.12 y 2.13.

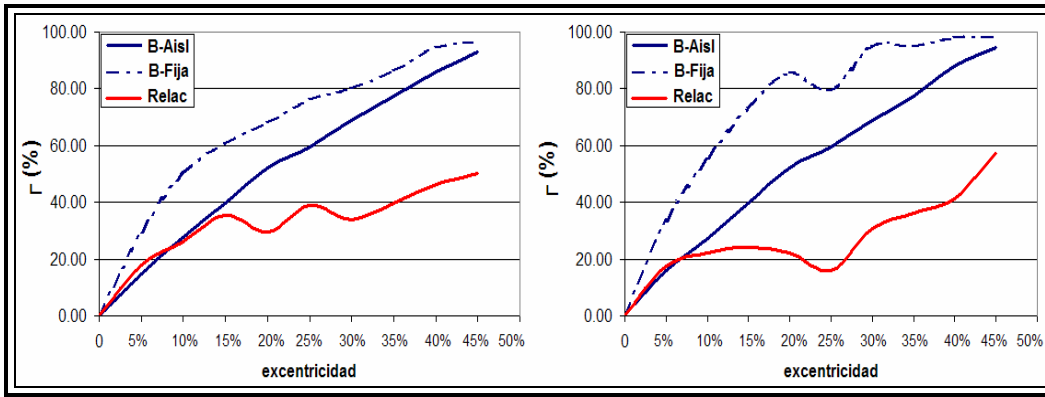


Figura 2.8: Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Perú (izquierda) y sismo de Chile (derecha), $r=0.5$

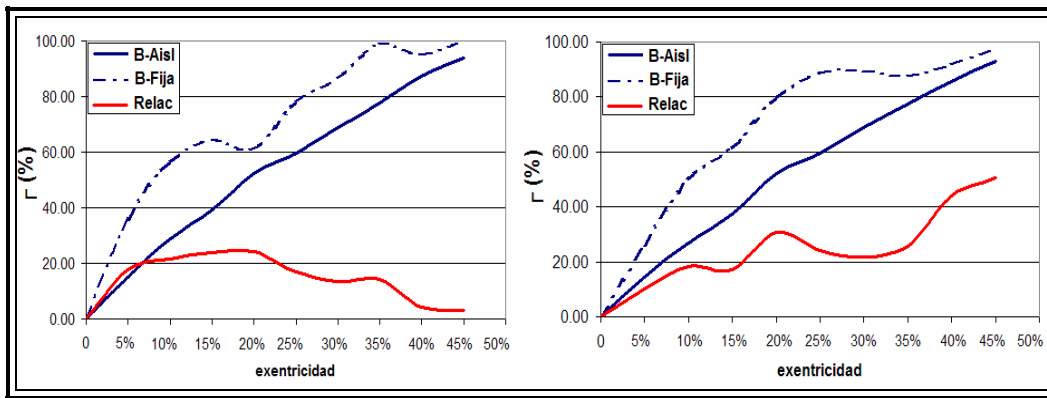


Figura 2.9: Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Suelo S2 (izquierda) y sismo de 2xCentro (derecha), $r=0.5$

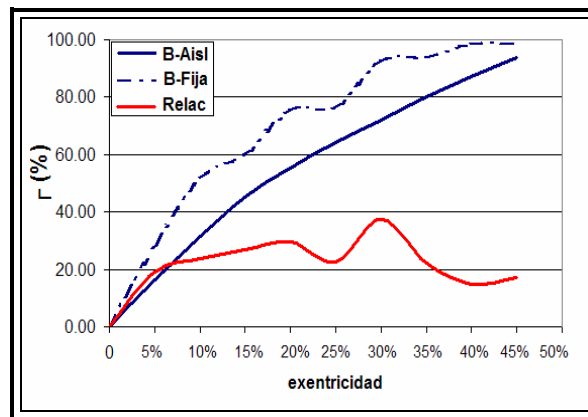


Figura 2.10: Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Suelo S1, $r=0.5$

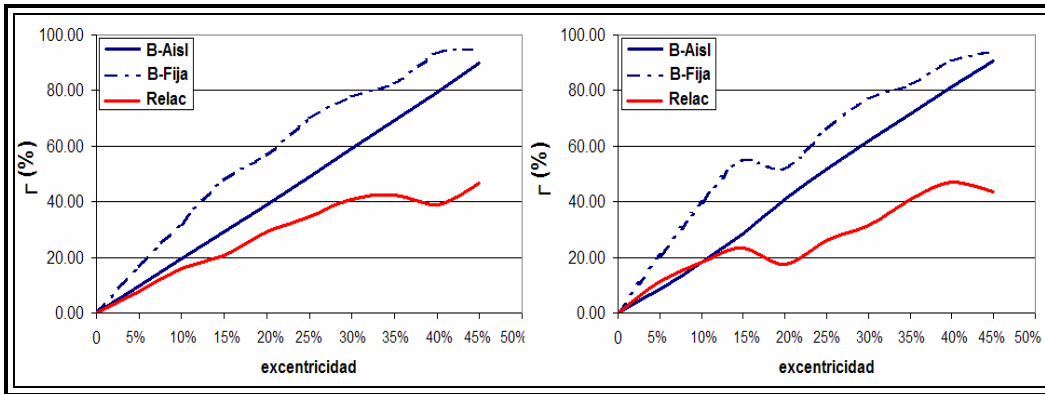


Figura 2.11: Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Perú (izquierda) y sismo de Chile (derecha). $R=0.75$

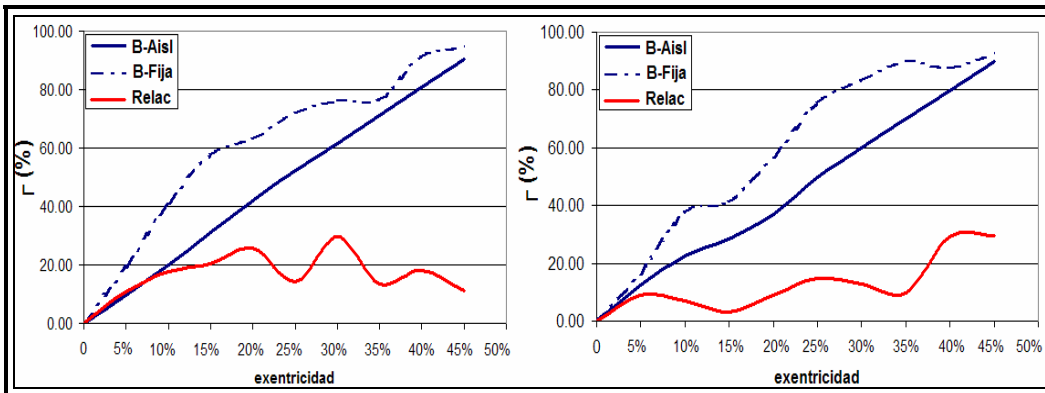


Figura 2.12: Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Suelo S2 (izquierda) y sismo de 2xCentro (derecha), $r=0.75$

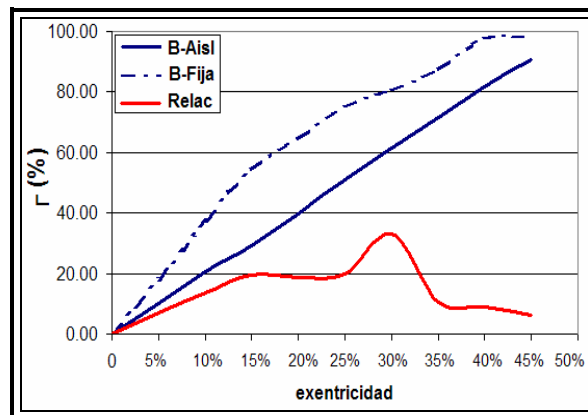


Figura 2.13: Excentricidad vs Γ . Estructura base fija y base aislada para sismo Suelo S1, $r=0.75$



Es posible que el lector al analizar los resultados, no encuentre mayor variación en los valores del factor de amplificación torsional para el caso de estructura con y sin aislamiento, pues aunque el indicador Γ relaciona los desplazamientos en pórticos extremos con respecto al centro de masas, este indicador no permite visualizar la magnitud de la reducción de los desplazamientos en la estructura, cuando se le incorpora el sistema de aislamiento. Es por esta razón que en las gráficas antes presentadas se ha incluido una serie adicional en color rojo, la misma que corresponde al parámetro Γ , pero obtenido con la siguiente expresión:

$${}^* \Gamma_{\pm b/2}^{(b)} = 100 \left(\frac{\max \|q_{x(\pm b/2)}^*\|}{\max \|q_x^*\|} - 1 \right) \quad (2.7)$$

$$q_{x(\pm b/2)}^* = \frac{q_{xFIJA(\pm b/2)}}{q_{xAISL(\pm b/2)}} \quad (2.8)$$

En donde $q_{xAISL(\pm b/2)}$ es el desplazamiento en pórtico extremo para el caso de estructura aislada y es $q_{xFIJA(\pm b/2)}$ el desplazamiento para el caso de estructura con base fija. Lo propio sucede para los desplazamientos en el centro de masas CM. Es importante resaltar que si bien es cierto, los valores de Γ obtenidos tanto para base fija como para base aislada son altos, es posible que en casos prácticos la excentricidad estática no alcance los valores que en el presente análisis se han considerado, y pese a esta consideración es notoria la reducción del efecto torsional en la estructuras que incorporan un sistema de aislamiento sísmico de base.



Por otra parte, y para que el lector constate las bondades de incluir un sistema de aislamiento en las estructuras, se presenta en las figuras 2.14 y 2.15, la historia de desplazamientos correspondiente a cada una de las excentricidades consideradas para el caso del sismo 2xCentro, para la estructura con $r=0.5$. Se muestran los desplazamientos del pórtico débil (q_{PD}), del centro de masas (q_{CM}) y del pórtico fuerte (q_{PF}) para la estructura sin aislamiento y con aislamiento de base respectivamente, solamente se muestra la historia de desplazamientos para un intervalo de tiempo. Se puede ver claramente como se incrementa el periodo de vibración de la estructura con aislamiento en relación a la misma estructura sin aislamiento, visualizando la separación de cresta a cresta o de valle a valle en las gráficas presentadas.

Adicionalmente se muestra el indicador Γ para cada uno de los casos analizados, se ve claramente como se reduce su valor para el caso de la estructura con aislamiento. Similar comportamiento se ha observado con los demás registros sísmicos considerados.

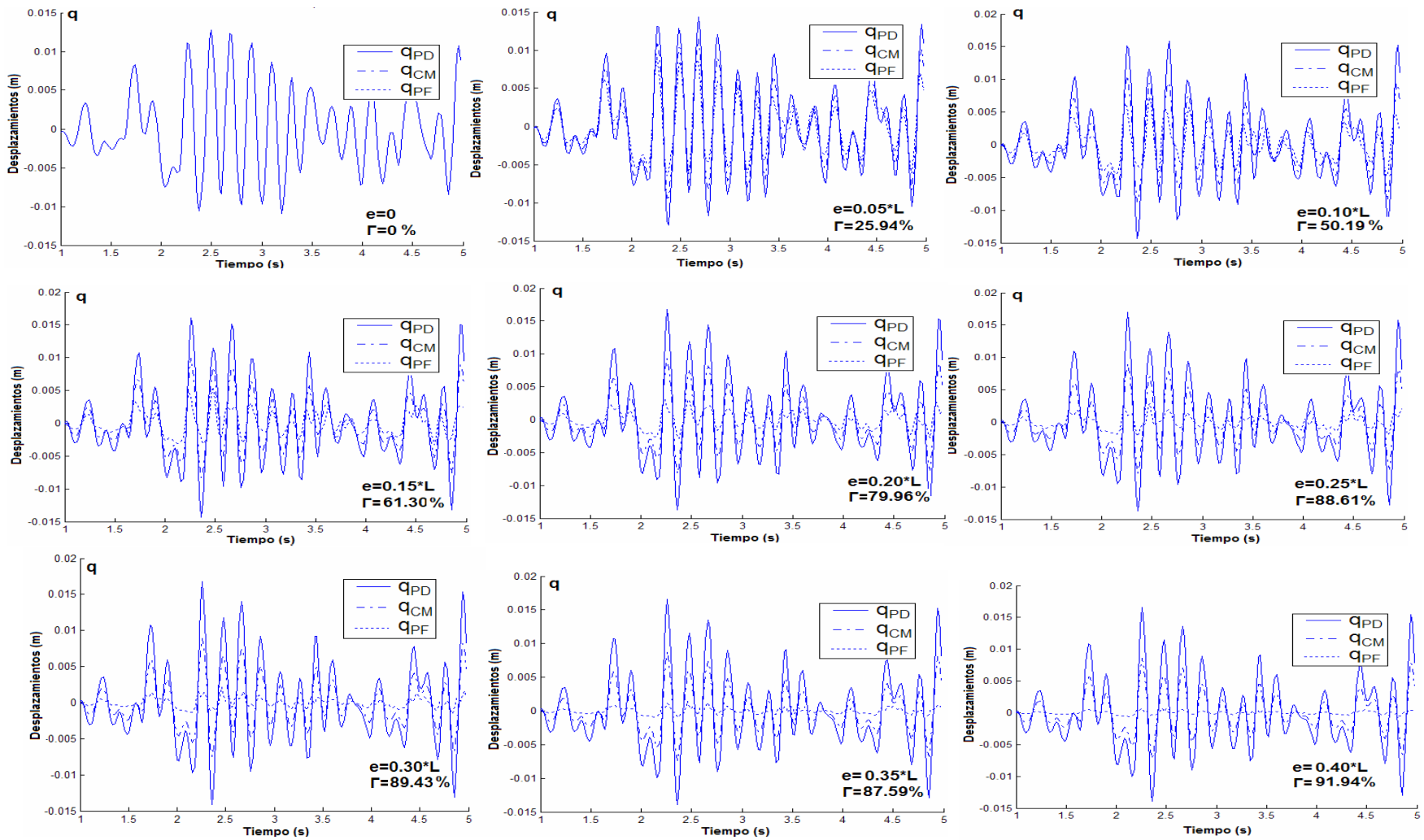


Figura 2.14: Respuestas de deformación en el CM y en los bordes. Estructura base fija de un piso ante sismo (2xcentro)

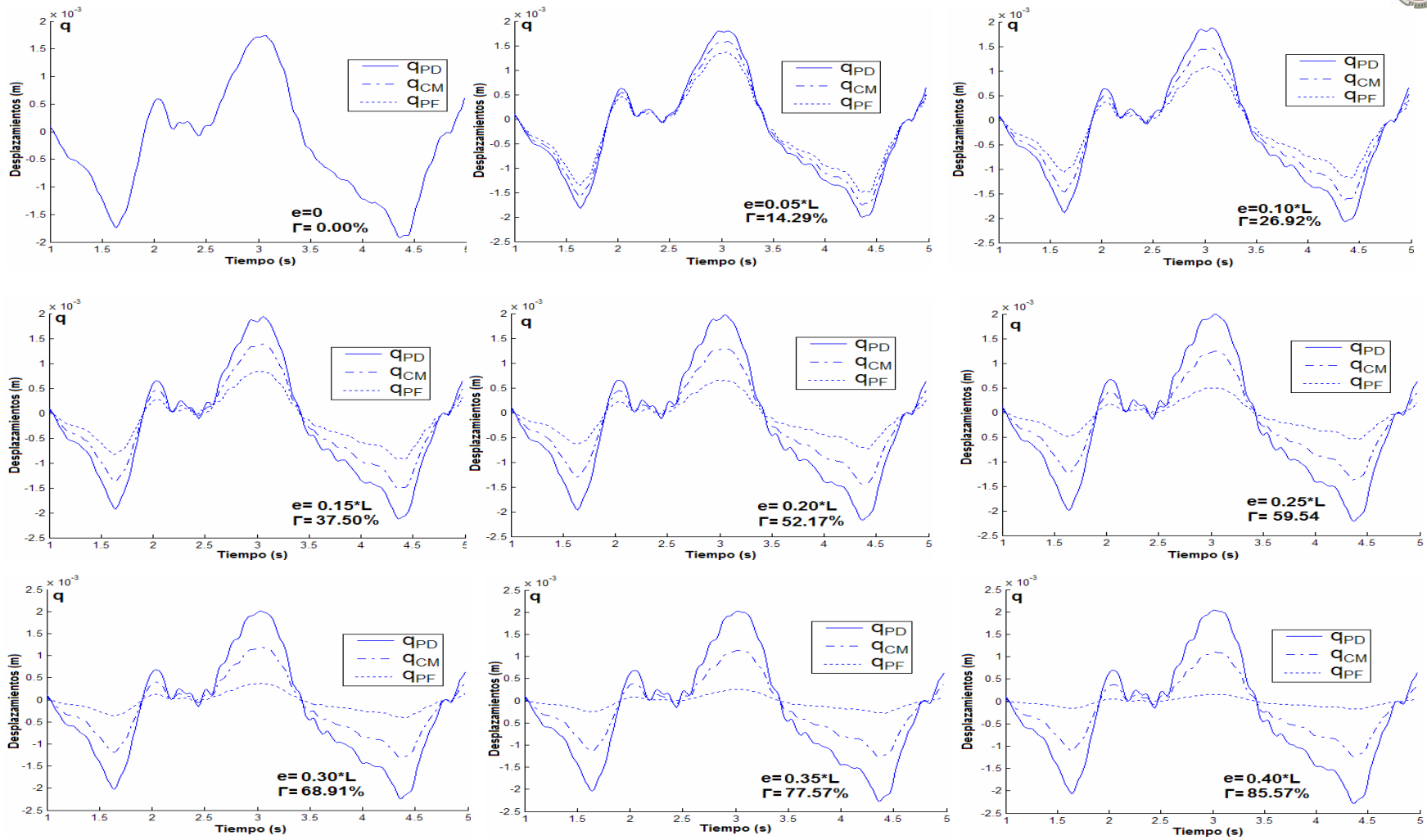


Figura 2.15: Respuestas de deformación en el CM y en los bordes. Estructura aislada de un piso ante sismo (2xcentro)



REFERENCIAS

1. Aguiar Falconí Roberto., (2008), “Análisis Sísmico de Edificios”. Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército. Sangolquí, Ecuador.
2. Gómez Rueda O., Maldonado Rendón E., (2005), “Estudio Analítico de los efectos de la torsión natural en el comportamiento de edificios de varios pisos torsionalmente desbalanceados ante solicitaciones sísmicas”. Barranquilla, Colombia.
3. De La Llera J.C., Chopra A., (1994), “Accidental and natural torsion in earthquake response and design of buildings”, Earthquake Engineering Research Center. University of California at Berkeley, **UCB/EERC-94/07**, 291 p.
4. Shenton H. W., Holloway E. S., (2000), “Effect of stiffness variability on the response of isolated structures”, Earthquake Engineering and Structural Dynamic, **29 (1)** 29-36.