



# UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA

*La Universidad Católica de Loja*



ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

## “IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DIRECTO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS PARA PÓRTICOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA”

*Tesis de Grado Previa  
a la obtención del  
Título de Ingeniero Civil*

**AUTOR:**

*Mauricio Exequiel Sánchez Espinoza*

**DIRECTOR:**

*Dr. Vinicio Suárez Ch.*

LOJA – ECUADOR

2010

# **CAPÍTULO I**

## **DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROYECTO**



## **1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

En el presente proyecto se pretende implementar el Diseño Directo Basado en Desplazamientos (DDBD) a pórticos con disipadores de energía, El DDBD, permite que los edificios de concreto, sean diseñados de tal forma que alcancen un nivel de daño específico, aceptable frente a una agresión sísmica. (Priestley y Kowalsky (2000)). La investigación se basa en el diseño de pórticos con disipadores de energía mediante la metodología basada en desplazamientos con su respectiva evaluación utilizando el programa computacional OPENSEES el cual nos permite realizar simulaciones como el Análisis Estático "PUSHOVER" y el Análisis Inelástico de Historia en el Tiempo "ITHA". Los resultados de las simulaciones, nos permitirán comparar con los resultados obtenidos por el método de diseño DDBD a través de un análisis no-lineal de historia en el tiempo (NTHA).

## **1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Eventos sísmicos recientes tales como el de Northridge (Estados Unidos, 1994) y el de Kobe (Japón 1995) han puesto en evidencia algunos de los problemas asociados con el uso de sistemas estructurales tradicionales para resistir las acciones sísmicas durante sismos intensos. Como consecuencia de esto, investigadores e ingenieros han centrado su atención en el uso de sistemas innovadores, tal como lo es el suministro de amortiguamiento adicional a las estructuras por medio de sistemas pasivos de disipación de energía. Se ha demostrado el buen desempeño sísmico de este tipo de sistemas en investigaciones analíticas y experimentales, así como también en los eventos sísmicos mencionados previamente.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN**

En los últimos años la ingeniería sísmica en todo el mundo ha enfocado muchos de sus esfuerzos a investigar e implementar métodos para mitigar la amenaza de las comunidades más vulnerables. Entre estos, los sistemas pasivos de disipación de energía para el diseño y reforzamiento de estructuras han tomado gran auge. En vista de que en la actualidad el método de diseño sismo resistente basado en desplazamientos ha ganado popularidad en el diseño de edificios regulares ya



que presentan varias ventajas sobre los métodos tradicionales basados en fuerzas. La principal diferencia entre los métodos basados en desplazamientos y los basados en fuerzas radica en que los primeros utilizan desplazamiento como medida de la demanda sísmica y también como indicador del nivel daño, tomando ventaja de que el daño se correlaciona mejor con los desplazamientos que con las fuerzas es por eso que se realiza la presente investigación con la intención de realizar las modificaciones adecuadas al método de diseño de pórticos regulares basado en desplazamientos al diseño de pórticos con disipadores de energía.

## **. 1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 OBJETIVO GENERAL**

- Implementar el diseño directo basado en desplazamiento en pórticos con disipadores de energía.

## **1.5 DISEÑO METODOLÓGICO**

Para el presente estudio se llevaron a cabo las siguientes etapas:

**1.5.1** Se recopiló información sobre el diseño de pórticos mediante DDBD y la utilización de dispositivos de disipación de energía.

**1.5.2** En la primera etapa se escogió diferentes tipos de pórticos en los cuáles varía la geometría, secciones de los elementos estructurales, materiales, y propiedades.

**1.5.3** Una vez definido el pórtico se diseñó mediante DDBD.

**1.5.4** Se realizó un análisis no lineal de historia en el tiempo (NTHA) de cada pórtico con disipadores de energía.

**1.5.5** Se verificó la efectividad del DDBD comparando los resultados del diseño con DDBD con los del NTHA.

**1.5.6** Conclusiones y Recomendaciones.

# **CAPÍTULO II**

**IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DIRECTO  
BASADO EN DESPLAZAMIENTOS PARA  
PÓRTICOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA**



# **IMPLEMENTACIÓN DEL DISEÑO DIRECTO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS PARA PÓRTICOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA**

## **2.1 RESUMEN**

El Diseño Directo Basado en Desplazamiento, (DDBD) es una herramienta de ingeniería sísmica basada en desempeño, que ha sido satisfactoriamente probada para el diseño de pórticos regulares.

En esta investigación se propone modificaciones al método del DDBD para que pueda usarse con pórticos que tienen sistemas de disipación de energía. Para comprobar si el método propuesto es eficaz en el diseño de pórticos con disipadores de energía se realiza el diseño de varios pórticos con disipadores y luego se evalúa el diseño de los pórticos mediante el programa computacional OPENSEES a través de un análisis inelástico de historia en el tiempo, para el diseño de estos pórticos con disipadores de energía se utilizó disipadores tipo Barra de pandeo restringido.

**PALABRAS CLAVE:** DDBD

Disipación de energía

Barras de Pandeo Restringido

## **2.2 INTRODUCCIÓN**

La ingeniería sísmica ha realizado importantes avances en las últimas décadas, desarrollando una serie de conceptos innovadores (aislamiento sísmico, disipación pasiva de energía, control activo y semi – activo de estructuras) que permiten proteger de mejor manera a las construcciones, sus ocupantes y contenidos, frente a la acción sísmica u otras del tipo dinámico. La aplicación de estos conceptos se materializa en la incorporación de distintos dispositivos mecánicos en las construcciones, con objeto de mejorar su capacidad frente a sismos destructivos (Aiken, 1996; Soong y Dargush, 1997)



El diseño de pórticos con disipación de energía ha ganado popularidad debido a las ventajas que presenta respecto a la disminución de fuerzas y control de daño de la estructura.

En esta investigación se diseña mediante DDBD pórticos con disipadores de energía de tipo barras de pandeo restringido (Buckling restrained Braces B.R.B.) . La aplicación del procedimiento propuesto se demuestra con ejemplos de diseño de pórticos de diferentes geometrías

### **2.3 PRINCIPIOS BÁSICOS SOBRE DISIPADORES DE ENERGÍA.**

Un movimiento sísmico introduce energía a una estructura. Esta energía de entrada la estructura la divide en diferentes formas de energía. Los dos principales tipos de energía son:

Energía absorbida

Energía disipada

El comportamiento de la estructura puede mejorarse si una porción de la energía de entrada puede ser absorbida no por la estructura misma, sino por algún dispositivo que disipe energía. Esto se verá más claro considerando la relación de la conservación de energía, la cual se muestra a continuación:

$$E = E_k + E_s + E_h + E_d \quad \text{Ec. (2.1)}$$

La energía de entrada absoluta (E), es la sumatoria de la energía cinética ( $E_k$ ), la energía de deformación elástica recuperable ( $E_s$ ), energía disipada irre recuperable por el sistema estructural a través de la deformación inelástica ( $E_h$ ), y la energía disipada por amortiguamiento suplementario ( $E_d$ ). Estos dispositivos reducen la demanda de deformación y esfuerzos producidos por el sismo mediante el aumento del amortiguamiento estructural. Como resultado los esfuerzos inducidos por el sismo en la estructura se reducen en gran parte con respecto a la

estructura sin disipadores, reduciendo sustancialmente las incursiones inelásticas (daño) de la estructura. (Ricardo Oviedo, 2008)

La estructura sin disipadores de energía sobrevive el sismo severo disipando energía en sus elementos principales, los que sufren daño. En la estructura con disipadores, la energía es absorbida por estos dispositivos reduciendo significativamente las deformaciones y el daño estructural. (Gustavo L. Palazzo, 2003).

### 2.3.1 BARRAS DE PANDEO RESTRINGIDO

Dentro de una variedad de dispositivos que se han desarrollado hasta el momento, para aplicar a la presente investigación se escogió un tipo de disipador denominado BARRAS DE PANDEO RESTRINGIDO, ya que en la actualidad se ha venido utilizando este dispositivo con muy buenos resultados en países donde la vulnerabilidad sísmica es alta. (Constantin Crhistopoulos, 2006).

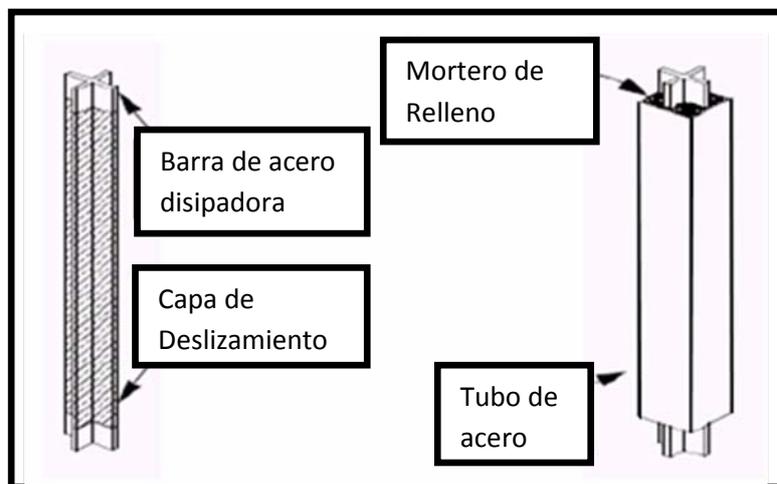


Fig. 2.1 Componentes de una barra de pandeo restringido (Gustavo L. Palazzo, 2003).

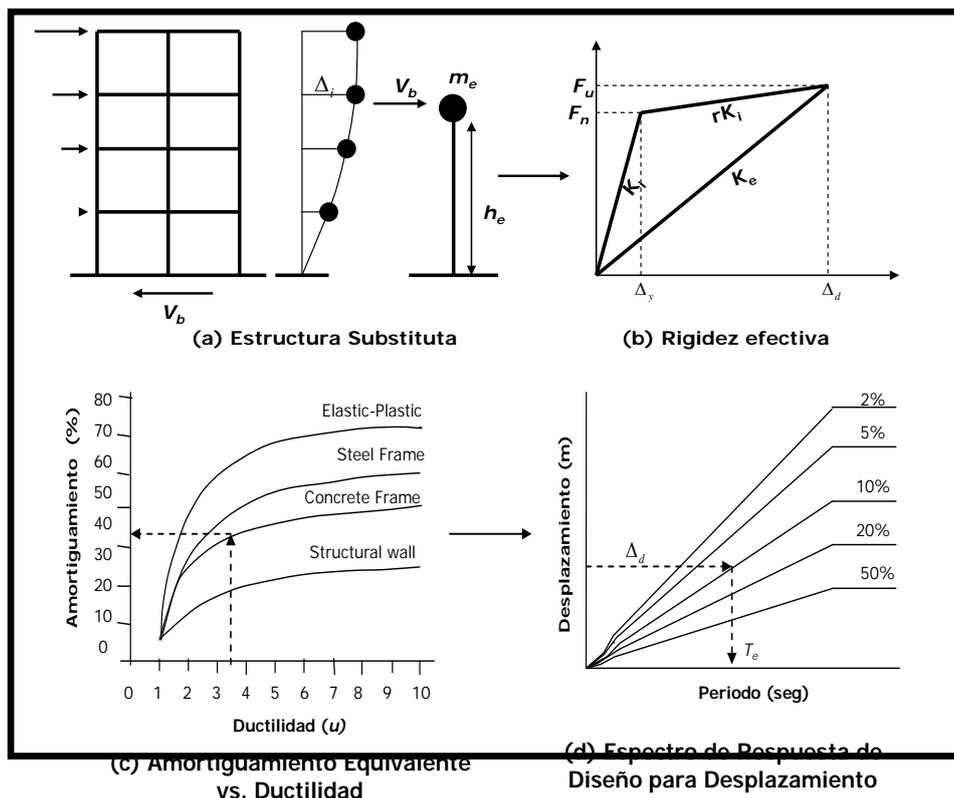
Se tratan de riostras metálicas con pandeo restringido, Estos dispositivos mejoran el comportamiento sísmico de las construcciones proporcionando resistencia y disipación de energía suplementaria (Oviedo, 2008). El principio básico en la construcción de una barras de pandeo restringido (Fig. 2.1). es evitar el pandeo de una barra central de acero, la cual disipa energía a través de ciclos de fluencia

estable de tracción – compresión. Para ello la barra central se ubica dentro de un tubo de acero relleno de hormigón o mortero. El dispositivo posee una capa de deslizamiento entre la barra de acero y el hormigón, de tal manera que las cargas axiales sean tomadas sólo por la barra central. Esta capa elimina la transferencia de corte durante la elongación / contracción de la barra disipadora, y acomoda su expansión lateral cuando la misma trabaja en compresión (Clark et al., 1999).

## 2.4 FUNDAMENTO DEL DISEÑO DIRECTO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS (DDBD)

En el DDBD, un desplazamiento máximo o meta es definido al inicio en función de un perfil de desplazamiento de diseño, y el procedimiento determina cual debe ser la rigidez y resistencia de la estructura de manera que el desplazamiento meta no sea excedido durante el sismo de diseño (Suárez 2005).

El DDBD es desarrollado y descrito en gran detalle por Priestley y Kowalsky (2000) y Priestley (2004). Su aplicación se basa en partir de un desplazamiento deseado para luego transformar la estructura real a un sistema de un grado de libertad, y finalmente obtener fuerzas de diseño sísmico.



**Fig. 2.2 Fundamento del método DDBD (Priestley y Kowalsky 2007)**

El método DDBD se fundamenta en el uso de una Estructura Sustituta (Shibata y Sozen 1976) como se muestra en la Fig. 2.2 (a), que es la representación de un sistema de múltiples grados de libertad (MDOF), en el uso de un sistema equivalente de un grado de libertad (SDOF). Dicho sistema está caracterizado por una rigidez secante, Fig.2.2 (b) y un amortiguamiento viscoso equivalente AVE Fig. 2.2 (c) que incorpora los efectos de la acción inelástica en la estructura sustituta ante una demanda de ductilidad ( $\mu$ )

$$\mu = \frac{\Delta_d}{\Delta_y} \quad \text{Ec. (2.2)}$$

donde:  $\Delta_d$  y  $\Delta_y$ , son el desplazamiento objetivo o de diseño y el desplazamiento de fluencia del SDOF.

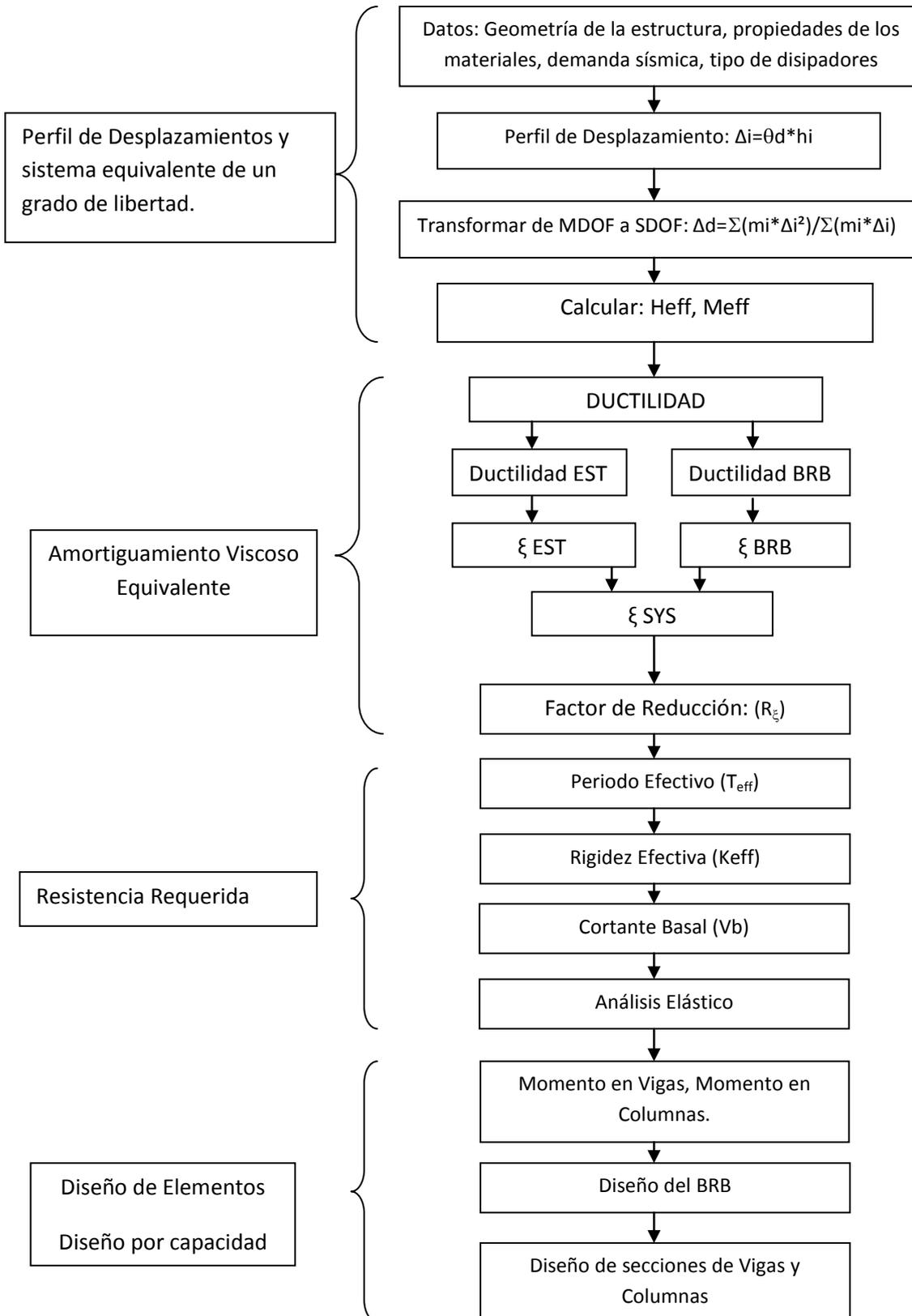
Una vez obtenida la  $\mu$  y el AVE, se lee en la Fig. 2.2 (d) el periodo efectivo del sistema ( $T_e$ ), para luego obtener así la rigidez efectiva de la estructura  $K_e$  de SDOF:

$$T_e = 2\pi \sqrt{\frac{m_e}{K_e}} \Rightarrow K_e = 4\pi^2 \frac{m_e}{T_e^2} \quad \text{Ec.(2.3)}$$

donde  $m_e$  es la masa efectiva de la estructura. Se puede determinar el cortante basal de diseño ( $V_b$ ), que genera el máximo desplazamiento de la estructura sustituida ( $\Delta_d$ ) con la siguiente Ec.

$$V_b = K_e \Delta_d \quad \text{Ec.(2.4)}$$

## 2.5 DISEÑO DIRECTO BASADO EN DESPLAZAMIENTOS PARA PÓRTICOS CON DISIPADORES DE ENERGÍA (BARRA DE PANDEO RESTRINGIDO)



### **FIGURA 2.3 Proceso de diseño DDBD con Disipador de Energía. BRB (Mauricio Sánchez)**

En la Fig. 2.3 se indica mediante un flujograma las distintas etapas del proceso de diseño de pórticos con disipadores de energía desde su inicio con la definición del tipo de estructura que se va a analizar hasta el diseño de los elementos estructurales que conforman el pórtico.

Este proceso de diseño de pórticos con disipadores de energía con DDBD se describe a continuación de manera detallada.

## **2.5.1 PERFIL DE DESPLAZAMIENTO Y SISTEMA EQUIVALENTE DE UN GRADO DE LIBERTAD**

### **2.5.1.1 Deriva de diseño.**

Como es usual en el DDBD el primer paso es definir el desplazamiento de diseño, para ello empezamos considerando que:

$$\text{Deriva de Diseño} = 0.5\xi_y \frac{L_b}{h_b} \quad \text{Ec.(2.5)}$$

El comportamiento de una estructura con disipadores de energía tipo Brazos de Pandeo Restringido se pretende que sea elástico y un diseño perfecto creemos que es considerando que el desplazamiento de diseño es igual a la deriva de fluencia, con la finalidad de que la estructura frente a la demanda sísmica de diseño no sufra daño alguno.

### **2.5.1.2 Perfil de desplazamientos**

Según el nivel de desempeño esperado, se determina un perfil de desplazamientos de piso  $\Delta_i$  [Figura 2.4]. Es así, que en función del número de pisos “n” se tiene las ecuaciones normalizadas para estructuras de concreto reforzado.

- Para estructuras con número de pisos  $\leq 4$

$$\delta_i = \frac{H_i}{H_n} \quad \text{Ec.(2.6)}$$

- Para estructuras con número de pisos > 4

$$\delta_i = \frac{4}{3} \left( \frac{H_i}{H_n} \right) \left( 1 - \frac{H_i}{4H_n} \right) \quad \text{Ec. (2.7)}$$

- Para determinar el desplazamiento del primer piso

$$\Delta_1 = \theta d * H_1 \quad \text{Ec.(2.8)}$$

- Para determinar el desplazamientos de los pisos superiores.

$$\Delta_i = \tilde{\delta}_i \frac{\Delta_1}{\delta_1} \quad \text{Ec.(2.9)}$$

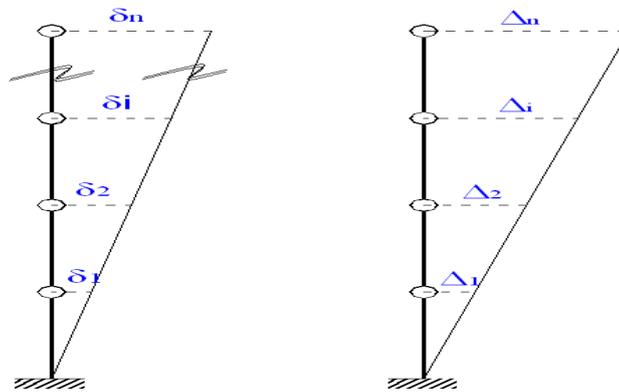


FIGURA 2.4 Perfil de derivas y desplazamientos (Mauricio Sánchez)

$(H_i)$  es la altura de piso,  $(\theta d)$  deriva de diseño.

### **2.5.1.3 Cálculo del desplazamiento del sistema.**

Una vez que se determina los desplazamientos de cada piso se procede a calcular el desplazamiento de diseño del sistema, de acuerdo al nivel de desempeño esperado, considerando la masa  $(m_i)$  y el desplazamiento en cada piso  $(\Delta_i)$ .

$$\Delta_d = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad \text{Ec.(2.10)}$$



Es importante determinar éste desplazamiento de la estructura ( $\Delta d$ ) [Ec. 2.10], el cual más adelante nos permitirá obtener el amortiguamiento viscoso equivalente del sistema ( $\xi_{sys}$ ).

#### **2.5.1.4 Cálculo de altura efectiva y masa efectiva**

Se debe considerar que la altura efectiva (altura de la fuerza lateral resultante) debe estar en el rango de 0.6 a 0.7 veces la altura del pórtico  $H_n$ . [Ec.2.11].

$$H_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i H_i)}{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)} \quad \text{Ec.(2.11)}$$

La masa efectiva se obtiene mediante [Ec. 2.12]:

$$m_e = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i \Delta_i)}{\Delta_d} \quad \text{Ec.(2.12)}$$

### **2.5.2 AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EQUIVALENTE**

#### **2.5.2.1 Ductilidad de la Estructura**

La ductilidad ( $\mu$ ) es un indicador de daño y disipación de la energía en la estructura, se calcula dividiendo el desplazamiento de diseño de la estructura ( $\Delta d$ ) para el desplazamiento de fluencia ( $\Delta y$ ) de la misma.

$$\mu_{est} = \frac{\Delta d}{\Delta_y} \quad \text{Ec.(2.13)}$$

Como se parte de la hipótesis de que la estructura alcanza únicamente el 80% del desplazamiento de fluencia ( $\Delta y$ ) entonces la ductilidad de la estructura es  $<1$ , para efectos de cálculo se asume.  $\mu_{est} = 1$

### 2.5.2.2 Ductilidad del BRB

La ductilidad del BRB se calcula dividiendo el desplazamiento de diseño del disipador ( $\Delta d_{dis}$ ) para el desplazamiento de fluencia del dispositivo ( $\Delta_{ydis}$ ). Ver Fig. 2.5

$$\mu_{dis} = \frac{\Delta d_{dis}}{\Delta_{ydis}} \quad \text{Ec.(2.14)}$$

$$Lb = \sqrt{Lclaro^2 + H^2} \quad \text{Ec.(2.15)}$$

$$Lb.\text{elong} = \sqrt{(Lclaro + \Delta i)^2 + H^2} \quad \text{Ec.(2.16)}$$

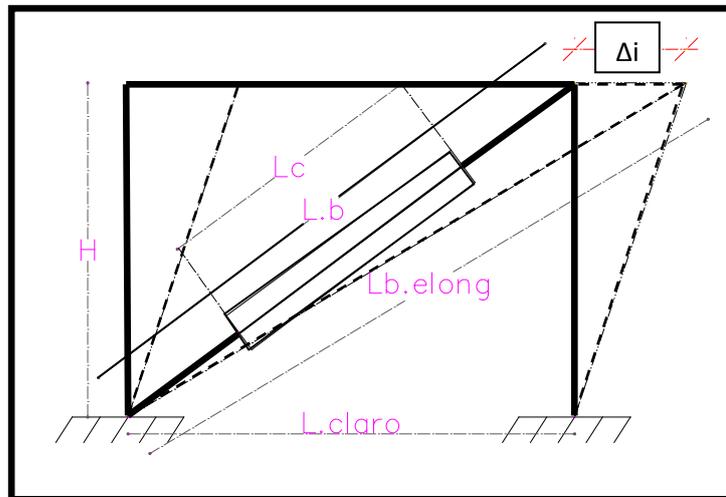


Fig. 2.5 Deformación del brazo (Mauricio Sánchez)

$$\Delta d_{dis} = Lb.\text{elong} - Lb \quad \text{Ec.(2.17)}$$

$$\Delta y_{dis} = \varepsilon_y * Lc \quad \text{Ec.(2.18)}$$

$$\varepsilon_y = \frac{F_y}{E_s} \quad \text{Ec.(2.19)}$$



### **2.5.2.3 Amortiguamiento viscoso del pórtico y dispositivo**

Para representar la energía disipada por la estructura del sistema de un grado de libertad (SDOF) se utiliza un amortiguamiento viscoso equivalente “ $\xi_{eq}$ ” (Priestley, 2000). Para determinar al AVE del pórtico utilizamos la Ec. 2.20

$$\xi_{eq} = 0.5 + 0.565 \left( \frac{\mu_{por} - 1}{\mu_{por} \pi} \right) \quad \text{Ec.(2.20)}$$

Para determinar el AVE del BRB se utiliza la Ec. 2.21 que se utiliza en acero.

$$\xi_{eq} = 0.5 + 0.577 \left( \frac{\mu_{dis} - 1}{\mu_{dis} \pi} \right) \quad \text{Ec.(2.21)}$$

### **2.5.2.4 Amortiguamiento Viscoso Equivalente del Sistema**

El Amortiguamiento Viscoso Equivalente del sistema se lo obtiene haciendo una combinación mediante el trabajo realizado tanto por la estructura como por el BRB

$$\xi_{sys} = \frac{\% \text{por} * \xi_{por} + \% \text{dis} * \xi_{dis}}{\% \text{por} + \% \text{dis}} \quad \text{Ec.(2.22)}$$

Para lo que se determina un porcentaje del amortiguamiento del pórtico y un porcentaje de amortiguamiento del disipador que se consideró que queda a criterio del diseñador.

### **2.5.2.5 Factor de Reducción**

Para encontrar el factor de reducción de desplazamiento debido a  $\xi_{SYS}$  se utiliza la Ec. (2.23).

$$R_{\xi} = \left( \frac{0.07}{0.02 + \xi_{SYS}} \right)^{1/2} \quad \text{Ec.(2.23)}$$

### **2.5.3 Resistencia Requerida**

Con referencia a la Figura 2.3 y una vez obtenido el amortiguamiento viscoso equivalente del sistema se debe calcular la resistencia requerida, obteniendo periodo efectivo, rigidez efectiva, cortante basal.

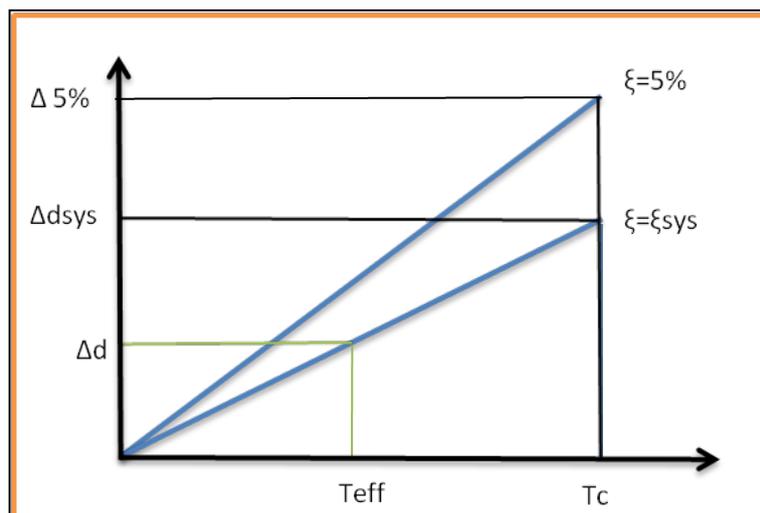
#### **2.5.3.1 Periodo Efectivo**

Para determinar el periodo efectivo ( $T_e$ ) de la estructura substituta ingresamos al espectro de desplazamiento reducido con  $\Delta_d$  se encuentra el  $T_e$  [Figura 2.6].

$$\Delta_{T_c,5\%} = \Delta_{\max} \quad \text{Ec. (2.24)}$$

$$\Delta_{T_c,\xi_{sys}} = \Delta_{T_c,5\%} R_\xi \quad \text{Ec.(2.25)}$$

$$T_e = T_c \frac{\Delta_d}{\Delta_{T_c,*} R_\xi} \quad \text{Ec.(2.26)}$$



**FIGURA 2.6 Espectro de Desplazamiento Reducido (Priestley)**

### **2.5.3.2 Rigidez Efectiva**

Una vez obtenidos el periodo y la masa efectiva, se determina la rigidez efectiva ( $K_{eff}$ ), la misma que se la obtiene con la Ec. (2.27)

$$K_{eff} = \frac{4 * \pi^2 * m_{eff}}{T_{eff}^2} \quad \text{Ec.(2.27)}$$

### **2.5.3.3 Cortante basal**

Luego se determina el cortante basal con la Ec. (2.28).

$$V_{BASE} = K_{eff} * \Delta_d \quad \text{Ec.(2.28)}$$

Para continuar con el diseño se procede a diseñar el pórtico con un determinado porcentaje del total del cortante basal que se deja a criterio del diseñador y el resto del total del cortante se utiliza para diseñar los dispositivos de disipación de energía, un criterio a tomarse por el diseñador es también el de incrementar en un porcentaje el valor tomado para diseñar el pórtico con la finalidad de asegurar un diseño dúctil de tal manera que el elemento a fallar en primer lugar del pórtico sean los disipadores de energía concentrando de esta manera el daño en los sistemas de aislamiento. Ec.(2.29).

$$V_d = \% * V_{Base} \quad \text{Ec.(2.29)}$$

### **2.5.3.4 Distribución de Cortante**

Para la distribución del cortante en todos los pisos se utiliza la distribución propuesta por Pettinga (2005) [Ec. 2.30]

$$F_i = (F_t) + 0.9V_d * \frac{m_i \Delta_i}{\sum m_i \Delta_i} \quad \text{Ec.(2.30)}$$

donde se considera  $F_t = 0.1V_d$  para el último piso y  $F_t = 0$  para los pisos inferiores.  $F_i$  es la fuerza lateral que se aplicará en cada nivel de la estructura.



## 2.6 DISEÑO DE ELEMENTOS

### 2.6.1 Diseño de vigas.

Una vez distribuido el cortante y encontrado mediante un análisis estático los momentos actuantes en las vigas se procede a diseñar las vigas mediante los criterios A.C.I.

### 2.6.2 Diseño de columnas

Se realiza la redistribución de momentos para encontrar los momentos que actúan en las columnas, para proceder a diseñarlas aplicando los requisitos del ACI

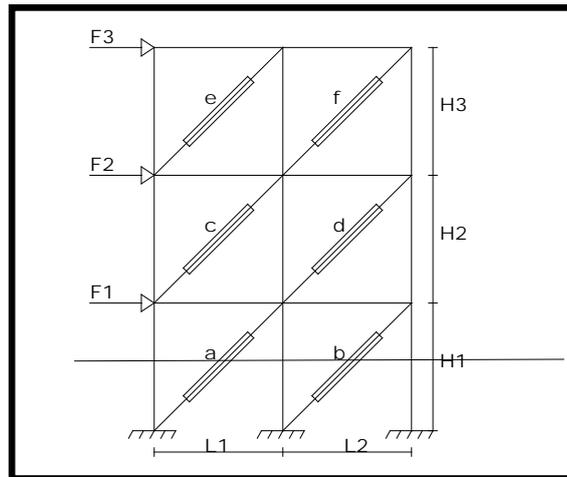
## 2.7 CÁLCULO DEL ÁREA DEL BRAZO. (Disipador).

Para determinar el área de acero que fluye del disipador, se distribuye el porcentaje determinado por el diseñador del total del cortante basal en el pórtico con la Ec.(2.30) y se calcula las fuerzas que actúan en cada brazo ( $P_{br}$ ). Para esto se resuelve como si se tratara de una celosía y esta fuerza axial que actúa en el brazo se utiliza para determinar el área necesaria para que soporte dicha fuerza. Se determina el área del disipador con la siguiente Ec.(2.31)

$$A_c = \frac{P_{br}}{F_{y_{br}}} \quad (2.31)$$

Donde  $P_{br}$  es la fuerza axial que actúa en el brazo,  $F_{y_{br}}$  es el límite de fluencia del acero del brazo.

A continuación se da una breve explicación de la forma de encontrar la fuerza actuante en los disipadores. Fig. 2.9



**Fig. 2.7 Pórtico de ejemplo para determinar fuerzas en brazos (Mauricio Sánchez)**

Para encontrar la fuerza que actúa en los brazos del primer piso que se les denomina ( $P_{br a}$ ,  $P_{br b}$ ) Realizamos un corte como indica la fig. 2.7 y se realiza sumatoria de fuerzas considerando las fuerzas que actúan sobre el corte que se realiza o sea ( $F1$ ,  $F2$ ,  $F3$ )

Sumatoria de fuerzas en x y se determina:

$$\Sigma_{F_x} = F1 + F2 + F3 + \left(\frac{L1}{L_{brazo}} * P_{br a}\right) + \left(\frac{L2}{L_{brazo}} * P_{br b}\right) \quad \text{Ec.(2.32)}$$

Luego sumatoria de fuerzas en y:

$$\Sigma_{F_y} = \left(\frac{H1}{L_{brazo}} * P_{br a}\right) + \left(\frac{H1}{L_{brazo}} * P_{br b}\right) \quad \text{Ec.(2.33)}$$

Si la fuerza en el brazo a es igual a la fuerza del brazo b se tiene:

$$P_{br} = (F1 + F2 + F3) * \left[\frac{L_{brazo}}{2L}\right] \quad \text{Ec.(2.34)}$$

Con la Ec.(2.34) se encuentra la fuerza actuante en el brazo que sería  $P_{br}$  que nos sirve para calcular el área del disipador.



Para determinar la fuerza que actúa en los brazos de los siguientes pisos se realiza lo mismo pero las fuerzas laterales que se tomaran en cuenta serian las que actúan sobre los disipadores que se están analizando. En este caso para disipadores del segundo piso las fuerzas son F2 y F3.

## **2.8 VERIFICACIÓN DEL DESEMPEÑO**

Una vez que se ha explicado el proceso de diseño de pórticos con disipadores de energía mediante DDBD, se recomienda realizar una evaluación del desempeño del mismo. A continuación se presenta dos tipos de análisis que se puede utilizar para realizar dicha verificación como es el Pushover, y el análisis inelástico de historia en el tiempo (ITHA).

### **2.8.1 Análisis estático (Pushover).**

El análisis estático PUSHOVER, es un método que nos permite el estudio de la capacidad, resistencia, deformación de una estructura, bajo una distribución de fuerzas. Este análisis se realiza sometiendo a la estructura a determinados estados de cargas laterales "Fi" que se incrementan de manera lineal hasta que la estructura alcanza su capacidad máxima. Utilizando este procedimiento, es posible identificar la secuencia del agrietamiento, fluencia y fallo de los componentes estructurales, y la historia de deformaciones y cortantes en la estructura que corresponde a la curva de capacidad.

Para este análisis existen muchas herramientas de las cuales en esta investigación se trabaja con OPENSEES.

### **2.8.2 Análisis inelástico de historia en el tiempo (ITHA)**

Una forma de verificar el diseño realizado, es la aplicación de un análisis dinámico inelástico o ITHA. Siendo este tipo de análisis, una herramienta desarrollada para determinar el desempeño de una estructura.

La mayoría de procesos sofisticados para el análisis de diseños son los análisis inelásticos de historia en el tiempo, en donde se tiene como propósito determinar el desempeño estructural, prediciendo fuerzas y desplazamientos bajo una amenaza sísmica. Para ello se requieren registros de acelerogramas que

representen al sismo de diseño, pues una consideración importante sería verificar la respuesta de las estructuras anticipadamente, después del diseño detallado de desplazamientos.

Como ya se explicó se utilizara para la verificación la herramienta OPENSSES para lo que se debe primero seleccionar registros sísmicos compatibles con el espectro de diseño con el cual se diseño el pórtico. Luego se hace el modelo matemático de la estructura en el cual para modelar las secciones de hormigón armado y el brazo de pandeo restringido se utilizó los siguientes materiales:

**Acero.-** el acero utilizado es el modelo *Steel01* el cual tiene un comportamiento elasto-plástico como se muestra en la figura 2.8.

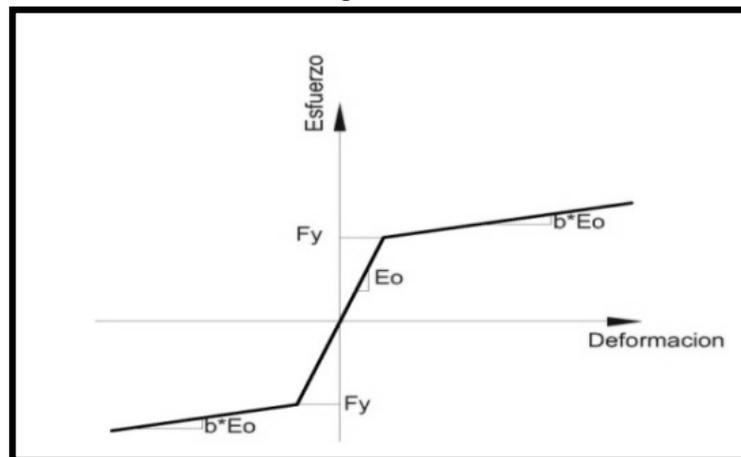


FIGURA 2.8 Diagrama Esfuerzo-Deformación Steel01 (Frank Mckenna, 2005)

**Concreto.-** El concreto se lo modeló utilizando el *Concreto01* el cual tiene un comportamiento propuesto por Kent-Scott-Park (Kent and Park 1971) con degradación lineal de rigidez carga-descarga de acuerdo con el trabajo de Karsan-Jirsa (Karsan and Jirsa 1969) Fig. 2.9

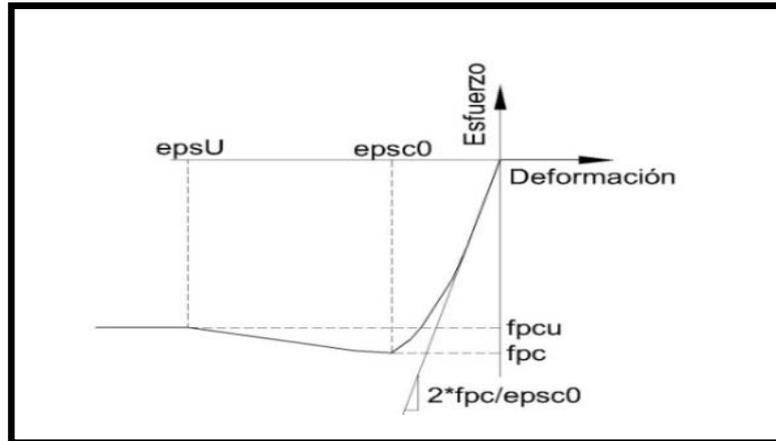


FIGURA 2.9 Diagrama Esfuerzo-Deformación Concrete01 (Frank McKenna, 2005)

**Secciones.-** Las secciones se las modela como tipo fibra, en la cual se creó una sub región con referencia a la figura 2.10

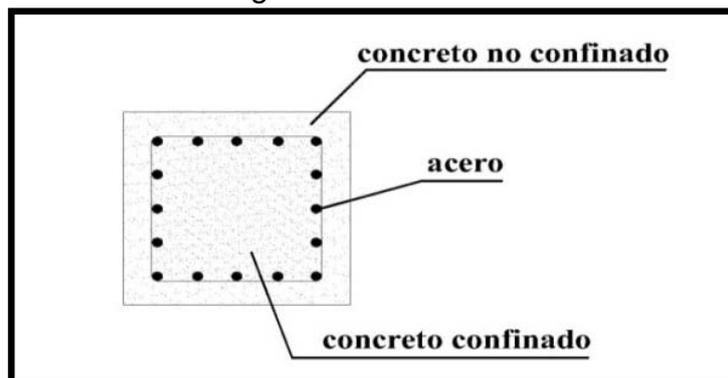
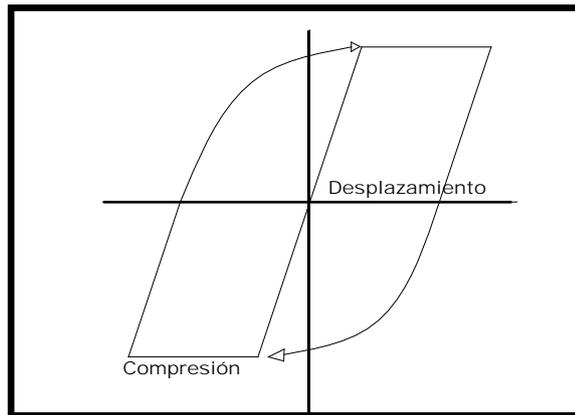


FIGURA 2.10 Modelo de sección tipo fibra (Frank McKenna, 2005)

**BRB.-** Los dispositivos tipo barra de pandeo restringido se los modela como dos ELEMENT ELASTICBEAMCOLUMN que se encuentran en una esquina empotrados con la unión viga columna y unidos a un elemento truss con una longitud determinada igual a 0.5 la longitud del brazo y más características correspondientes al tipo de acero seleccionado necesarias para su desempeño adecuado.

*Implementación del diseño directo basado en desplazamientos para pórticos con disipadores de energía*



**FIGURA 2.11 Comportamiento histerético de BRB (Nippon steel corporation)**

En la figura 2.11 se ve el comportamiento histerético del brazo de pandeo restringido que como se ve tiene el mismo comportamiento tanto a tensión como a compresión esto es debido al tubo recubierto de hormigón que evita el pandeo del acero central, una vez ejecutado el análisis, se obtienen los desplazamientos máximos y derivas de piso máximos que sirven para correlacionarlas con las del diseño.

# **CAPÍTULO**

## **III**

**APLICACIÓN PRÁCTICA**

### 3.1 DESARROLLO COMPLETO DE UNO DE LOS PÓRTICOS ANALIZADOS

**Objetivo.-** Diseñar un pórtico con disipadores de energía que resista la acción del sismo representada en la fig. 3.1 Para un periodo de esquina  $T_c = 4.5$  seg. y un desplazamiento de diseño  $S_d = 1.027$ m, de tal manera que el pórtico no sufra derivas mayores a las de fluencia y por lo tanto no sufra daño.

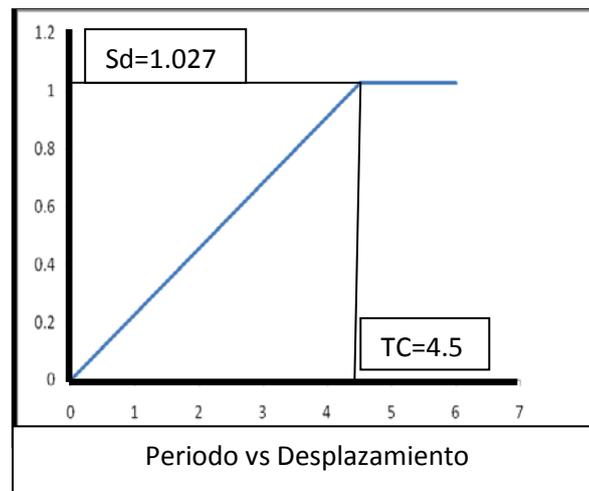
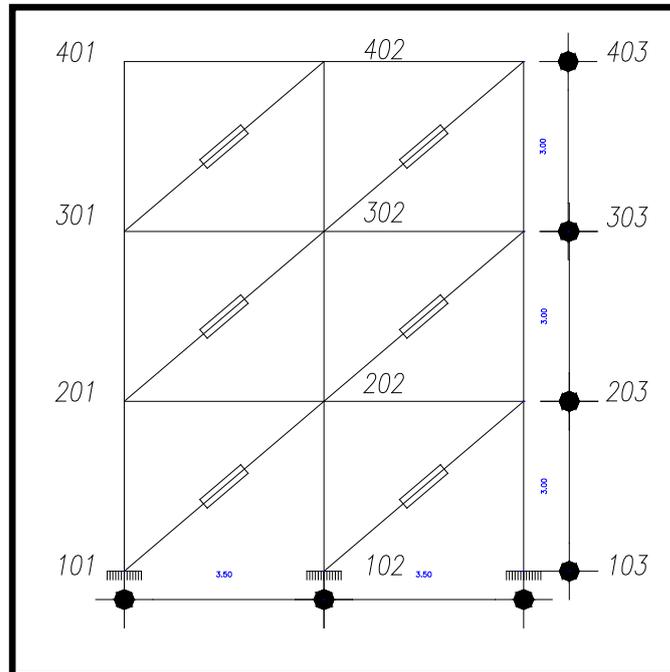


Fig. 3.1 Espectro de desplazamiento (Mauricio Sánchez)

Para este procedimiento se considero un pórtico de tres pisos y dos vanos cuyas propiedades se indican en la tabla 3.1:

Cuadro 3.1 Datos generales ejemplo de aplicación (Mauricio Sánchez)

<u>DATOS</u>					
#Pisos	# Claros				
3	2				
<b>Geometría</b>					
HPiso	Bviga	Hviga	BCol	HCol	Claros
3.0m	0.25m	0.30m	0.4m	0.4m	3.5m
<b>Propiedades de Material</b>					
f'c	Wc	fy	Es	CV	CM
21	24	420	200000	2.5	7
<b>Desempeño</b>					
Deriva	Sd	Tc			
$\theta_y$	1.027	4.5			



**Fig. 3.2 Pórtico de concreto reforzado para ejemplo de diseño PES (Mauricio Sánchez)**

Las columnas son de sección variable en los dos primeros pisos tenemos secciones de 40cm x 40cm y en el tercer piso secciones de 30cm x30cm por lo tanto el peso por parte de las columnas que actuarán en los pisos será:

Piso 1 y 2: **34.56 KN, 27KN**

Piso 3 **9.72KN**

El peso aportado por las vigas a cada piso es:

Las vigas son constantes en los tres pisos de 25cm de base por 30 cm de altura, por lo tanto los pesos son:

Piso 1,2 y 3: **12.60KN**

Si se tiene una carga viva de 2.5KN/m y una carga muerta de 7KN/m, el peso total por las cargas es 66.5 KN.

Se realiza la sumatoria de todos los pesos calculados para determinar de esta manera el peso total de cada piso.

Peso total Piso 1 es 113.66 KN.

Peso total Piso 2 es 106.10 KN



El peso total del piso 3 es 88.82 KN.

Por lo tanto la sumatoria total del pórtico es igual a la suma de los tres pisos que es: 308.58 KN

La masa la determinamos dividiendo el peso de cada piso para la gravedad

$$(9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}):$$

Masa piso 1:

$$\frac{88.82}{9.81} = 9.05 \frac{\text{KN}}{\text{m/s}^2}$$

Masa Piso 2:

$$\frac{106.10}{9.81} = 10.82 \frac{\text{KN}}{\text{m/s}^2}$$

Masa piso 3:

$$\frac{113.66}{9.81} = 11.59 \frac{\text{KN}}{\text{m/s}^2}$$

## PERFIL META

Como se tiene una estructura menor a 4 pisos utilizamos para determinar el desplazamiento de cada piso las ecuaciones 2.6 y 2.8 respectivamente:

### PASO I: Determinación del Perfil meta

$$\delta_i = \frac{H_i}{H_n}$$

$$\delta_1 = \frac{3}{9} = 0.3333$$

$$\delta_2 = \frac{6}{9} = 0.6667$$

$$\delta_3 = \frac{9}{9} = 1.000$$

### Deriva de fluencia

Se toma en cuenta la deriva de fluencia como la deriva de diseño del pórtico ya que de esta manera se considera que la estructura no tenga daño y por lo tanto sea un buen diseño.

### Límite de fluencia

$$f_{ye} = 1.1 \times f_y$$

$$f_{ye} = 1.1 \times (420) = 462 \text{ Mpa}$$

### Deformación unitaria

$$\varepsilon_y = \frac{f_{ye}}{E_s}$$

$$\varepsilon_y = \frac{462}{200000} = 0.00231$$

$$\theta_y = 0.5 \varepsilon_y \frac{L_b}{h_b}$$

$$\theta_y = 0.5 \times (0.00231) \times \frac{3.5}{0.30} = 0.01348 = \theta_d$$

Se determina el desplazamiento del primer piso con Ec(2.8) Fig. 3.2

$$\Delta_1 = \theta_d \times h_1$$

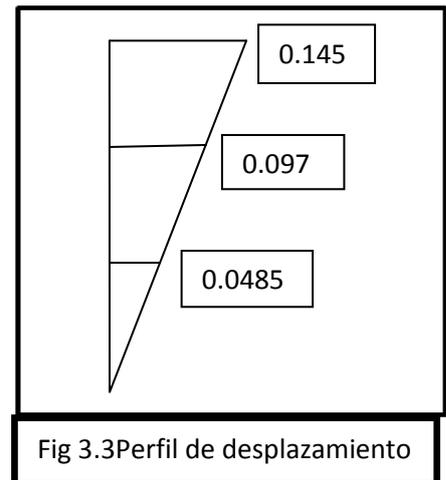
$$\Delta_1 = 0.01348 \times 3 = 0.0404 \text{ m}$$

### Para niveles > 1

Se utiliza la ecuación 2.9

$$\Delta_2 = 0.667 \times \frac{0.04851}{0.333} = 0.0809 \text{ m}$$

$$\Delta_3 = 1 \times \frac{0.04851}{0.333} = 0.1213 \text{ m}$$



En la tabla 3.2 se resume los datos que se calculó para proseguir con el diseño

Nivel	Hi	Mi	δi	Δi	mi. Δi	mi. Δi <sup>2</sup>	mi. Δi.Hi
3	9	9.05	1	0.1213	1.0980	0.1332	9.88
2	6	10.82	0.667	0.0809	0.8744	0.0707	5.246
1	3	11.59	0.333	0.0404	0.4684	0.0189	1.405
	Σ	34.68		Σ	2.44	0.2228	16.534

Tabla 3.1 Resultados de Diseño (Mauricio Sánchez)

## PASO II: TRANSFORMACIÓN DE LA ESTRUCTURA AL SISTEMA DE UN GRADO DE LIBERTAD

### DESPLAZAMIENTO EQUIVALENTE

Se determina el desplazamiento de diseño con Ec.(2.10)

$$\Delta_d = \frac{0.222}{2.44} = 0.09127\text{m}$$

### ALTURA EFECTIVA

La altura efectiva se determina con Ec.(2.11)

$$H_e = \frac{16.334}{2.44} = 6.77\text{m}$$

### MASA EFECTIVA

La masa efectiva se determina con la Ec.(2.12)

$$m_e = \frac{2.44}{0.09127} = 26.74$$

## PASO III: DUCTILIDAD

### DUCTILIDAD DEL PÓRTICO.

La ductilidad del pórtico se calcula con la Ec.(2.13), Pero en este caso como se está trabajando con una deriva de diseño igual a la deriva de fluencia la ductilidad es 1.

### DUCTILIDAD DEL BRB

Para pisos  $\leq$  a 4, la ductilidad de los dispositivos será igual debido a que el desplazamiento será lineal, por lo tanto se calcula la ductilidad de un sólo dispositivo. Se calcula la ductilidad del dispositivo analizando la fig. 3.3 y determinando los valores de las ecuaciones (2.14) a la Ec.(2.19).

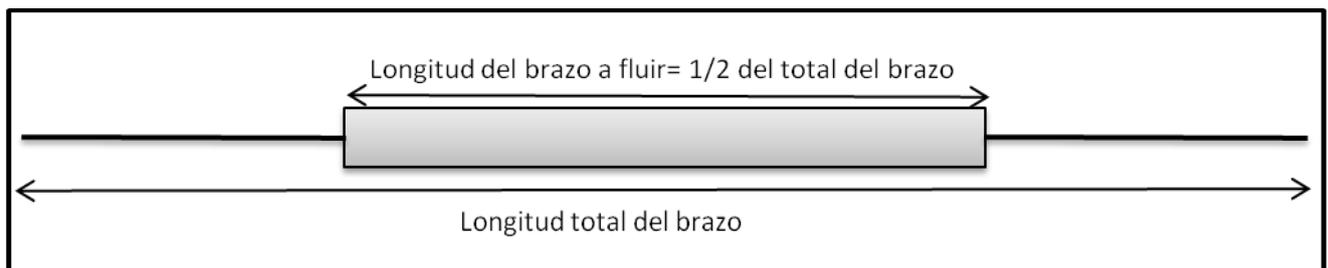
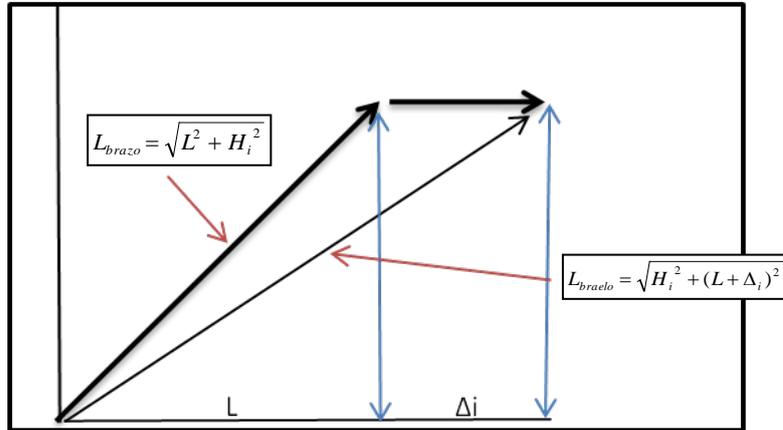


Fig.3.4 cálculo de longitudes de brazo (Mauricio Sánchez)



$$\Delta_{ydis} = [(\varepsilon_Y \times 0.5 \times L_b)]$$

El desplazamiento de fluencia del dispositivo se calcula multiplicando la deformación unitaria del acero utilizado, por la longitud del brazo dividido para dos como se ve en la fig. 3.3 (a).

$$\Delta_{ydis} = [(\xi_Y \times 0.5 \times (\sqrt{H^2 + L^2})]$$

$$\xi_y = (345/200000) = 0.001725$$

$$\Delta_{ydis} = [(0.001725 \times 0.5 \times (\sqrt{3^2 + 3.5^2})] \quad \Delta_{ydis} = 0.003976$$

$$L_{brazo} = \sqrt{L^2 + H_i^2} = \sqrt{3.5^2 + 3^2} = 4.60977m$$

Ductilidad de los brazos

$$\Delta_i = 0.0404m$$

analizando la fig. 3.3 (b) se concluye que:

$$L_{braelo} = \sqrt{H_i^2 + (L + \Delta_i)^2} = \sqrt{3^2 + (3.5 + 0.0404)^2} = 4.640m$$

El desplazamiento de diseño del dispositivo se calcula restando la longitud del brazo elongado menos la longitud normal del brazo.

$$\Delta d_1 = 4.640 - 4.609 = 0.03076m$$

La ductilidad se la determina dividiendo el desplazamiento de diseño para el desplazamiento de fluencia

$$\mu_{dis} = \frac{\Delta d_{dis}}{\Delta_{ydis}} = \frac{0.03070}{0.003976} = 7.738$$

#### **PASO IV: AMORTIGUAMIENTO VISCOSO EQUIVALENTE**

##### **Pórtico:**

Como la ductilidad del pórtico es 1, el amortiguamiento es 5%

##### **Dispositivo:**

Se determina mediante la Ec.(2.21)

$$\xi_{dis} = 5 + 57.7 \times \left( \frac{9.29 - 1}{9.29 \pi} \right) = 20.99\%$$

##### **Amortiguamiento del Sistema:**

El amortiguamiento del sistema se determina con la Ec.(2.22)

En nuestra investigación se ha decidido dividir el amortiguamiento en 70% del cortante basal para el pórtico y el 30% restante del cortante basal se lo utiliza en el diseño de los dispositivos.

$$\xi_{sys} = \left( \frac{0.7 \times 5 + 0.3 \times 20.99}{0.7 + 0.3} \right) = 9.80\%$$

#### **FACTOR DE REDUCCION.**

El factor de reducción se lo calcula con la Ec.(2.23)

$$R_{\xi} = \left( \frac{7}{2 + 9.92} \right)^{1/2} = 0.77$$

## PASO V: RIGIDEZ REQUERIDA

### PERIODO EFECTIVO

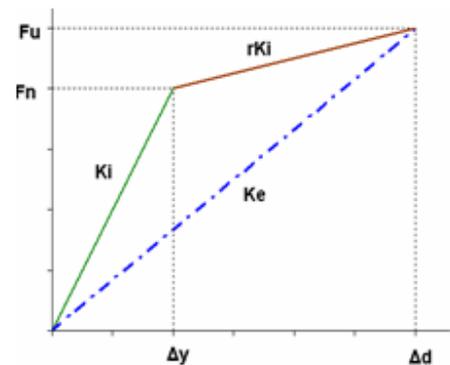
$$T_e = T_c \frac{\Delta_d}{S_d * R_{\xi}}$$

$$T_e = 4.5 \frac{0.09127}{1.027 * 0.77} = 0.519 \text{seg}$$

### RIGIDEZ EFECTIVA

$$K_{\text{eff}} = \frac{4 \times \pi^2 \times m_{\text{eff}}}{T_{\text{eff}}^2}$$

$$K_{\text{eff}} = 3915.63 \text{KN/m}$$



### CORTANTE BASAL

$$V_{\text{base}} = K_{\text{eff}} \times \Delta_d$$

$$V_{\text{base}} = 357.41 \text{KN}$$

El cortante de diseño con el que diseñaremos el pórtico será. Ec. 2.29 con el 70%

$$V_d = 285.93 \text{ KN}$$

Y el Cortante para diseñar los disipadores será:

$$V_{\text{dis}} = 107.22 \text{KN}$$

Distribuyendo el cortante basal en los pisos del pórtico con Ec.2.30 tenemos:

$$F_1 = 49.38 \text{ KN}$$

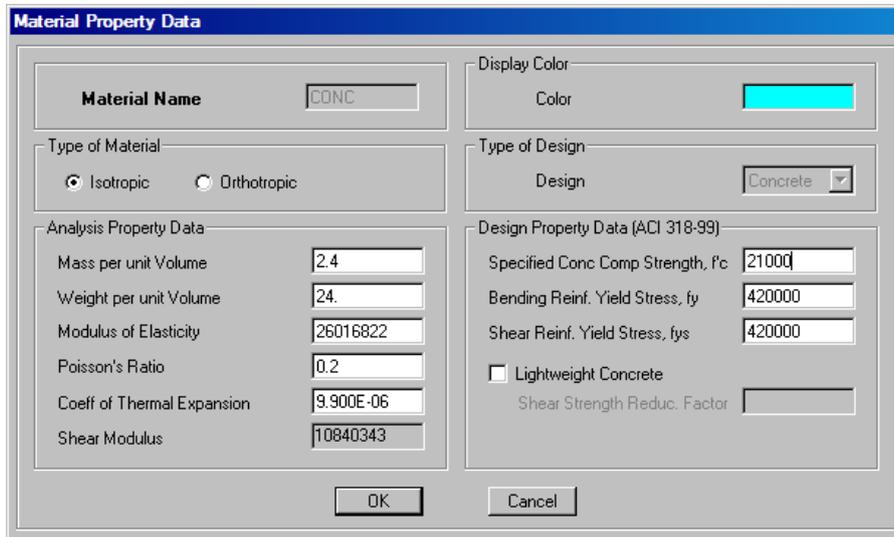
$$F_2 = 92.19 \text{ KN}$$

$$F_3 = 144.36 \text{ KN}$$

Teniendo ya todos estos datos se procede a ingresar al programa Etabs para realizar el análisis elástico tomando en cuenta las propiedades del pórtico como de los materiales.

## ANÁLISIS ELÁSTICO

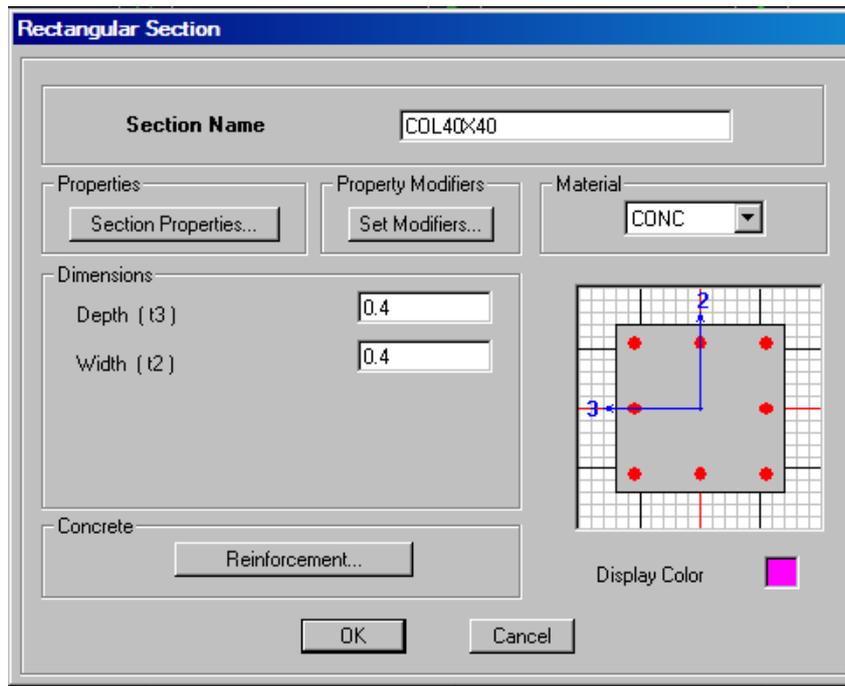
El análisis elástico se lo realiza en el programa Etabs, cuyas propiedades se ven a continuación.



The image shows a dialog box titled "Material Property Data" with the following fields and values:

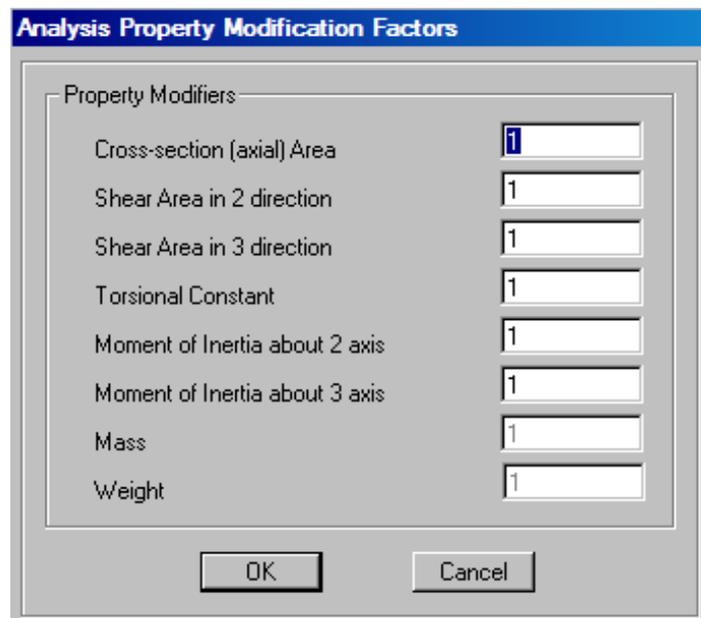
Field	Value
Material Name	CONC
Type of Material	<input checked="" type="radio"/> Isotropic <input type="radio"/> Orthotropic
Type of Design	Concrete
Design	Concrete
Mass per unit Volume	2.4
Weight per unit Volume	24.
Modulus of Elasticity	26016822
Poisson's Ratio	0.2
Coeff of Thermal Expansion	9.900E-06
Shear Modulus	10840343
Specified Conc Comp Strength, f'c	21000
Bending Reinf. Yield Stress, fy	420000
Shear Reinf. Yield Stress, fys	420000
Lightweight Concrete	<input type="checkbox"/>
Shear Strength Reduc. Factor	

**Imagen 3.1 Propiedades del concreto en Etabs**



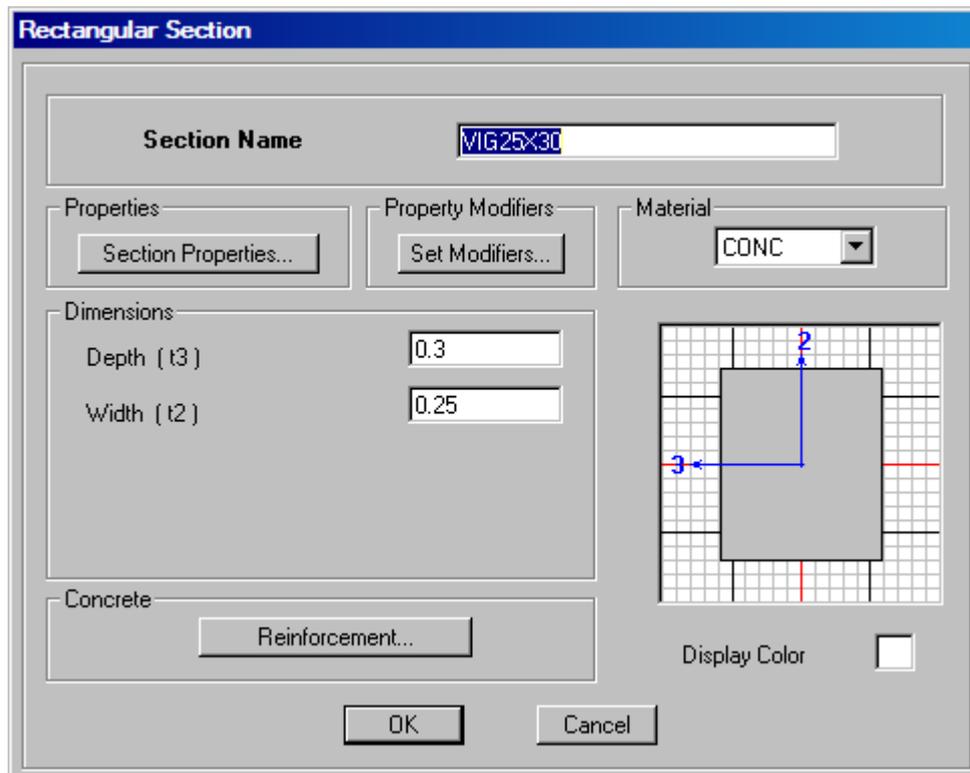
**Imagen 3.2 Columnas utilizadas para 1 y 2 piso**

Como se ve en la img. 3.3 los coeficientes que se ha tomado son para que el hormigón no se agriete.



**Imagen 3.3 Coeficientes utilizados en columnas**

Viga de 25cm. X 30cm. fig.3.7



**Imagen 3.4 Sección de viga utilizada**

Haciendo correr el programa y una vez que se han distribuido todas las fuerzas que actúan en el pórtico, se encuentra los cortantes y momentos. Tabla 3.3 y 3.4

**Cuadro 3.2 Cortante Vigas Sismo (Mauricio Sánchez)**

Nivel	Viga 1		Viga 2	
1	84.12	84.12	83.87	83.87
2	86.67	86.87	86.48	86.48
3	43.88	43.88	43.71	43.71

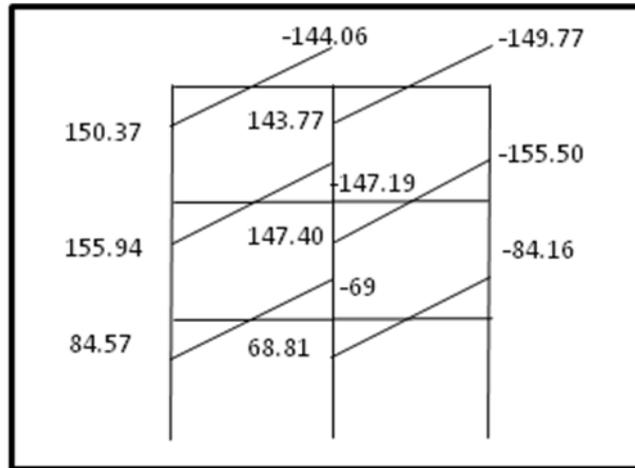
**Cuadro 3.3 Momentos Vigas sismo (Mauricio Sánchez)**

Nivel	Viga 1		Viga 2	
1	150.37	-144.06	143.77	-149.77
2	155.94	-147.40	147.19	-155.50
3	84.57	-69.00	68.81	-84.16

### ***Redistribución de momentos en vigas***

Para realizar la redistribución se lo hace sacando el promedio de los momentos positivos y negativos de todo el nivel, tomando en cuenta que la diferencia entre el

momento redistribuido y el inicial sea menor al 30% del máximo momento del nivel.



**Fig. 3.8 Momentos en vigas (Mauricio Sánchez)**

### **Momentos en vigas**

Primer piso

146.99KN.m

Segundo Piso

151.50KN.m

Tercer Piso

76.63KN.m

### **DISEÑO DE MOMENTOS EN COLUMNAS**

$$\text{MomCol}_3 = \text{MomRed} \times \text{FactorSobresistencia} = 146.99 \times 1.25 = 183.74\text{KN.m}$$

$$\text{MomCol}_2 = \text{MomRed} \times \text{FactorSobresistencia} = 155.50 \times 1.25 = 189.38\text{KN.m}$$

$$\text{MomCol}_1 = \text{MomRed} \times \text{FactorSobresistencia} = 76.63 \times 1.25 = 95.79\text{KN.m}$$

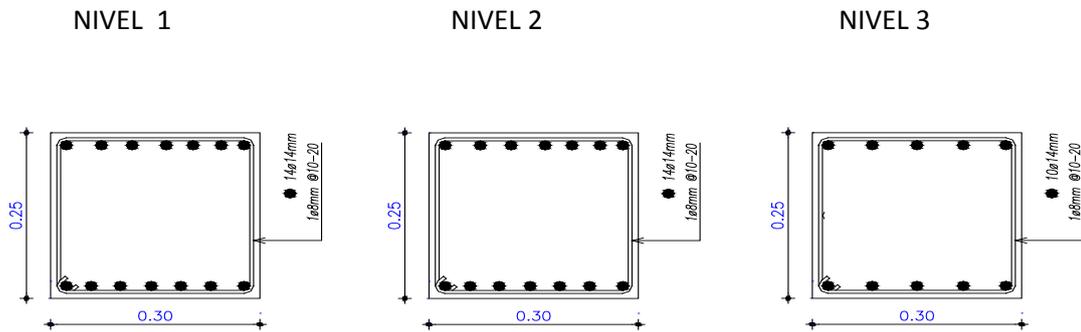
### **DISEÑO DE ELEMENTOS**

Para diseñar las vigas del pórtico se lo realizó aplicando los criterios del A.C.I.

Y se determina las cantidades de acero. Tabla 3.5

**CUADRO 3.4 Sección de Reforzamiento en Vigas (cm<sup>2</sup>) (Mauricio Sánchez)**

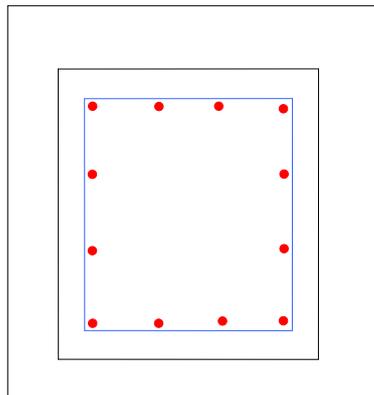
Nivel	Viga 1	Viga 2	Viga 3
1	10.77	10.77	10.77
2	10.77	10.77	10.77
3	7.69	7.69	7.69



**FIGURA 3.6 Diseño de sección viga por DDBD (Mauricio Sánchez)**

**REFORZAMIENTO EN COLUMNAS**

Para determinar el acero en columnas se lo realiza aplicando los criterios ACI.

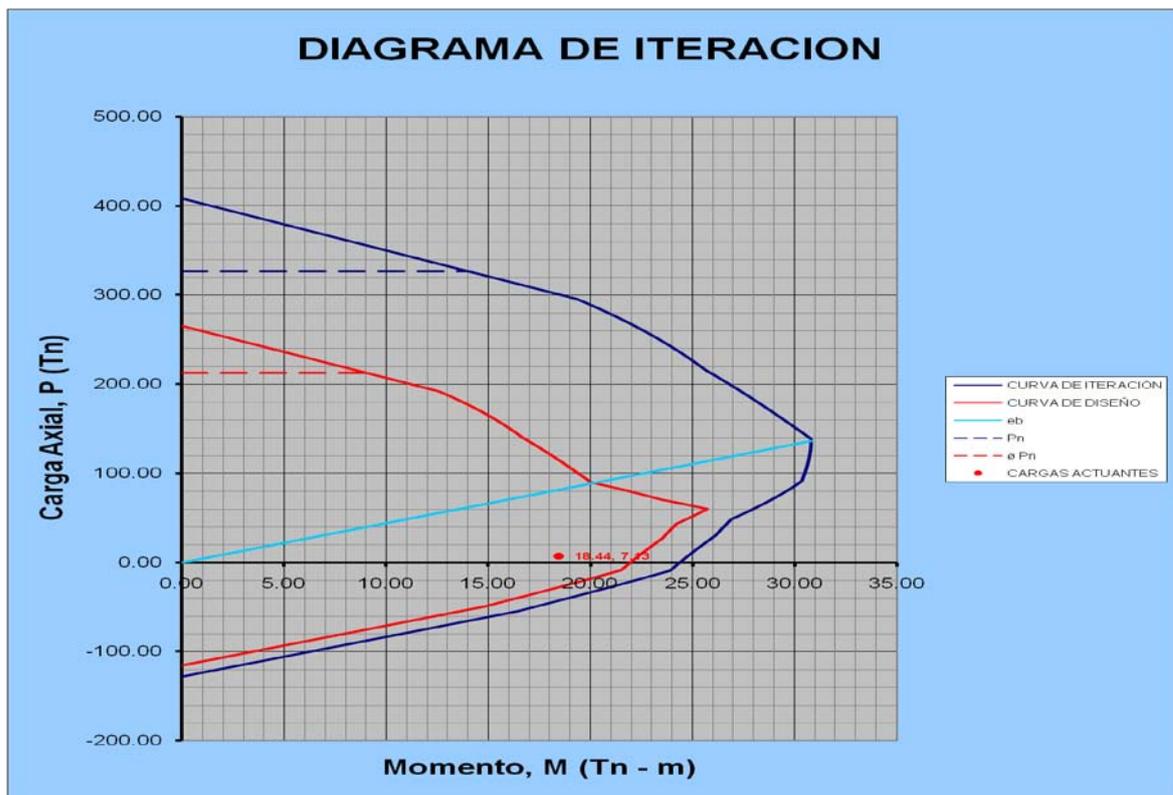


**Fig. 3.10 Armado de sección de columnas de primer y segundo piso (12 varillas de 18mm),tercer piso(12 varillas de 16mm)**

Nivel	Col 1	Col 2	Col 3
1	30.5	30.5	30.5
2	30.50	30.50	30.5
3	24.12	24.12	24.12

**Cuadro 3.5 Reforzamiento en columnas cm<sup>2</sup> (Mauricio Sánchez)**

Nivel1: 12 varillas de 18mm  
 Nivel2: 12 varillas de 18mm  
 Nivel3: 12 varillas de 16 mm



**Gráfico.3.1 Diagrama de iteración columnas primer piso**

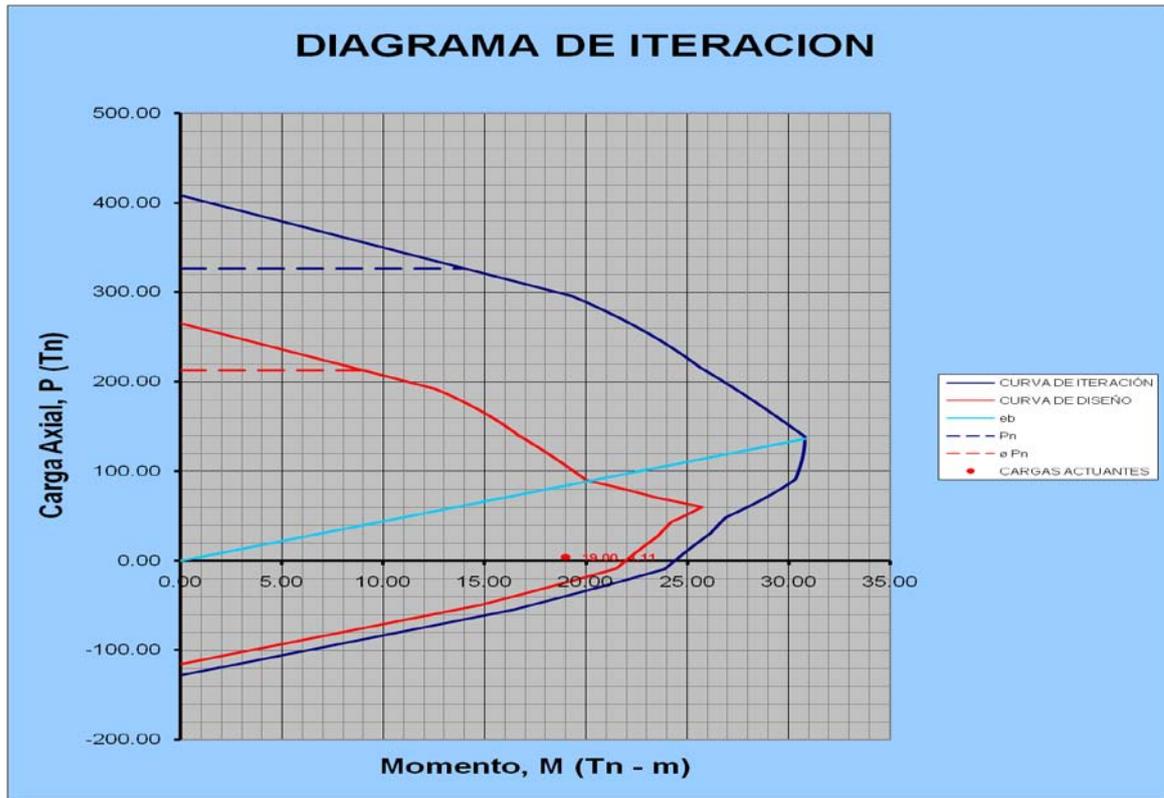
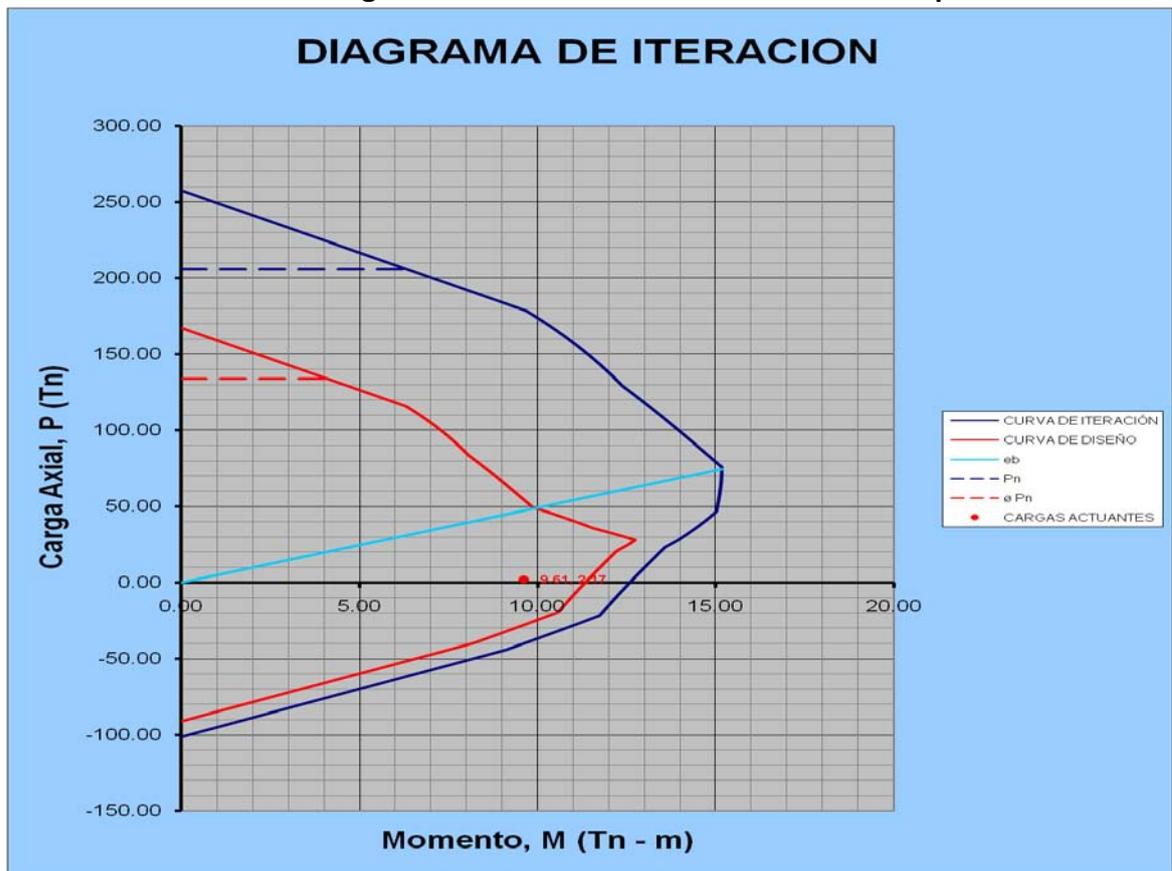


Gráfico.3.2 Diagrama de iteración de la columnas del 2do piso



### Gráfico.3.3 Diagrama de iteración de las columnas del tercer piso

Podemos observar en las graficas 3.11, 3.12, 3.13 las secciones de las columnas resisten las cargas a las que están sometidas.

### CALCULO DEL AREA DEL DISIPADOR

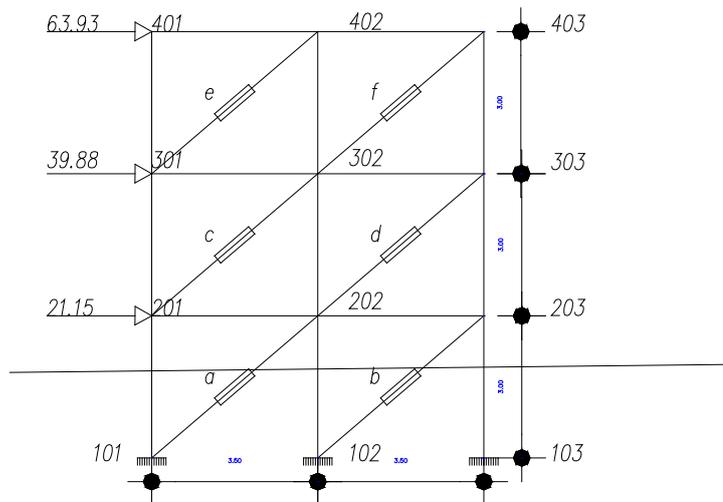


Fig.3.8 Distribución de 30% de cortante para determinar área de acero del disipador (Mauricio Sánchez)

Con las ecuaciones 2.31 a 2.34 encontramos el área de los disipadores.

$$A1=2.4 \text{ cm}^2$$

$$A2=2.0 \text{ cm}^2$$

$$A3=1.2 \text{ cm}^2$$

Determinadas las secciones y cantidades de acero, se procede a construir el modelo en el lenguaje tcl, para ser luego ejecutado en el programa OpenSees y realizar el análisis. ITHA.

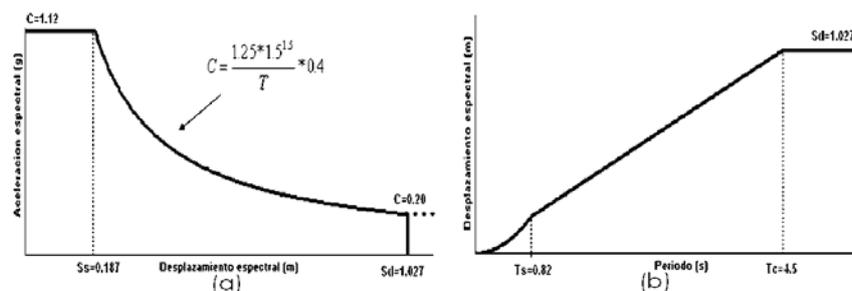
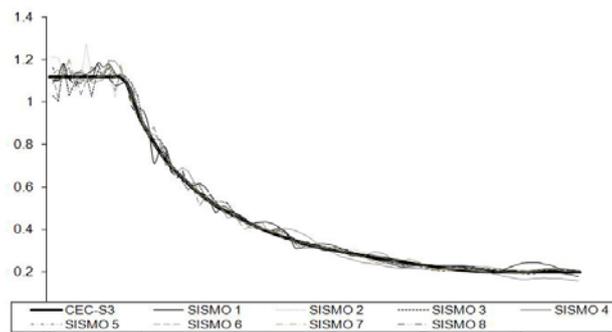


FIGURA 3.9 Espectro de diseño (Priestley)

En esta investigación se utilizó 8 registros sísmicos [Tabla 3.7], estos fueron escalados al espectro de diseño que se utilizó para estos pórticos [Figura 3.16], los cuales se los aplicó al pórtico a través del software OPENSEES, obteniendo desplazamientos por piso de cada uno de ellos tabla 3.8.

SISMOS ESCALADOS			
#	Nombres	Lugar	Fecha
1	ANDERSON DAM DOWNSTREAM,	Loma Prieta	18/10/1989
2	CASTAIC OLD RIDGE RT,	Northridge	17/01/1994
3	FREMONT MISSION SJ	Loma Prieta	18/10/1989
4	GILROY ARRAY #6,	Loma Prieta	18/10/1989
5	GILROY GAVILAN COLL,	Loma Prieta	18/10/1989
6	LAKE HUGHES #1	Northridge	17/01/1994
7	LITTLEROCK BRAINARD CAN	Northridge	17/01/1994
8	PEARBLOSSOM PUMP	San Fernando	09/02/1971

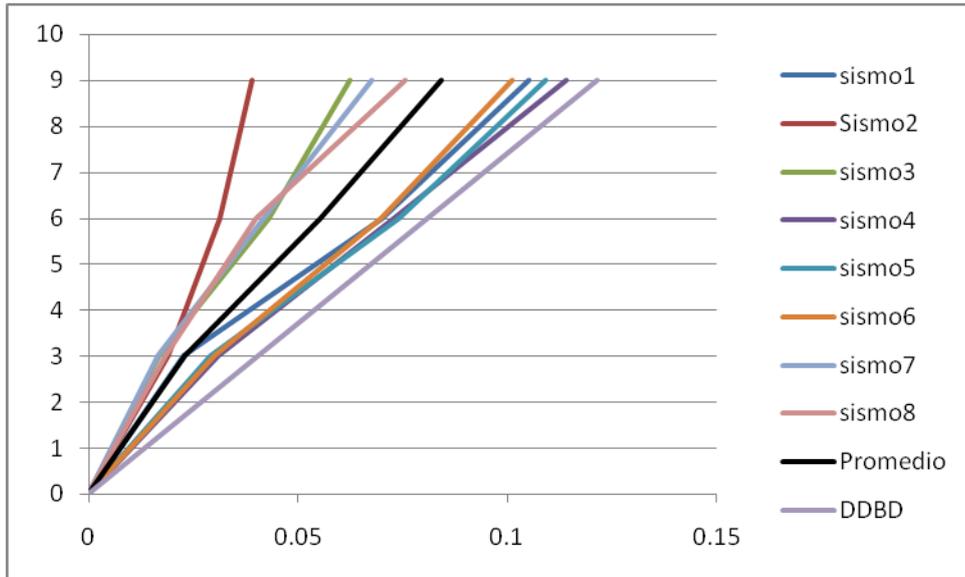
**Cuadro 3.6 Registros sísmicos**



**FIGURA 3.10 Sismos escalados**

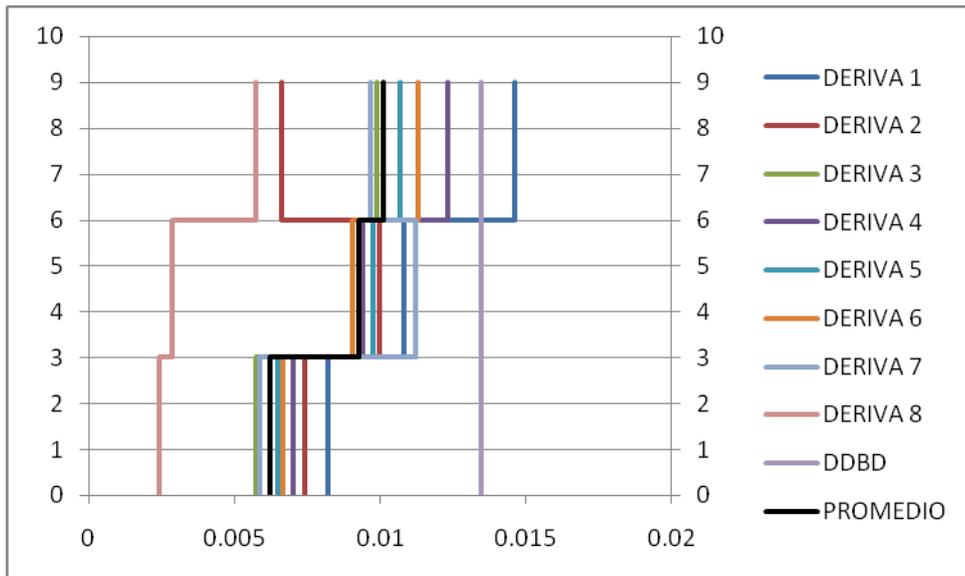
ALTURA	DESPLAZAMIENTOS MAXIMOS EN CADA NIVEL								
	DDBD	sismo1	sismo2	sismo3	sismo4	sismo5	sismo6	sismo7	sismo8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.0404	0.0226	0.00191	0.01684	0.0309	0.0293	0.03114	0.01664	0.00185
6	0.0809	0.07	0.00314	0.0428	0.0729	0.0741	0.06989	0.0418	0.04018
9	0.1213	0.105	0.0039	0.062	0.114	0.109	0.01021	0.06756	0.0759

**Cuadro 3.7 Desplazamientos máximos de cada piso con ITHA a través del OPENSEES**

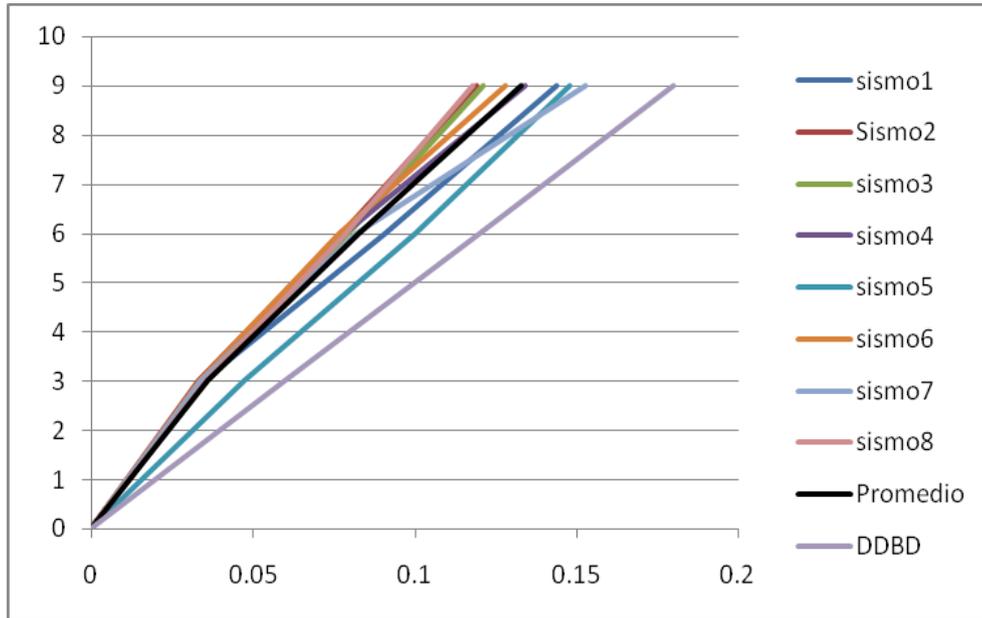


**Gráfico 3.4 Perfil de desplazamiento ITHA para DDBD (Mauricio Sánchez)**

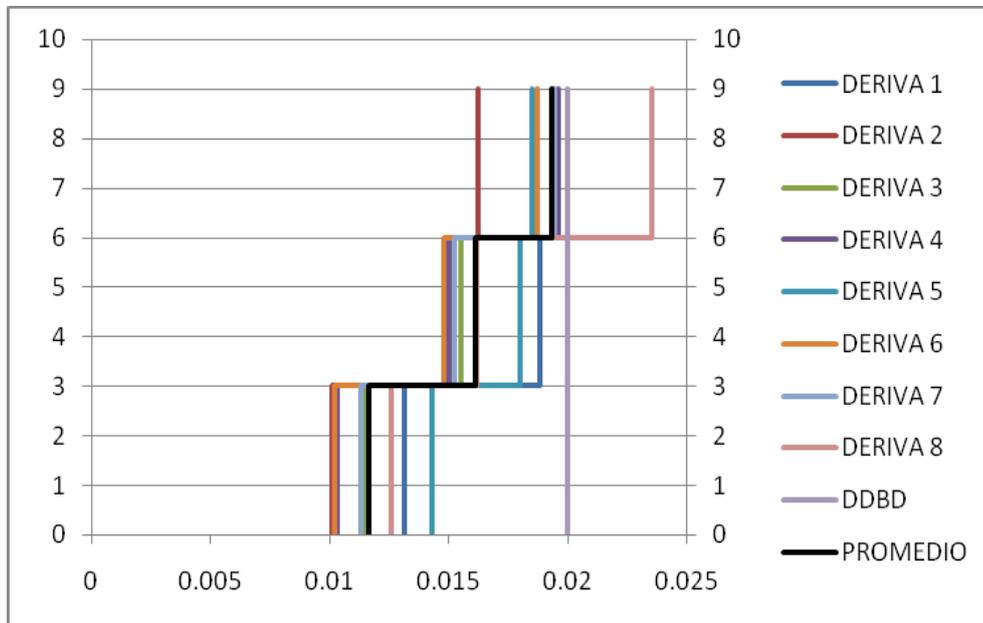
Las derivas máximas obtenidas del ITHA [Gráfico 3.5].



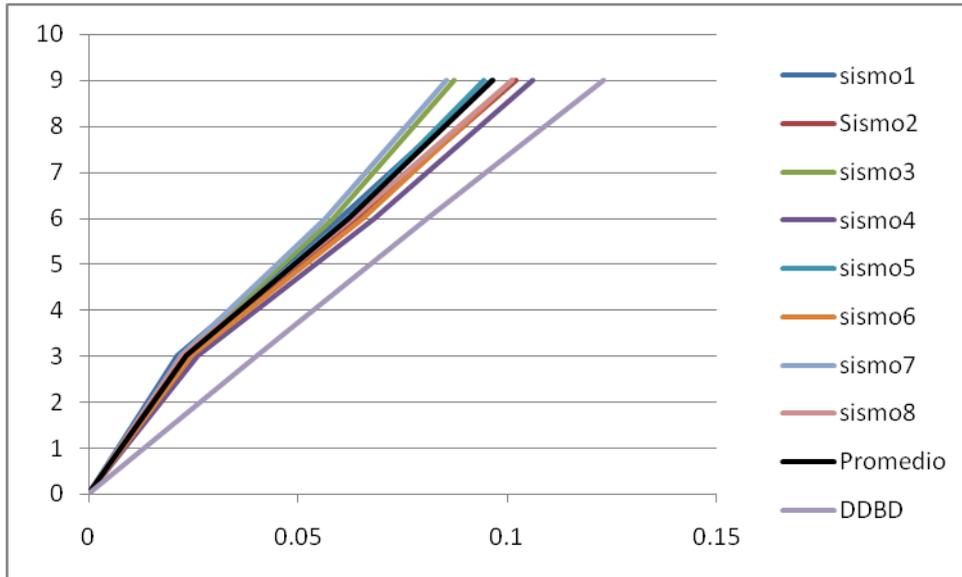
**Gráfico 3.5 Derivas de diseño (Mauricio Sánchez)**



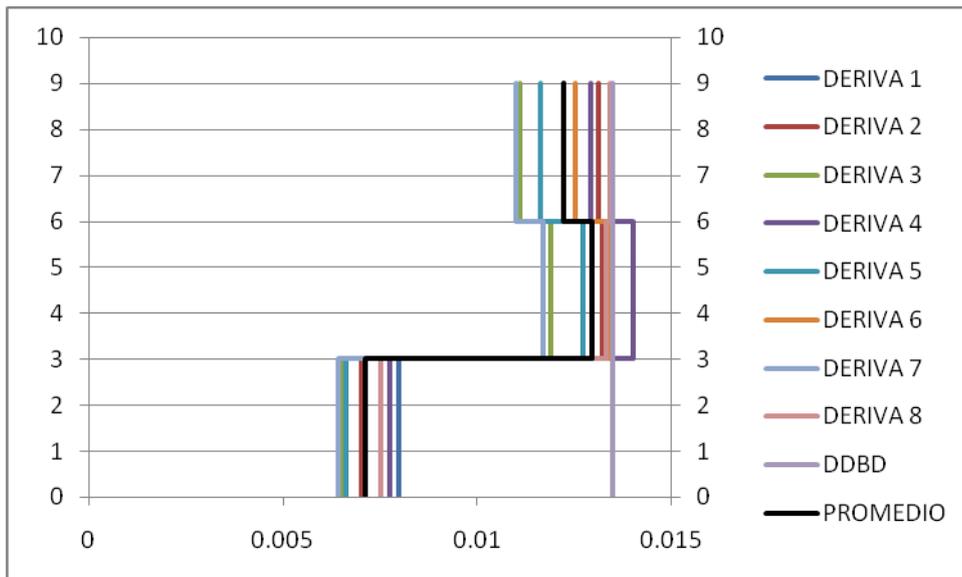
**Gráfico 3.6 Perfil de desplazamiento ITHA para DDBD.  
(sin disipadores deriva= 0.02) (Mauricio Sánchez)**



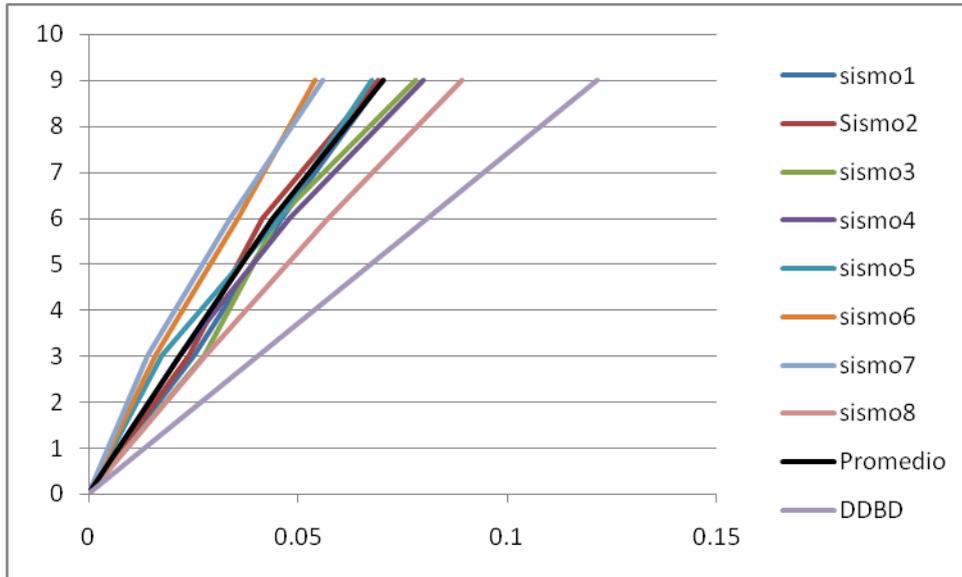
**Gráfico 3.7 Derivas de diseño (sin disipadores deriva = 0.02) (Mauricio Sánchez)**



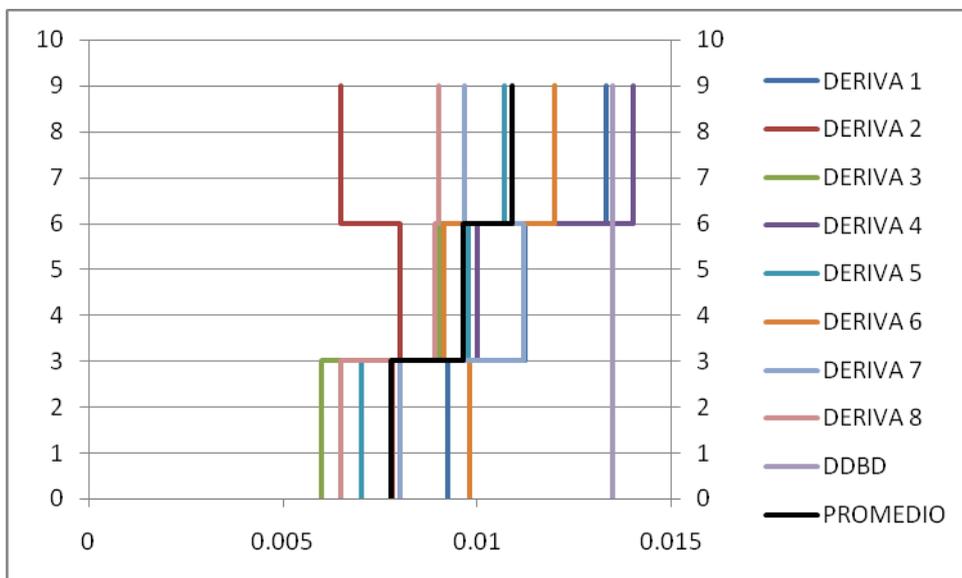
**Gráfico 3.8 Perfil de desplazamiento ITHA para DDBD.  
(sin disipadores deriva= 0.01348) (Mauricio Sánchez)**



**Gráfico 3.9 Derivas de diseño (sin disipadores deriva = 0.02) (Mauricio Sánchez)**



**Gráfico 3.10 Perfil de desplazamiento ITHA para DDBD. (con disipadores 30%Vbportico 70%vbdisipadores) (Mauricio Sánchez)**



**Gráfico 3.10 Derivas de diseño (sin disipadores deriva = 0.02) (Mauricio Sánchez)**

### Comparación de resultados obtenidos del pórtico con y sin aislamiento

El mismo pórtico de tres pisos, dos vanos [Figura 3,1] también se lo realizó sin aislamiento con el método del DDBD, en este pórtico hubo que incrementar secciones de columnas para que cumpla los requerimientos del diseño. También al mismo pórtico se lo diseño para una deriva de 0.02 o sea es un pórtico que va a llegar a tener daño. De esta manera se obtuvo los resultados que se muestran a continuación en la comparación de resultados [Tabla 3.9]

	1	2	3	4	5
<b>RESULTADOS</b>	<b>CON DISIPADORES BRB Portico 70% disipadores 30%</b>	<b>con disipadores Portico 30%, disipadores 70%</b>	<b>SIN DISIPADORE S = seccion</b>	<b>SIN DISIPADOR ES cambio de seccion para que cumpla</b>	<b>SIN DISIPADORES deriva de diseño= 0.02</b>
Desplazamiento efectivo del sistema ( $\Delta_d$ )	0.09127 m	0.09127	0.09127 m	0.087 m	0.135 m
Cortante basal ( $V_{BASE}$ )	357.41 KN	231.75	602.39 kN	832.23 KN	220.79 KN
Altura efectiva ( $H_{eff}$ )	6.77 m	6.77	6.77 m	6.63 m	6.77 m
Deriva de fluencia ( $\square_y$ )	1.35%	1.35%	1.35%	1.35%	1.35%
Desplazamiento de fluencia ( $\Delta_y$ )	0.09127 m	0.09127	0.09127 m	0.089m	0.091 m
Ductilidad de la estructura ( $\square_{EST}$ )	1	1	1	1	1.48
Ductilidad del LRB ( $\square_{LRB}$ )	7.738	7.738	-	-	-
Amortiguamiento viscoso equivalente EST ( $\square_{EST}$ )	5%	5%	-	-	-
Amortiguamiento viscoso equivalente LRB ( $\square_{LRB}$ )	20.99%	20.99%	-	-	-
Amortiguamiento viscoso equivalente SYS ( $\square_{SYS}$ )	9.80%	16.20%	5%	5%	10.87%
Masa efectiva ( $m_{eff}$ )	26.74KN	26.74	26.74 kN	35.28 KN	26.74KN
Factor de reducción ( $R_{\square}$ )	0.77	0.62	1	1	0.74
Periodo efectivo ( $T_{eff}$ )	0.519 seg	0.645	0.40 seg	0.38 seg	0.8 seg
Rigidez efectiva ( $K_{eff}$ )	3915.63 kN/m	2538.93	6549.47 kN/m	9548.54 KN/m	1629.72KN/m
Momento viga 1 piso	146.99KN/m	30.57		392 KN/m	119KN/m
Momento viga 2 piso	151.50KN/m	31.4		367KN/m	107KN/m
Momento viga 3 piso	76.63KN/m	15.8		295KN/m	60.3KN/m
Momento columnas 1 piso	183.74 KN/m	38.21		499.3KN/m	148.90KN/m



Continúa	plumnas 2 piso	189.38KN/m	39.25		459KN/m	134.2KN/m
	Momento columnas 3 Piso.	95.79KN/m	19.75		369.4KN/	75.4 KN/m
<b>RESULTADOS</b>		<b>CON DISIPADORES BRB Portico 70% disipadores 30%</b>	<b>con disipadores Portico 30%, disipadores 70%</b>	<b>SIN DISIPADORE S = seccion</b>	<b>SIN DISIPADOR ES cambio de seccion para que cumpla</b>	<b>DISIPADORES deriva de diseño= 0.02</b>
	Acero vigas 1 Piso	11.76 cm <sup>2</sup>	5.65		11.76 cm <sup>2</sup>	11.76 cm <sup>2</sup>
	Acero vigas 2 Piso	11.76 cm <sup>2</sup>	5.65		11.76 cm <sup>2</sup>	11.76 cm <sup>2</sup>
	Acero vigas 3 Piso	7.69 cm <sup>2</sup>	5.65		11.76 cm <sup>2</sup>	6.16 cm <sup>2</sup>
	Acero columnas 1 Piso	30.5 cm <sup>2</sup>	9.04		48.25 cm <sup>2</sup>	24.13 cm <sup>2</sup>
	Acero columnas 2 Piso	30.5cm <sup>2</sup>	9.04		44.23 cm <sup>2</sup>	20.11 cm <sup>2</sup>
	Acero columnas 3 Piso	24.12 cm <sup>2</sup>	6.78		44.23 cm <sup>2</sup>	16.08 cm <sup>2</sup>

**Cuadro 3.8 Comparacion de resultados obtenidos de un pórtico con y sin disipadores y un portico con una deriva de 0.02 (Mauricio Sánchez)**

# **CAPÍTULO IV**

**CONCLUSIONES DEL PROYECTO**



## **4.1 CONCLUSIONES**

Basado en la prueba y los resultados analíticos de la presente investigación se concluye lo siguiente:

- El DDBD es un método de diseño sísmico práctico, racional y sencillo para el diseño de pórticos con disipadores de energía para que alcancen cualquier nivel de deriva bajo la acción del sismo de diseño.
- DDBD, con las modificaciones que se realizó en esta investigación y con la realización de un ejemplo de diseño de un pórtico con disipadores de energía se puede decir que es eficaz pues los desplazamientos observados en los ITHA son congruentes con los propuestos en el diseño. Además se observa que los dispositivos de disipación de energía, BRB, absorben gran parte de las fuerzas que generan los sismos reduciendo significativamente las fuerzas cortantes en el pórtico y restringiendo el daño en la estructura.
- De acuerdo al criterio de diseño adoptado en esta investigación en el cual se supone que el 70% del cortante total es resistido por el pórtico y el 30% del cortante total es resistido por los dispositivos y analizando los resultados tanto en el perfil de desplazamientos como en las derivas del ITHA, se observa que estas son un poco menores que las del diseño por lo que nos damos cuenta que es un diseño no exactamente similar al real pero si que se aproxima y que es un diseño bastante aceptable.
- Los dispositivos de disipación de energía BRB incrementan el amortiguamiento en el sistema, lo cual hace que se disipe una mayor cantidad de energía que en la estructura sin disipadores.
- El DDBD con dispositivos de aislamiento sísmico BRB es más conservador que el método normal del DDBD.
- El DDBD con dispositivos de disipación de energía BRB reduce secciones de vigas y columnas con respecto al método normal del DDBD.
- Se pueden desarrollar procedimientos de diseño de estructuras con BRB simples, que pueden adaptarse a la filosofía de diseño sismo resistente



actual. Son necesarios nuevos ensayos de estructuras con disipadores, especialmente con estructuras de H.A., para verificar estos procedimientos de diseño. De esa manera se podrán mejorar las recomendaciones que al respecto puedan hacerse en códigos sismo-resistentes.

#### **4.2 REFERENCIAS:**

[ 1 ] Priestley, M.J.N., Calvi, G.M., Kowalsky, M.J. (2007), "Displacement Based Seismic Design of Structures". Pavia, Italy.

[ 2 ] Skinner, R.I., Kelly, J.M. and Heine, A.J. (1993). "Hysteretic Dampers for earthquake resistant structures", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 3, 287-296.

[ 3 ] Shibata and Sozen, 1976. "Substitute Structure Method for Seismic Design". Journal of the Structural Division, ASCE, Vol 102, No ST1.

[ 4 ] Christopoulos,C., Filiatrault, A. (2006), "Principles of Passive Supplemental Damping and Seismic Isolation" Pavia, Italy.

[5 ] Pettinga J. D. (2005), "Dynamic Behavior of Reinforced Concrete Frames Designed with Direct Displacement-Based Design", European School for Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, Research Report No. Rose-2005/02.

[ 6 ] Priestley, M.J.N. (1993) "Myths and Fallacies in Earthquake Engineering – Conflicts Between Design and Reality," Bulletin NZ National Society for Earthquake Engineering, Vol. 26., No. 3, Sept 1993, pp. 328-341.

[ 7 ] Priestley, M.J.N. and Kowalsky M. J., (2000), "Direct Displacement-Based Seismic Design of Concrete Buildings, New Zealand, December.

[8 ] FEMA Publication-273 Building Seismic Safety Council, Washington D:C:, (1997).



[9 ] Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000, “Capítulo 1: Peligro Sísmico, espectros de diseño y requisitos de cálculo para diseño sismo resistente”, Quito- Ecuador.

# ANEXOS



**ARCHIVO TCL PARA REALIZAR EL ITHA MEDIANTE EL PROGRAMA  
OPENSSES DEL DDBD**

**# COORDENADAS**

node 101 0 0  
node 102 3.5 0  
node 103 7 0  
node 201 0 3  
node 202 3.5 3  
node 203 7 3  
node 301 0 6  
node 302 3.5 6  
node 303 7 6  
node 401 0 9  
node 402 3.5 9  
node 403 7 9  
node 10001 0.875 0.75  
node 11001 2.625 2.25  
node 10002 4.375 0.75  
node 11002 6.125 2.25  
node 20001 0.875 3.75  
node 21001 2.625 5.25  
node 20002 4.375 3.75  
node 21002 6.125 5.25  
node 30001 0.875 6.75  
node 31001 2.625 8.25  
node 30002 4.375 6.75  
node 31002 6.125 8.25

**# BONDARY CONDITIONS**

fix 101 1 1 1  
fix 102 1 1 1  
fix 103 1 1 1

**# NODAL MASSES**

mass 201 3.14984 3.14984 0  
mass 202 6.29969 6.29969 0  
mass 203 3.14984 3.14984 0  
mass 301 2.95718 2.95718 0  
mass 302 5.91437 5.91437 0  
mass 303 2.95718 2.95718 0  
mass 401 2.70948 2.70948 0  
mass 402 5.41896 5.41896 0  
mass 403 2.70948 2.70948 0

**# MATERIALS**

uniaxialMaterial Concrete01 1 -32865.2945975269 -7.65014028453661E-03 -  
26292.2356780215 -2.18912134274387E-02  
uniaxialMaterial Concrete01 2 -21000 -0.002 0 -0.004  
  
uniaxialMaterial Steel01 3 420000 200000000 0.02  
  
# para section agregator  
  
uniaxialMaterial Steel01 7 345000 200000000 0.02



**# REINFORCEMENT RECTANGULAR SECTIONS**

**# DEFINIMOS LA SECCION FIBRA COLUMNA**

```
section Fiber 1 {
  # Define la capa de confinamiento
  patch quad 1 10 8 -0.17 0.17 -0.17 -0.17 0.17 -0.17 0.17 0.17

  # Define las cuatro capas de recubrimiento
  patch quad 2 2 15 -0.2 0.2 -0.17 0.17 0.2 0.2 0.17 0.17
  patch quad 2 2 15 -0.2 -0.2 -0.17 -0.17 0.2 -0.2 0.17 -0.17
  patch quad 2 15 2 -0.2 0.2 -0.2 -0.2 -0.17 -0.17 -0.17 0.17
  patch quad 2 15 2 0.2 0.2 0.2 -0.2 0.17 -0.17 0.17 0.17

  # define las capas de reforzamiento (pag 188 del Manual)
  layer straight 3 4 2.54469E-04 -0.17 0.17 0.17 0.17
  layer straight 3 4 2.54469E-04 -0.17 -0.17 0.17 -0.17
  layer straight 3 2 2.54469E-04 0.17 0.17 0.17 -0.17
  layer straight 3 2 2.54469E-04 -0.17 0.17 -0.17 -0.17
}
```

**# DEFINIMOS LA SECCION FIBRA COLUMNA**

```
section Fiber 2 {
  # Define la capa de confinamiento
  patch quad 1 10 8 -0.17 0.17 -0.17 -0.17 0.17 -0.17 0.17 0.17

  # Define las cuatro capas de recubrimiento
  patch quad 2 2 15 -0.2 0.2 -0.17 0.17 0.2 0.2 0.17 0.17
  patch quad 2 2 15 -0.2 -0.2 -0.17 -0.17 0.2 -0.2 0.17 -0.17
  patch quad 2 15 2 -0.2 0.2 -0.2 -0.2 -0.17 -0.17 -0.17 0.17
  patch quad 2 15 2 0.2 0.2 0.2 -0.2 0.17 -0.17 0.17 0.17

  # define las capas de reforzamiento (pag 188 del Manual)
  layer straight 3 4 2.54469E-04 -0.17 0.17 0.17 0.17
  layer straight 3 4 2.54469E-04 -0.17 -0.17 0.17 -0.17
  layer straight 3 2 2.54469E-04 0.17 0.17 0.17 -0.17
  layer straight 3 2 2.54469E-04 -0.17 0.17 -0.17 -0.17
}
```

**# DEFINIMOS LA SECCION FIBRA COLUMNA**

```
section Fiber 3 {
  # Define la capa de confinamiento
  patch quad 1 10 8 -0.12 0.12 -0.12 -0.12 0.12 -0.12 0.12 0.12

  # Define las cuatro capas de recubrimiento
  patch quad 2 2 15 -0.15 0.15 -0.12 0.12 0.15 0.15 0.12 0.12
  patch quad 2 2 15 -0.15 -0.15 -0.12 -0.12 0.15 -0.15 0.12 -0.12
  patch quad 2 15 2 -0.15 0.15 -0.15 -0.15 -0.12 -0.12 -0.12 0.12
  patch quad 2 15 2 0.15 0.15 0.15 -0.15 0.12 -0.12 0.12 0.12

  # define las capas de reforzamiento
  layer straight 3 4 2.0106E-04 -0.12 0.12 0.12 0.12
  layer straight 3 4 2.0106E-04 -0.12 -0.12 0.12 -0.12
  layer straight 3 2 2.0106E-04 0.12 0.12 0.12 -0.12
  layer straight 3 2 2.0106E-04 -0.12 0.12 -0.12 -0.12
}
```



```
#xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

# DEFINIMOS LA SECCION FIBRA VIGA
section Fiber 4 {
  # Define la capa de confinamiento
  patch quad 1 10 8 -0.1 0.125 -0.1 -0.125 0.1 -0.125 0.1 0.125

  # Define las cuatro capas de recubrimiento
  patch quad 2 2 10 -0.125 0.15 -0.1 0.125 0.1 0.125 0.125 0.15
  patch quad 2 2 10 -0.1 -0.125 -0.125 -0.15 0.125 -0.15 0.1 -
0.125
  patch quad 2 10 2 -0.125 0.15 -0.125 -0.15 -0.1 -0.125 -0.1 0.125
  patch quad 2 10 2 0.1 0.125 0.1 -0.125 0.125 -0.15 0.125 0.15

  # define las capas de reforzamiento
  layer straight 3 7 1.5394E-04 -0.1 0.125 0.1 0.125
  layer straight 3 7 1.5394E-04 -0.1 -0.125 0.1 -0.125
  layer straight 3 0 1.13097335529233E-04 0.1 0.125 0.1 -0.125
  layer straight 3 0 1.13097335529233E-04 -0.1 0.125 -0.1 -0.125
}
# DEFINIMOS LA SECCION FIBRA VIGA
section Fiber 5 {
  # Define la capa de confinamiento
  patch quad 1 10 8 -0.1 0.125 -0.1 -0.125 0.1 -0.125 0.1 0.125

  # Define las cuatro capas de recubrimiento
  patch quad 2 2 10 -0.125 0.15 -0.1 0.125 0.1 0.125 0.125 0.15
  patch quad 2 2 10 -0.1 -0.125 -0.125 -0.15 0.125 -0.15 0.1 -
0.125
  patch quad 2 10 2 -0.125 0.15 -0.125 -0.15 -0.1 -0.125 -0.1 0.125
  patch quad 2 10 2 0.1 0.125 0.1 -0.125 0.125 -0.15 0.125 0.15

  # define las capas de reforzamiento
  layer straight 3 7 1.5394E-04 -0.1 0.125 0.1 0.125
  layer straight 3 7 1.5394E-04 -0.1 -0.125 0.1 -0.125
  layer straight 3 0 1.13097335529233E-04 0.1 0.125 0.1 -0.125
  layer straight 3 0 1.13097335529233E-04 -0.1 0.125 -0.1 -0.125
}
# DEFINIMOS LA SECCION FIBRA VIGA
section Fiber 6 {
  # Define la capa de confinamiento
  patch quad 1 10 8 -0.1 0.125 -0.1 -0.125 0.1 -0.125 0.1 0.125

  # Define las cuatro capas de recubrimiento
  patch quad 2 2 10 -0.125 0.15 -0.1 0.125 0.1 0.125 0.125 0.15
  patch quad 2 2 10 -0.1 -0.125 -0.125 -0.15 0.125 -0.15 0.1 -
0.125
  patch quad 2 10 2 -0.125 0.15 -0.125 -0.15 -0.1 -0.125 -0.1 0.125
  patch quad 2 10 2 0.1 0.125 0.1 -0.125 0.125 -0.15 0.125 0.15

  # define las capas de reforzamiento
  layer straight 3 5 1.5394E-04 -0.1 0.125 0.1 0.125
  layer straight 3 5 1.5394E-04 -0.1 -0.125 0.1 -0.125
  layer straight 3 0 1.13097335529233E-04 0.1 0.125 0.1 -0.125
  layer straight 3 0 1.13097335529233E-04 -0.1 0.125 -0.1 -0.125
}
```



```
}
#xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx#x
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

#xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx#x
xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx

# SECCION AGGREGATOR PARA COLUMNAS Nivel: 1
section Aggregator 7 4 Vy -section 1
section Aggregator 8 4 Vy -section 1
section Aggregator 9 4 Vy -section 1

# SECCION AGGREGATOR PARA COLUMNAS Nivel: 2
section Aggregator 10 4 Vy -section 2
section Aggregator 11 4 Vy -section 2
section Aggregator 12 4 Vy -section 2

# SECCION AGGREGATOR PARA COLUMNAS Nivel: 3
section Aggregator 13 4 Vy -section 3
section Aggregator 14 4 Vy -section 3
section Aggregator 15 4 Vy -section 3

# SECCION AGGREGATOR VIGAS NIVEL: 1
section Aggregator 16 4 Vy -section 4
section Aggregator 17 4 Vy -section 4

# SECCION AGGREGATOR VIGAS NIVEL: 2
section Aggregator 18 4 Vy -section 5
section Aggregator 19 4 Vy -section 5

# SECCION AGGREGATOR VIGAS NIVEL: 3
section Aggregator 20 4 Vy -section 6
section Aggregator 21 4 Vy -section 6

# TRANSFORMATION
geomTransf Linear 1

# CONECTIVITY
# Define Beam-Column Elements
# COLUMNAS
element nonlinearBeamColumn 101 101 201 5 1 1
element nonlinearBeamColumn 102 102 202 5 1 1
element nonlinearBeamColumn 103 103 203 5 1 1
element nonlinearBeamColumn 201 201 301 5 2 1
element nonlinearBeamColumn 202 202 302 5 2 1
element nonlinearBeamColumn 203 203 303 5 2 1
element nonlinearBeamColumn 301 301 401 5 3 1
element nonlinearBeamColumn 302 302 402 5 3 1
element nonlinearBeamColumn 303 303 403 5 3 1

# VIGAS
element nonlinearBeamColumn 401 201 202 5 4 1
element nonlinearBeamColumn 402 202 203 5 4 1
element nonlinearBeamColumn 501 301 302 5 5 1
element nonlinearBeamColumn 502 302 303 5 5 1
element nonlinearBeamColumn 601 401 402 5 6 1
```



```
element nonlinearBeamColumn 602 402 403 5 6 1

#xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
# ELEMENTO DISIPADOR (ELASTIC BEAMCOLUMN)
#element elasticBeamColumn $eleTag $iNode $jNode XXXX$AREA(acero)XXX
$E(mod elasticidad acero) $Iz $transfTag
element elasticBeamColumn 1000001 101 10001 0.00024 200000 1 1
element elasticBeamColumn 1000002 11001 202 0.00024 200000 1 1
element elasticBeamColumn 1000003 102 10002 0.00024 200000 1 1
element elasticBeamColumn 1000004 11002 203 0.00024 200000 1 1
element elasticBeamColumn 2000001 201 20001 0.00020 200000 1 1
element elasticBeamColumn 2000002 21001 302 0.00020 200000 1 1
element elasticBeamColumn 2000003 202 20002 0.00020 200000 1 1
element elasticBeamColumn 2000004 21002 303 0.00020 200000 1 1
element elasticBeamColumn 3000001 301 30001 0.00012 200000 1 1
element elasticBeamColumn 3000002 31001 402 0.00012 200000 1 1
element elasticBeamColumn 3000003 302 30002 0.00012 200000 1 1
element elasticBeamColumn 3000004 31002 403 0.00012 200000 1 1

#xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
puts "ingresada elastic beam column"
# ELEMENT truss
# Disipadores
element truss 1001 10001 11001 0.00024 7
element truss 1002 10002 11002 0.00024 7
element truss 2001 20001 21001 0.00020 7
element truss 2002 20002 21002 0.00020 7
element truss 3002 30001 31001 0.00012 7
element truss 3001 30002 31002 0.00012 7

#xxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxxx
puts "elemento truss de disipador ingresado"

# RECORDERS
recorder Node -file desp.out -time -node 103 203 303 403 -dof 1 disp
recorder Drift -file DriftSis_3p2vLRB_I1.out -time -iNode 101 201 301
-jNode 201 301 401 -dof 1 -perpDirn 2
puts "listo recorders"

# DEFINE GRAVITY LOADS
pattern Plain 1 Linear {
  load 201 0 -30.9 0
  load 202 0 -61.8 0
  load 203 0 -30.9 0
  load 301 0 -29.01 0
  load 302 0 -58.02 0
  load 303 0 -29.01 0
  load 401 0 -26.58 0
  load 402 0 -53.16 0
  load 403 0 -26.58 0
}
```



```
test EnergyIncr 1.0e-4 12 0
algorithm Newton
integrator LoadControl 1
system BandGeneral
constraints Transformation
numberer Plain
analysis Static
analyze 1
puts "OKok"
```

**# RUN GRAVITY ANALYSIS**

```
loadConst -time 0.0
puts "Model Build"
```

```
# opciones del analisis inelastico de historia en el tiempo
C:/PROGRAMA/PORTICOS_CON_DISIPADORES_ENERGIA/ANALYSIS/EXE_FILE/
set quake Equake1
set dt 0.001
set ftor 9.81
#pattern UniformExcitation 2 1 -accel $quake
set accelSeries "Path -filePath $quake.txt -dt $dt -factor $ftor"
pattern UniformExcitation 2 1 -accel $accelSeries
set TmaxAnalysis 39.6
set DtAnalysis 0.01
```

```
constraints Transformation
numberer RCM
system SparseGeneral - piv
set TestType EnergyIncr
set Tol 1.e-8
set maxNumIter 10
set printFlag 0
test $TestType $Tol $maxNumIter $printFlag
set algorithmType ModifiedNewton
algorithm $algorithmType
set NewmarkGamma 0.5
set NewmarkBeta 0.25
integrator Newmark $NewmarkGamma $NewmarkBeta
analysis Transient
```

```
set Nsteps [expr int($TmaxAnalysis/$dt)]
set ok [analyze $Nsteps $dt]
```



```
# -----if convergence failure-----
-----
if {$ok != 0} {
  # ANALISIS DEL CONTROL DEL TIEMPO
  set ok 0
  set controlTime [getTime]
  while {$controlTime < $TmaxAnalysis && $ok == 0} {
    set ok [analyze 1 $dt]
    set controlTime [getTime]
    set ok [analyze 1 $dt]
    if {$ok != 0} {
      puts "Trying Newton with Initial Tangent .."
      test NormDispIncr $Tol 1000 0
      algorithm Newton
      set ok [analyze 1 $dt]
      test $TestType $Tol $maxNumIter 0
      algorithm $algorithmType
    }
    if {$ok != 0} {
      puts "Trying Broyden .."
      algorithm Broyden 8
      set ok [analyze 1 $dt]
      algorithm $algorithmType
    }
    if {$ok != 0} {
      puts "Trying NewtonWithLineSearch .."
      algorithm NewtonLineSearch .8
      set ok [analyze 1 $dt]
      algorithm $algorithmType
    }
  }
}

puts "-----"
puts "Ground Motion Done. End Time: [getTime]"
puts "-----"
```