


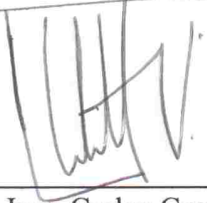
**“REDUCCIÓN DE VULNERABILIDAD EN EDIFICIOS
DE CONCRETO”**

Vo Bo. :

(f): 
Ing. Milton Matus

Tribunal:

(f): 
Ing. Milton Matus

(f): 
Ing. Juan Carlos Castillo

(f): 
Ing. Franklin Matzdorf

Fecha de Aprobacion: 22/10/2004

Universidad del Valle de Guatemala
Facultad de Ciencias y Humanidades
Departamento de Ingeniería Civil
Maestría en Ingeniería Estructural

“REDUCCIÓN DE VULNERABILIDAD EN EDIFICIOS
DE CONCRETO”

JUAN CARLOS DARDÓN NAVAS

Trabajo de Graduación presentado
para optar al grado académico de Maestría en Ingeniería Estructural

Guatemala
2004

PREFACIO

Luego de un proceso de evaluación detallada de un edificio de concreto reforzado existente que establece una vulnerabilidad alta, es necesario buscar las formas más adecuadas para reforzar la estructura en un tiempo determinado.

El trabajo consiste en lograr la reducción de vulnerabilidad en edificios de concreto mediante materiales que sean relativamente fáciles de colocar, sin tener que crear mayor construcción (aumentar las dimensiones de los elementos estructurales) logrando con ellos aumentar el límite de desempeño de la estructura.

Los materiales a utilizar serán amortiguadores; los cuales ayudarán a darle rigidez y disipación de energía a la estructura. El otro material a utilizar es la fibra de carbono que servirá para darle confinamiento a los miembros estructurales.

Se analizará la estructura con amortiguadores, luego con fibra de carbono, logrando así una visión más amplia de que tipo de refuerzo es el más adecuado y más eficiente a menor costo.

CONTENIDO

	Página
PREFACIO.....	v
LISTA DE CUADROS.....	ix
LISTA DE FIGURAS.....	x
SIMBOLOGÍA.....	xii
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. OBJETIVOS.....	3
A. Objetivo general.....	3
B. Objetivos específicos.....	3
III. PROPIEDADES DE MATERIALES A UTILIZAR PARA REFUERZO.....	4
A. Fibra de Carbono (Mbrace).....	4
1. Propiedades	4
2. Materiales	4
3. Refuerzo de fibras Mbrace	5
4. Aplicaciones y uso	6
5. Propiedades mecánicas	7
6. Refuerzo a cortante	7

7. Capacidad a cortante de una sección reforzada con fibras de carbono.....	9
8. Contribución del refuerzo de la fibra de carbono a la capacidad a cortante.....	10
9. Refuerzo de fibra de carbono Biaxial.....	15
10. Separación entre tiras.....	16
11. Límite del refuerzo a cortante total.....	17
B. Fibra de carbono (Sika Guatemala).....	17
1. Durabilidad y capacidad de servicio de Sika CarboDur.....	19
C. Amortiguadores.....	22
1. Distribución de amortiguadores en la estructura.....	23
2. Funcionamiento de los amortiguadores viscosos.....	24
IV. Evaluación estructural del edificio de concreto reforzado utilizando el análisis no lineal elástico.....	27
A. Descripción de las características principales de la estructura.....	27
1. Geometría y características principales de la estructura.....	27
B. Evaluación estructural detallada.....	29
C. Determinación del punto de desempeño de la estructura o máximo desplazamiento.....	31
V. Análisis estructural con diferentes técnicas de refuerzo	42
A. Con fibra de carbono.....	42
B. Con amortiguadores.....	52
C. Con fibra de carbono y amortiguadores.....	58

VI.	Costos de fibra de carbono para reforzar estructura.....	61
VII.	Discusión de resultados.....	62
VIII.	Conclusiones.....	66
IX.	Recomendaciones.....	67
X.	Referencias bibliográficas.....	68

LISTA DE CUADROS

CUADROS	Página
1. Comparación de las propiedades mecánicas de las fibras.....	6
2. Geometría y características del concreto y del refuerzo de columnas, vigas y losas.....	29
3. Características para vigas de 6 mts de longitud.....	49
4. Características para vigas de 8 mts de longitud	50
5. Características de fibra de carbono para las columnas	51

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	Página
1. Curva esfuerzo –deformación de la fibra de carbono de carbono de alta resistencia a la tensión CF130 Mbrace.....	7
1.a Colocación de Sikawrap en una viga	22
2. Amortiguadores de fluido viscoso.....	24
3. Amortiguador típico de fluido viscoso.....	25
4. Numeración de nudos y elementos por nivel	28
5. Curva de capacidad del edificio vrs demanda sísmica	32
6. Elevación de la estructura original	35
7. Nivel de desempeño en pushover 2. eje X. estructura original	36
8. Nivel de desempeño en pushover 4. eje X. estructura original	37
9. Nivel de desempeño en pushover 2. eje Y. estructura original..	38
10. Nivel de desempeño en pushover 4. eje Y. estructura original	39
11. Estructura original. articulaciones creadas. eje Y. pushover 2.....	40
12. Estructura original. articulaciones creadas. eje Y. pushover 4.....	41
13. Nivel de desempeño en pushover 2. eje X. estructura con fibra de carbono.....	43
14. Nivel de desempeño en pushover 4. eje X. estructura con fibra de carbono	44
15. Nivel de desempeño en pushover 2. eje Y. estructura con fibra de carbono	45
16. Nivel de desempeño en pushover 4. eje Y. estructura con	

fibra de carbono.....	46
17. Estructura con fibra de carbono. articulaciones creadas. eje Y. pushover 2.....	47
18. Estructura con fibra de carbono. articulaciones creadas. eje Y. pushover 4.....	48
19. Diseño de refuerzo de vigas de 6 mts de longitud con fibras de carbono	49
20. Diseño de refuerzo de vigas de 8 mts de longitud con fibras de carbono	50
21. Diseño de refuerzo de columnas con fibras de carbono	51
22. Elevación de edificio con amortiguadores	53
23. Nivel de desempeño en pushover 2. eje Y. estructura con amortiguadores.....	54
24. Nivel de desempeño en pushover 4. eje Y. estructura con amortiguadores.....	55
25. Estructura con amortiguadores. articulaciones creadas. eje Y. pushover 2.....	56
26. Estructura con amortiguadores. articulaciones creadas. eje Y. pushover 4.....	57
27. Nivel de desempeño en pushover 2. eje Y. estructura con amortiguadores y fibra de carbono.....	58
28. Nivel de desempeño en pushover 4. eje Y. estructura con amortiguadores y fibra de carbono.....	59
29. Estructura con amortiguadores y fibra de carbono. articulaciones creadas. eje Y. pushover 2.....	60

SIMBOLOGÍA

- Afv: Área total de una tira de refuerzo de fibra de carbono transversal.
- bw: Ancho del alma de la sección transversal
- d: Distancia al centro del refuerzo de acero a tensión (mm).
- df: Profundidad del refuerzo de fibra de carbono a cortante (mm).
- dfe: Profundidad efectiva del refuerzo de fibra de carbono a cortante considerando únicamente áreas suficientemente adheridas (mm).
- f'c: Resistencia a compresión nominal del hormigón(Mpa).
- f_{fe}: Nivel de esfuerzo en el refuerzo de fibra de carbono a cortante (en el punto de rotura).
- k₁: Multiplicador de la longitud de adhesión efectiva en que se basa la resistencia del hormigón.
- k₂: Multiplicador de la longitud de adhesión efectiva en que se basa la configuración de envoltura.
- Le: Longitud de adhesión efectiva de la tira de fibra de carbono (mm).
- Lo: Longitud de adhesión efectiva de una capa de refuerzo de fibra de carbono (mm).
- n: Número de capas de refuerzo de fibra de carbono.
- R: Factor de reducción de la resistencia a la rotura de la fibra de carbono.
- Sf: Separación entre tiras de refuerzo de fibra de carbono a cortante.
- tf: Espesor de una capa de refuerzo de fibra (mm).
- Vc: Resistencia al esfuerzo cortante del hormigón en una sección dada (N).
- Vf: Resistencia al esfuerzo cortante del refuerzo de fibra de carbono transversal en una sección dada (N).
- Vn: Resistencia al esfuerzo cortante (nominal) de una sección dada(N).

- Vs: Resistencia al esfuerzo cortante del refuerzo de acero al carbono transversal en una sección dada(N).
- wf: Ancho de una tira de refuerzo de fibra de carbono a cortante (mm)
- β : Orientación de las fibras primarias con respecto al eje longitudinal de la viga (grados).
- ϵ_{fu} : Deformación (elongación) de rotura de la fibra de carbono(mm/mm).

I. INTRODUCCIÓN

En respuesta a la creciente necesidad de reparar o rehabilitar las estructuras de concreto reforzado ha surgido una nueva tecnología de reforzamiento estructural. Los desarrollos actuales de las técnicas de producción de fibra de carbono y amortiguadores han progresado a tal nivel que estos son ya utilizados para la industria de la construcción dada la relación costo - beneficio. La reducción en el costo de los materiales, en conjunto con los ahorros de mano de obra inherentes con su bajo peso lo que facilita su instalación y su alta resistencia, lo que reduce el área de refuerzo, hacen de la fibra de carbono y amortiguadores una alternativa atractiva.

En el programa ETABS se hará un análisis de una estructura de 4 niveles, luego se le colocará cuatro distintos pushovers a la estructura, y observaremos el nivel de desempeño de la misma.

Luego, se harán los refuerzos necesarios en vigas y columnas enfocados principalmente en confinamiento y corte, por medio de fibra de carbono. Pero se hará una equivalencia de la fibra de carbono a acero, para poder modelar de nuevo la estructura en ETABS, veremos si con el refuerzo de fibra de carbono la estructura aumento su nivel de desempeño, es decir: aumento su capacidad a soportar mayor aceleración.

Posteriormente se utilizarán amortiguadores, por medio de estos disipadores de energía se pueden absorber una porción de la energía introducida por un terremoto en la estructura y minimizar la demanda de disipación de energía en los miembros principales como vigas y columnas. Estos mecanismos pueden reducir sustancialmente las derivas entre niveles y consecuentemente el daño no estructural. Además, aceleraciones bajas y fuerzas de corte más pequeñas conduce a disminuir la demanda de ductilidad en los componentes estructurales.

Los amortiguadores se modelarán en ETABS, para observar si existirá aumento en su nivel de desempeño.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo General

Reducción de vulnerabilidad sísmica en edificios de concreto por medio de fibras de carbono y/o amortiguadores, logrando aumentar el nivel de desempeño de la estructura.

B. Objetivos Específicos

1. Diseño de refuerzo para elementos estructurales existentes mediante fibra de carbono y amortiguadores.
2. Descripción de propiedades y comportamiento de las fibras de carbono y los amortiguadores.
3. Analizar costo- beneficio, entre fibra de carbono y amortiguadores.

III. PROPIEDADES DE MATERIALES A UTILIZAR PARA REFUERZO

A. Fibra de carbono (Mbrace)

El refuerzo con fibras de carbono se ha usado durante los recientes 25 años en la industria aeroespacial y en otras industrias donde se requieren propiedades de peso ligero, alta resistencia a tensión y el uso de materiales no corrosivos. Estos materiales presentan fluencia y elongación baja y comparados con el acero, son de menos espesor, más ligeros y tienen 10 veces la capacidad de resistencia a tensión.

1. Propiedades. El sistema compuesto de fibras de carbono se emplea para aumentar la resistencia, rigidez o ductilidad de estructuras de hormigón existentes. Está formado por cuatro componentes básicos:

- a. Mbrace primario.
- b. Mbrace pasta.
- c. Mbrace saturante
- d. Láminas de fibra de carbono.

2. Materiales Los materiales a continuación están en el orden en el que la forma que hay que colocarlos en los miembros que necesiten refuerzo.

a. Mbrace primario. El primer componente del sistema es un imprimador de base epóxica de 100% sólidos, que proporciona una adherencia adecuada a la base de hormigón. Este producto está diseñado para penetrar los poros del hormigón y facilitar la adherencia. Como norma general, se prepara el sustrato de hormigón mediante esmerilado y limpieza con chorro de arena a fin de eliminar cualquier material suelto y producir una estructura porosa abierta. Una vez que la base está suficientemente limpia y seca, se aplica el Mbrace primario, comúnmente con un rodillo de pelo corto o uno medio.

b. Mbrace pasta. Este producto es una pasta epóxica espesa que se aplica después de la capa de Mbrace primario a fin de rellenar cavidades y defectos superficiales de hasta 5mm (1/4 pulg) de profundidad. También puede utilizarse para nivelar y resanar agujeros pequeños. Si la base de hormigón tiene agujeros profundos o extensas áreas dañadas, se deberá eliminar el área defectuosa hasta llegar al material que esté en buenas condiciones y resanar con mortero de reparación. Es posible que no sea necesario aplicar la pasta si el substrato de hormigón está nivelado y en buenas condiciones. Comúnmente se usa una llana para aplicar la Mbrace pasta.

c. Mbrace saturante. Este producto tiene como finalidad impregnar las fibras secas, mantener las fibras en su orientación prevista y distribuir el esfuerzo hacia las mismas; igualmente las protege contra la abrasión y los efectos ambientales. El Mbrace saturante está especialmente formulado para humedecer rápidamente las fibras y mantener fija la lámina de refuerzo durante el curado del sistema Mbrace. Su viscosidad facilita la manipulación y la aplicación “sobrecabeza” de la lámina de fibra. Típicamente se aplica con un rodillo medio.

3. Refuerzo de fibras Mbrace. En el cálculo de la resistencia de la fibra no se toma en cuenta la contribución del saturante a la resistencia a tensión y al módulo elástico; por consiguiente, la determinación de los esfuerzos se hace empleando únicamente el área neta de la fibra. Todas las láminas de fibra Mbrace se fabrican en anchos nominales de 500 mm (20 pulg). El cuadro 1 muestra una comparación de las propiedades mecánicas de las fibras.

Cuadro 1
Comparación de las propiedades mecánicas de las fibras

Fibra MBrace	Resistencia a la rotura Mpa (ksi)	Resistencia de diseño Mpa (ksi)	Módulo elástico Mpa (ksi)
Fibra de carbono de alta resistencia a la tensión CF 130	4,275 (620)	3,790 (550)	228,000 (33,000)
Fibra de carbono de alto módulo elástico CF 530	4,027 (584)	3,517 (510)	372,000 (54,000)
Fibra de vidrio tipo "E" EG 900	1,730 (251)	1,517 (220)	72,400 (10,500)

a. Fibra de carbono Mbrace CF130 y CF530. Las propiedades mecánicas de las fibras (incluso el módulo elástico) dependen de varios factores, controlados estrictamente durante el proceso de manufactura. Los filamentos de fibra de carbono se ensamblan formando hebras sin torcer, que se utilizan entonces para crear una lámina unidireccional continua.

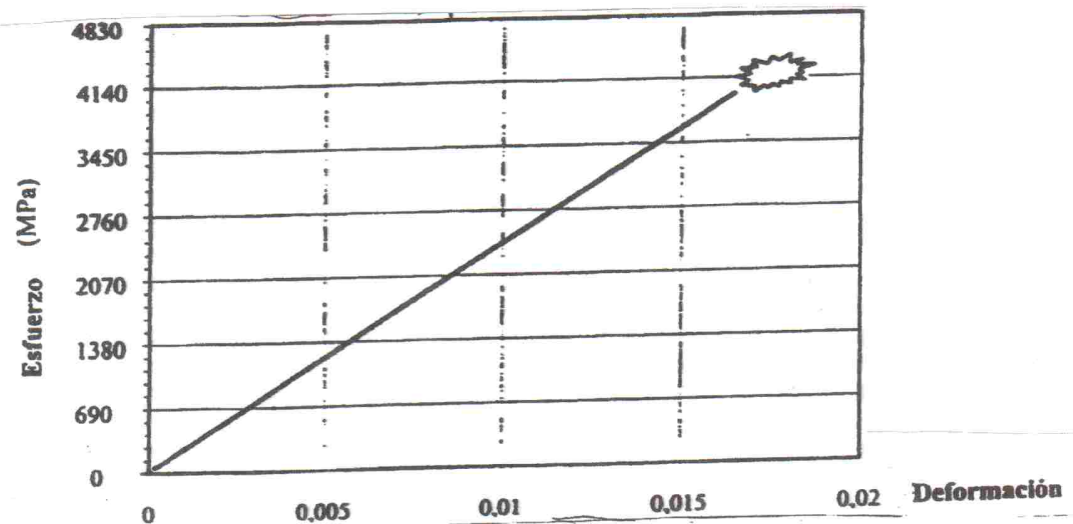
4. Aplicaciones y uso. El sistema compuesto de refuerzo Mbrace es una alternativa muy eficaz en función de los costos al compararlo con otras técnicas convencionales de refuerzo. Las láminas de fibra de alta resistencia mecánica pueden instalarse con rapidez y facilidad en superficies planas, alrededor de columnas o vigas, y en áreas que tienen acceso limitado.

El sistema ha sido utilizado para aumentar la resistencia a flexión de vigas, losas y columnas, la resistencia a cortante de vigas, columnas y muros, y la ductilidad de las columnas.

5. Propiedades mecánicas. Las propiedades mecánicas del sistema compuesto Mbrace dependen significativamente de las fibras. Para propósitos típicos de diseño, sólo se toman en cuenta la resistencia a la tensión y el módulo de tensión. Estos valores son determinados por ensayos de tensión de las fibras.

La resistencia a la rotura se determina utilizando el área neta de la fibra embebida en el saturante curado. La resistencia de diseño, f_{fu} , se determina reduciendo el valor promedio de resistencia a la rotura con tres desviaciones estándar. Las curvas esfuerzo-deformación de las fibras Mbrace son las típicas que se obtienen para los polímeros reforzados con fibras, y muestran un comportamiento lineal hasta el valor de resistencia a la rotura, seguido por fractura frágil.

Figura 1. Curva esfuerzo-deformación de la fibra de carbono de alta resistencia a la tensión CF 130 MBrace



6. Refuerzo a Cortante

a. Opciones de refuerzo a Cortante. El sistema compuesto de refuerzo Mbrace ofrece al ingeniero varias opciones para aumentar la resistencia al esfuerzo cortante. En general, y de una manera similar al procedimiento seguido para estribos de acero, se envuelven las fibras transversalmente alrededor de una sección de hormigón a fin de evitar grietas diagonales a tensión; a partir de esta metodología general se han diseñado e investigado varias configuraciones de refuerzo para las fibras de carbono a cortante.

b. Configuración de refuerzo a cortante. El método más eficaz de aplicar refuerzo a cortante con láminas de las fibras de carbono es envolver toda la sección transversal de la viga con las fibras.

Habitualmente esta configuración no es práctica desde el punto de vista de construcción; frecuentemente, la presencia de losas monolíticas u otros elementos soportados impiden envolver la lámina alrededor de la parte superior de la sección. Una opción podría ser la de perforar la losa y envolver tiras o bandas de carbono alrededor de la sección, pero este método es frecuentemente demasiado complicado y costoso.

El método más común es envolver los lados y la parte inferior de la sección. Esta configuración, es conocida como la envoltura en “U”.

La envoltura en “U” es práctica y eficaz para aumentar la resistencia al esfuerzo cortante de la sección. Sin embargo, su eficacia es muy alta únicamente en las regiones de momentos positivos. En las regiones de momentos negativos, el agrietamiento por cortante se inicia desde la parte superior de la sección cerca de la losa; debido a su posición debajo de la losa es posible que el refuerzo de las fibras de carbono no pueda controlar la iniciación de estas grietas. Una vez éstas se abran existe la posibilidad de que se propaguen a través de la sección sin que el refuerzo por medio de las fibras de carbono ejerza efecto de refuerzo alguno.

c. Distribución de refuerzo a cortante. El refuerzo de fibras de carbono transversal puede aplicarse en forma de tiras uniformemente separadas o en forma de una envoltura continua. El uso de tiras puede ser eficaz para optimizar la cantidad de material empleado; además, si se va a envolver todo el largo de la viga, tal configuración puede permitir una mejor migración de la humedad a través del hormigón.

d. Orientación de la fibra. Debido a que la fibra de carbono es un material anisotrópico, con alta resistencia en la dirección de las fibras, éstas pueden orientarse en la dirección que produzca un refuerzo máximo de las grietas a tensión diagonales. Tal efecto puede lograrse empleando tiras inclinadas. Sin embargo, las capas de refuerzo orientadas verticalmente son más fáciles de instalar y pueden reducir la longitud total de la envoltura.

e. Refuerzo biaxial. Se ha demostrado que el uso de fibras de carbono biaxiales mejora el rendimiento general del sistema. Para ello, se colocan dos capas unidireccionales de refuerzo de fibra de carbono en direcciones mutuamente perpendiculares. La capa en la dirección primaria suministra la mayoría del refuerzo, mientras que la que está en la dirección secundaria limita las aperturas de grietas por cortante y facilita el anclaje de la capa de dirección primaria.

f. Cálculo de rotura. En el estado límite, no es posible alcanzar la resistencia total de las fibras de carbono en una situación de refuerzo a cortante. La falla está controlada por la rotura de la lámina a esfuerzos promedios que están muy por debajo de la tensión de rotura debido a las concentraciones de esfuerzos, o el desprendimiento de la lámina de fibra de carbono de la superficie del hormigón o disminución significativa de la resistencia al esfuerzo cortante del hormigón, resultante de una pérdida de entrecruzado de los agregados. En el proceso de cálculo a rotura se toman en cuenta todos estos modos de falla.

7. Capacidad a cortante de una sección reforzada con fibras de carbono. La resistencia nominal al esfuerzo cortante de una sección de hormigón armado, según la norma ACI 318-95 es la suma de la resistencia al esfuerzo cortante del hormigón y la resistencia del refuerzo a cortante del acero. Para vigas reforzadas con refuerzo de fibras de carbono a cortante, la resistencia nominal al esfuerzo cortante puede calcularse sumando un tercer término que represente la contribución de la lámina de fibra de carbono, tal como se expresa en la ecuación (1).

$$V_n = V_c + V_s + 0.85V_f \quad (1)$$

Donde V_n es la resistencia al esfuerzo cortante (nominal) de una sección dada, V_s es la resistencia al esfuerzo cortante del refuerzo de acero al carbono transversal en una sección dada, V_c es la resistencia al esfuerzo cortante del hormigón en una sección dada y V_f es la resistencia al esfuerzo cortante del refuerzo de fibra de carbono transversal en una sección dada.

Debido a que esta técnica de reparación es nueva, se aplica un factor de seguridad de 0.85 a la contribución de la fibra de carbono a la capacidad a cortante.

Para obtener la resistencia al esfuerzo cortante a rotura (ϕV_n), se multiplica la resistencia nominal al esfuerzo cortante por un factor de reducción de la resistencia a cortante, ϕ . Se sugiere aplicar el factor de reducción de $\phi = 0.85$ (a cortante) especificado en la norma ACI 318-95. En ciertas ocasiones puede que sea necesario incorporar factores de seguridad adicionales dependiendo de las condiciones de la estructura existente.

8. Contribución del refuerzo de la fibra de carbono a la capacidad a cortante. La expresión general para la capacidad adicional aportada por el refuerzo de la fibra de carbono a cortante está dada en la ecuación (2).

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d_f}{S_f} \leq 0.33 (f'_c b_w d)^{1/2} \quad (2)$$

Donde A_{fv} es el área total de una tira de refuerzo de fibra de carbono transversal, f_{fe} es el nivel de esfuerzo en el refuerzo de fibra de carbono a cortante, S_f es la separación entre tiras de refuerzo de fibra de carbono a cortante, β es la orientación de las fibras primarias con respecto al eje longitudinal de la viga, d_f es la profundidad del refuerzo de fibra de carbono a cortante en (mm), f'_c es la resistencia a compresión nominal del hormigón, b_w es el ancho del alma de la sección transversal y d es la distancia al centro del refuerzo de acero a tensión en (mm).

La determinación de la capacidad de refuerzo de la fibra de carbono a cortante es similar a la empleada para hallar la contribución a cortante del refuerzo de acero transversal, y la ecuación sigue el formato ACI. Tal como la ecuación ACI, se calcula la contribución a cortante suponiendo un ángulo de agrietamiento a cortante de 45 grados, calculando el área de refuerzo que cruza esta grieta potencial, y multiplicando el área por la resistencia del material.

La resistencia al esfuerzo cortante del hormigón impone un límite razonable en la máxima resistencia adicional al esfuerzo cortante que puede alcanzarse. Dicho límite se impone principalmente a fin de establecer si el uso de la fibra de carbono no es apropiado como refuerzo a cortante. Más aún, este límite mantiene el uso de la fibra de carbono como refuerzo suplementario.

A fin de determinar el área de refuerzo de la fibra de carbono a cruzar una grieta potencial por corte de 45 grados, se requieren los términos A_{fv} , df , sf , y β . El término A_{fv} es el área de una tira de refuerzo de fibra de carbono transversal que cubre ambos lados de la viga; dicha área puede expresarse mediante la ecuación 3.

$$A_{fv} = 2n (tf) (wf) \quad (3)$$

En donde n es el número de capas de refuerzo, tf es el espesor de cada capa, y wf es el ancho de la tira.

En una región de momento positivo, la dimensión de la tira, df , es igual a la proyección horizontal de la grieta por cortante (supuesta a ser 45 grados) menos la distancia que va desde la parte superior de la grieta hasta la parte superior de la lámina. Debido a que, por lo general, las grietas por cortante se inician como grietas verticales hasta que alcanzan la profundidad del refuerzo de acero longitudinal, la profundidad efectiva de la tira de fibra de carbono debe medirse desde el centroide del acero en la parte inferior de la sección. Por lo general, las tiras se extienden únicamente a la cara inferior de la losa en la parte superior de la viga. Por tanto, la profundidad efectiva de la tira de fibra de carbono puede calcularse restando la profundidad de la losa, h_s , de la distancia al acero, d .

La separación entre las tiras, sf , está definida como la distancia desde la línea central de una tira a la línea central de la tira adyacente. El wf es el ancho de las tiras.

El ángulo β define la orientación de las fibras primarias con respecto al eje longitudinal de la viga. Las fibras primarias son más eficaces cuando se orientan perpendicularmente a la grieta potencial.

Es importante decir que es imposible alcanzar la resistencia a la rotura de la lámina en una situación de refuerzo a cortante. Por lo tanto, en el cálculo del esfuerzo efectivo se aplica un factor de reducción (R) a la resistencia de diseño.

$$f_{fe} = R f_{fu} \quad (4)$$

Donde f_{fu} es la resistencia de diseño de la fibra de carbono.

El modo de falla imperante determina el factor de reducción. Para láminas que no envuelvan completamente la sección transversal de la viga, el modo de falla principal es desprendimiento de la lámina del hormigón. Si se envuelve la sección completamente, el anclaje es adecuado y, por lo tanto, la adhesión es menos crítica.

Otro modo de falla que debe considerarse aquí es la pérdida de entrecruzado de los agregados del hormigón. Si el ancho de la grieta por cortante se vuelve demasiado grande, se pierde el entrecruzado de los agregados junto con la mayor parte de la resistencia al esfuerzo cortante del hormigón, V_c . A fin de controlar dicho ancho, es necesario restringir la deformación (y por lo tanto, el esfuerzo) de la lámina de fibra de carbono. Aunque este factor se aplica principalmente a vigas totalmente envueltas, debe considerarse como un factor limitante general para todas las configuraciones de envoltura.

En la ecuación 5 se consideran ambos modos de falla:

$$R = \frac{k_1 k_2 L_e}{11900 \epsilon_{fu} \epsilon_{fu}} \leq 0.005 \quad (5)$$

Donde k_1 es el multiplicador de la longitud de adhesión efectiva en que se basa la resistencia del hormigón, k_2 es el multiplicador de la longitud de adhesión efectiva en que se basa la configuración de envoltura, L_e es la longitud de adhesión efectiva de la tira de fibra de carbono (mm) y ϵ_{fu} es la deformación de rotura de la fibra de carbono.

La primera parte de la ecuación se refiere al desprendimiento de la lámina de fibra de carbono.

La ecuación fue desarrollada a partir de una combinación de trabajo empírico y experimental relacionado con la determinación de la resistencia de adhesión de la fibra de carbono al hormigón. Este arreglo de prueba de adhesión es particularmente adecuado para una situación de refuerzo a cortante debido a que el método de transferencia de fuerza es similar.

El límite de $0.005/\epsilon_{fu}$ de la ecuación está relacionado con la pérdida de entrecruzado de los agregados. El entrecruzado de los agregados se mantiene limitando la apertura de la grieta por cortante. Se ha sugerido que tal cosa puede lograrse restringiendo la deformación de la fibra de carbono a valores que oscilan entre 0.004 a 0.005 mm/mm.

Hasta ahora no se ha considerado el otro modo de falla posible, rotura de la fibra de carbono. Sin embargo, este modo de falla se produce habitualmente a deformaciones superiores de 0.005 mm/mm y por ende, sucederá únicamente tras la pérdida de entrecruzado de los agregados.

Es necesario hallar la longitud de adhesión efectiva (L_e) a fin de determinar el factor limitante de la adhesión. De acuerdo con observaciones experimentales, la fuerza máxima a la tensión que puede soportar la tira de fibra de carbono no depende de su longitud de adhesión total; la razón de ello es que la carga está soportada por la adhesión únicamente en un área concentrada de adhesión activa, y los esfuerzos de adhesión en la porción remanente de la lámina son relativamente pequeños. Si se produce de laminación en esta región, el área de adhesión activa se desplazará a una nueva área. Esta acción se repite hasta que la de laminación se propaga completamente a lo largo de la fibra de carbono. Por tanto, la magnitud máxima que puedan soportar los esfuerzos de adhesión en el área de adhesión activa determinarán la mayor fuerza de

tensión que puede soportar la lámina. La longitud de adhesión efectiva multiplicada por el ancho de la tira define esta área de adhesión activa.

La longitud de adhesión efectiva disminuye al aumentar la rigidez de la lámina (más capas de refuerzo). Físicamente, esto hace que el esfuerzo en la lámina se transfiera a una área más pequeña del hormigón, aumentando así el esfuerzo en el hormigón. Por tanto, la adición de más capas de refuerzo aumentan la resistencia en general, pero disminuye la eficiencia del sistema de fibras de carbono. La longitud de adhesión efectiva (L_e) se expresa matemáticamente en la ecuación 6.

$$L_e = [1/(n)^{1/2}] L_o \quad (6)$$

En esta ecuación, L_o es la longitud de adhesión efectiva para una capa de refuerzo de la fibra de carbono. A continuación se dan los resultados del cálculo de la longitud de adhesión efectiva para una capa de refuerzo de cada uno de los sistemas de refuerzo de fibra Mbrace:

Cuando n es 2 :

$$L_o = 55 \text{ mm para CF 130.}$$

$$L_e = 38.89 \text{ mm}$$

$$L_o = 40 \text{ mm para CF 530.}$$

$$L_e = 28.28 \text{ mm}$$

$$L_o = 65 \text{ mm para EG 900.}$$

$$L_e = 45.96 \text{ mm}$$

Asimismo, la resistencia del hormigón y la configuración de adhesión afectan la longitud de adhesión efectiva, y por tanto se aplican dos factores adicionales para compensar estos efectos.

El factor k_1 dado en la ecuación 7 se aplica para materiales de hormigón que tengan valores de resistencia diferentes de 27 Mpa.

$$k_1 = (f_c/27)^{2/3} \quad (7)$$

El factor k_2 representa la configuración de envoltura empleada. Este factor está dado en la ecuación 8.

$$k_2 = d_{fe} / d_f \quad (8)$$

Donde d_{fe} es la profundidad efectiva del refuerzo de fibra de carbono a cortante considerando únicamente áreas suficientemente adheridas (mm).

Una vez que se desarrolle una grieta por cortante, sólo la porción de fibra de carbono que se extienda más allá de la grieta por la longitud de adhesión efectiva será capaz de soportar carga a corte. Por lo tanto, se disminuirá la profundidad del refuerzo de la fibra de carbono a menos que la fibra de carbono este envuelto alrededor de la sección. Seguidamente se muestran los criterios que deben emplearse para calcular la profundidad efectiva basada en la configuración de envoltura.

$d_{fe} = d_f - L_e$ si la tira de fibra de carbono esta envuelta en "U".

$d_{fe} = d_f - 2L_e$ si la tira de fibra de carbono esta adherida solo a los dos lados de la viga.

Tal como se estableció anteriormente, la influencia de la adhesión no es tan importante cuando la lámina esta envuelta totalmente alrededor de la sección transversal de la viga.

En este caso, puede despreciarse el factor limitante de adhesión, y el factor de reducción, R , puede tomarse como el valor máximo.

$R = 0.005 / \epsilon_{fu}$ si la viga esta envuelta completamente.

9. Refuerzo de fibra de carbono Biaxial. Las ecuaciones de diseño presentadas no utilizan el uso de refuerzos de fibra de carbono biaxiales, en los que las fibras están orientadas en dos direcciones perpendiculares. Típicamente cuando se forman grietas por cortante, se supone que el desplazamiento está en la dirección vertical y que el componente vertical de la fuerza de resistencia aportada por el refuerzo

tiene una acción eficaz. Sin embargo, en realidad el desplazamiento tiene también una componente horizontal que resulta del giro corporal rígido alrededor de la punta de la grieta por corte. Si únicamente se utilizan capas de refuerzo de fibra de carbono verticales ($\beta = 90^\circ$), nada podrá hacerle frente a este componente de deformación horizontal. (En caso de los estribos de acero, los anclajes del estribo resisten dicho componente.) Por tanto, se recomienda utilizar una capa de refuerzo horizontal adicional ($\beta = 0^\circ$), para resistir este movimiento y limitar aun más la apertura de la grieta por corte.

Asimismo, la capa de refuerzo horizontal suprime la grieta vertical que se inicia al fondo de la sección (para flexión positiva) debajo del centro longitudinal del acero. Debido a este mecanismo de control de la grieta, la capa de refuerzo horizontal debe colocarse siempre lo más cerca posible de la parte inferior de la sección a fin de producir flexión positiva, y lo más cerca posible de la parte superior de la sección para producir flexión negativa.

En ausencia de un método cuantificable para determinar la cantidad de refuerzo secundario a utilizarse, basta con un método general. En general, debe utilizarse una capa de refuerzo secundaria cuando se emplea una capa de refuerzo primaria, y debe utilizarse una capa secundaria por cada dos capas primarias adicionales. Por ejemplo, un diseño que emplee tres capas de refuerzo primarias debe incluir dos capas de refuerzo secundarias. La colocación de las capas de refuerzo debe hacerse alternando primarias y secundarias, colocándose inicialmente la capa primaria.

10. Separación entre tiras. De manera similar al procedimiento seguido para refuerzos de acero a cortante, debe procurarse que la separación entre las tiras de fibra de carbono no sea tan ancha como para permitir la formación total de una grieta diagonal sin que intercepte una tira. Por esta razón, la máxima separación entre tiras debe ser la indicada en la ecuación 9.

$$S_{f,\max} = W_f + d / 4 \quad (9)$$

11. Límite del refuerzo a cortante total. Las secciones 11.5.6.7. y 11.5.6.8 de la norma ACI 318-95 establecen un límite a la resistencia total al esfuerzo cortante que puede aportar más de un tipo de refuerzo a cortante, y por tanto es necesario incluir el refuerzo de la fibra de carbono a cortante en dicho límite. La ecuación 10 sugiere una modificación de la ACI 318-95 sección 11.5.6.8

$$V_s + V_f \leq 0.66 (f'_c)^{1/2} b_w d \quad (10)$$

B. Fibra de carbono (Sika Guatemala)

El uso de la fibra de carbono (FRP) para el reforzamiento estructural tiene una corta historia, y son necesarias pruebas de laboratorio adicionales así como soporte con datos analíticos para ampliar su uso. En consecuencia, el uso de FRP en reforzamiento estructural y aplicaciones de rehabilitación debe ser llevado a cabo con precaución y con el juicio de un ingeniero competente. FRP no debe ser usado en las siguientes situaciones:

- La condición del sustrato es desconocida o está muy deteriorado;
- Existe una corrosión substancial en curso en el acero de refuerzo interno;
- No existe acero de refuerzo suave para proporcionar comportamiento dúctil, etc.

Actualmente existen reglas para el diseño del concreto con reforzamiento FRP. El Comité del Concreto del Reino Unido publicó en el año 2000 el Reporte No.55, "Guías de diseño para reforzamiento de estructuras de concreto con materiales compuestos".

El ICBO (International Conference of Building Officials) de Estados Unidos publicó en 1977 el documento AC 125 "Criterios de aceptación para reforzamiento de concreto y de mampostería reforzada y no reforzada con el uso de materiales compuestos", en donde, además de los criterios, se dan guías de diseño. También se cuenta hoy en día con mayor número de ensayos, tales como efectuados en el laboratorio EMPA de Suiza, en donde se han adelantado investigaciones en reforzamiento a cortante. El tema de cortante también ha sido estudiado por el investigador T.C. Triantafillou.

El Instituto Americano del Concreto (ACI) comité 440-F está desarrollando un documento para proporcionar recomendaciones de diseño y técnicas de construcción para el uso de FRP para el reforzamiento del concreto.

Este documento resumirá el estado del arte existente y la filosofía fundamental de diseño con base en los documentos mencionados. Sin embargo, está por definirse una metodología explícita para el manejo de muchos aspectos importantes, como el uso de los factores apropiados de seguridad, la baja ductilidad de los componentes FRP y aspectos sobre anclaje.

El objetivo de SIKA Guatemala es proporcionar una filosofía de diseño conservadora para ser considerada por profesionales de ingeniería competentes, considerando el diseño de los elementos de concreto reforzados con FRP utilizando productos Sika/Hexcel. SIKA Guatemala presenta un resumen efectivo de lineamientos de diseño que puedan ser modificados para las aplicaciones más comunes existentes.

Ciertos aspectos de los procedimientos presentados están basados en un número limitado de pruebas y conjuntos parciales de datos. Por lo tanto, para aplicaciones inusuales los métodos de diseño propuestos deben ser verificados con pruebas de carga. Algunos de los factores de reducción recomendados son conservadores, hasta que factores más racionales sean definidos y sustentados. Se necesita mayor investigación para ampliar la aplicación de reforzamiento FRP. Para refinar y expandir los procedimientos y filosofías de diseño es necesario conocimiento adicional, especialmente en las áreas de desempeño del compuesto cerca de las cargas últimas (ductilidad vs. falla frágil), la compatibilidad térmica entre la lamina de reforzamiento y el concreto, pérdida de resistencia debido a la transición del vidrio en el adhesivo epóxico a elevadas o bajas temperaturas, etc. Los usuarios de la guía son conscientes de que la investigación está aún en proceso, y que el estado del arte es dinámico; se recomienda revisiones frecuentes y periódicas a la literatura sobre este tema de la ingeniería.

El reforzamiento a cortante de vigas y reforzamiento de columnas se hace preferiblemente con tejidos SikaWrap de vidrio o carbono por su facilidad de colocarse sobre superficies de forma irregular y de poder envolver el elemento.

Las platinas Sika CarboDur de carbono se pueden emplear en ciertos casos especiales para reforzamiento a cortante.

Los tejidos SikaWrap de carbono también pueden ser usados para el reforzamiento a flexión de elementos, solo que las platinas Sika Carbodur de carbono presentan mayores facilidades en la instalación con respecto a los tejidos por ser un elemento preformado y por esta misma razón las incertidumbres en cuanto a calidad final del compuesto son menores permitiendo trabajar en el diseño con factores de reducción de carga mayores. Sin embargo hay situaciones en las cuales el refuerzo a flexión con tejidos puede ser ventajoso como en el caso de refuerzo de grandes áreas en losas o muros y en donde el refuerzo con platinas da una separación entre ellas mayor a la permitida o con una cuantía mayor a la requerida. En ciertos casos especiales se puede utilizar tejido SikaWrap de vidrio para el reforzamiento a flexión.

El Sistema Sika CarboDur está compuesto de varios productos como las platinas preformadas de fibra de carbono Sika CarboDur, tejidos de fibra de carbono y de vidrio SikaWrap y platinas preformadas en forma de L Sika CarboShear. Los sistemas antes mencionados son para reforzamiento pasivo.

1. Durabilidad y capacidad de servicio de Sika CarboDur

a. Material Compuesto Sika CarboDur – Propiedades y Guías de Selección del Tipo de Fibra. Las propiedades del material y el comportamiento del compuesto Sika CarboDur y sus componentes se explica a continuación:

1) Fibras. Las fibras solas presentan unas buenas características de durabilidad a largo plazo, pero son todavía afectadas directa o indirectamente por la humedad, los ciclos de temperatura, exposición a químicos y exposición a rayos UV.

El refuerzo a flexión está controlado por el módulo o rigidez del material ya que en general se trata de grandes luces con necesidad de limitación de las deformaciones. Por esta razón para el refuerzo a flexión se recomienda el uso de fibras de carbono por su alto módulo comparado con otros tipos de fibras. En donde la rigidez no controle se podría usar fibra de vidrio.

Sin embargo también existen fibras de carbono con diferentes módulos para solucionar diversos problemas de capacidad a flexión.

Las recomendaciones también se basan en consideraciones económicas una vez la idoneidad de la fibra es tomada en consideración. El carbono puede ser siempre sustituido por vidrio; lo contrario no es cierto. Las aplicaciones sumergidas o mojadas constantemente pueden usar vidrio a condición que acabados específicos para fibra de vidrio sean usados en conjunto con sistemas de resinas específicos. El uso del carbono en estas aplicaciones es el más recomendado, hasta tanto pruebas de durabilidad específica a largo plazo de los sistemas hayan sido completadas.

2) Resina Epoxi (matriz). Las resinas epoxi son consideradas como el mejor material matriz para el uso con Sika CarboDur debido a su resistencia superior, propiedades adhesivas, resistencia a la fatiga, resistencia química y baja retracción. El factor determinante en la durabilidad, FRP, a largo plazo es la habilidad de la resina para mantener las propiedades del material a lo largo de la vida de servicio de la rehabilitación.

3) Imprimante y/o adhesivo. El imprimante es usado como un adhesivo para unir los compuestos del Sika CarboDur al elemento estructural y para sellar el substrato, previniendo la pérdida del epoxi desde el tejido saturado. Es frecuente un epoxi básico como se describe arriba, mostrando las mismas buenas características de durabilidad como el epoxi matriz. La calidad del imprimante y/o adhesivo es crítica porque es responsable de la transferencia de varios esfuerzos entre los compuestos Sika CarboDur y el concreto.

Como los compuestos usualmente tienen una mayor resistencia a la tensión que el subyacente concreto, la falla casi siempre ocurre unos milímetros adentro de la superficie del concreto y el concreto se adherirá al compuesto FRP levantado. (Mays 1993).

b. Filosofía de diseño para reforzamiento con Sika CarboDur. Debido al elevado costo de la construcción nueva y además al creciente número de estructuras de concreto adecuadas, la necesidad de reparar o reforzar estructuras de concreto armado está creciendo significativamente.

En respuesta a esta necesidad, ha surgido una nueva tecnología de reforzamiento estructural. La adherencia de platinas de acero ha sido un concepto de la reparación del concreto en los últimos 20 años. Sin embargo, el alto costo de colocar las platinas usualmente

pesadas, las dificultades con el empalme de las platinas, y lo relacionado con la corrosión de las platinas de acero, ha limitado el uso de esta técnica. Debido a las excelentes propiedades peso-reforzamiento de Sika CarboDur, a la reciente reducción de los costos del material, a la relativa disponibilidad ilimitada de longitud del material, a su instalación comparativamente simple, y a la inmunidad a la corrosión, se ha permitido que el uso de Sika CarboDur para el reforzamiento esté ganando prestigio sobre la pega con platinas de acero y esté avanzando el concepto del reforzamiento con pega externa. A medida que se van desarrollando técnicas que sean efectivas y con bajo costo en la producción de polímeros reforzados con fibras FRP (Sika CarboDur) continúa el incremento de su aplicación.

El uso de FRP en los Estados Unidos y Latino América está retrasado con respecto a Europa y Japón y existen hoy en día reglas para el diseño de concreto con reforzamiento en FRP. En Japón la Sociedad Japonesa de Ingenieros Civiles JSCE publicó las primeras normas para uso de FRP en rehabilitación de estructuras de concreto.

Algunos de los aspectos en la filosofía de diseño que los diseñadores del reforzamiento FRP deben considerar son:

- Criterio de refuerzo mínimo requerido antes del reforzamiento para prevenir un colapso si el Sika CarboDur es comprometido debido a eventos incontrolables (fuego, vandalismo, impacto, etc.).
- Límites en el mejoramiento de la resistencia, para mantener el comportamiento “dúctil”.
- Factores y límites en la resistencia de diseño.

A continuación se puede observar la colocación del Sika wrap en una viga:

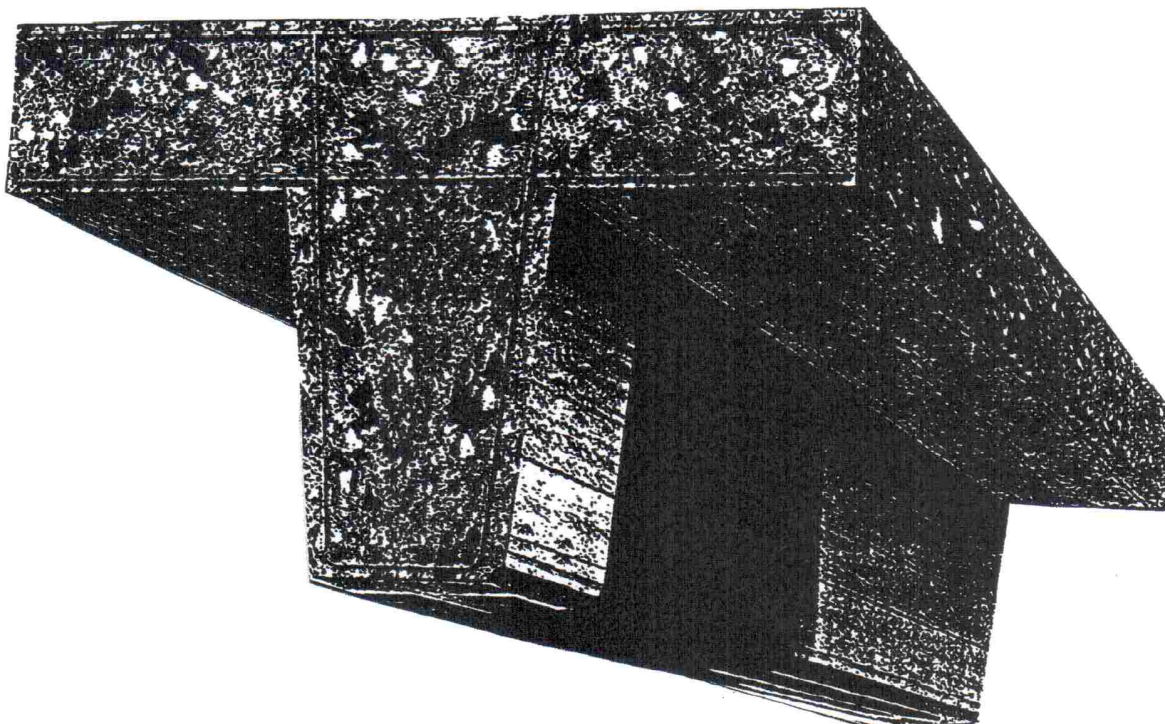


Figura 1a. Colocación de Sikawrap en una viga.

C. Amortiguadores

Los mecanismos de disipación de energía pueden absorber una porción de la energía introducida por un terremoto en la estructura y minimizar la demanda de disipación de energía en los miembros estructurales principales como vigas, columnas y muros. Estos mecanismos pueden reducir sustancialmente las derivas entre niveles y consecuentemente el daño no estructural. Además, aceleraciones bajas y fuerzas de corte más pequeñas conduce a disminuir la demanda de ductilidad en los componentes estructurales.

El objetivo de incorporar mecanismos adicionales de amortiguamiento en el diseño o mejora de una estructura es reducir su respuesta sísmica. En general, el incremento de amortiguamiento en una estructura reduce la demanda de fuerzas y deformaciones. La

cantidad de reducción varia dependiendo de las características de masa, rigidez y amortiguamiento de la estructura; de las características de amplitud, contenido de frecuencias, y duración del movimiento sísmico que se espera que experimente la estructura; y de la cantidad agregada de amortiguamiento suplementario.

1. Distribución de amortiguadores en la estructura. La colocación de mecanismos de amortiguamiento adicional en un edificio incrementa la rigidez lateral de la estructura, asumiendo que los amortiguadores se agregan a un marco simple. El incremento de rigidez se debe directamente a los amortiguadores y a las conexiones en riostras, de allí que las fuerzas laterales se concentran en los lugares donde se encuentran los amortiguadores.

La magnitud en el incremento de la rigidez lateral en una estructura típica varía, dependiendo en el tipo de amortiguador usado, e incrementa con la cantidad de amortiguamiento suministrado. Un rango práctico en el incremento de la rigidez lateral debido a fuerzas de amortiguamiento es más o menos entre 20 y 200% de la rigidez inherente al marco. Así la resistencia a fuerzas laterales puede ser significativa en miembros estructurales a los cuales están conectados los mecanismos de amortiguamiento.

Para muchos edificios que tienen una respuesta predominante en el modo fundamental, la decisión ingenieril respecto a la distribución de amortiguadores en un edificio se debe hacer a través del manejo de las fuerzas de los amortiguadores. Reconociendo que las fuerzas laterales del amortiguador deben ser llevadas desde su punto de origen en cualquier parte de la estructura hacia el suelo, los amortiguadores deberían distribuirse a través de la estructura para asegurar:

Regularidad en planta

Regularidad de la rigidez en elevación

Redundancia

No es esencial que los amortiguadores se distribuyan en toda la altura del edificio. Un primer piso flexible es un ejemplo donde es apropiado colocar amortiguadores sólo en el primer nivel. Sin embargo, si los amortiguadores fueran instalados en el primer nivel de un marco regular, la forma de la respuesta del edificio cambiaría. La deriva entre niveles se reduciría en los niveles de abajo y se incrementaría en los niveles superiores, respecto a la forma de respuesta que tendría si el mismo valor de amortiguamiento viscoso equivalente se

distribuyera a través de toda su altura. De aquí que la teoría normal modal no amortiguada no es aplicable si los amortiguadores no se distribuyeran a través de toda la altura del edificio aproximadamente en proporción a la rigidez básica del marco.

2. Funcionamiento de los amortiguadores viscosos. Una técnica correcta de diseño es modelar directamente como un amortiguador clásico. En este caso, la disipación de energía ocurre a través de la conversión de energía mecánica en calor, conforme un pistón deforma una sustancia altamente viscosa como un gel de silicona. La figura 2^a. muestra uno de estos amortiguadores, el cual ha encontrado aplicación como un componente en los sistemas sísmicos de aislamiento en la base. Una alternativa, y tal vez más efectiva, es el desarrollo del muro de amortiguamiento viscoso, ilustrado en la figura 2b. En este diseño, el pistón es simplemente una placa de acero restringida al movimiento en su plano, que se encuentra dentro de un contenedor rectangular delgado de acero lleno con un fluido viscoso. Una instalación típica en un marco, consiste en adherir el pistón en el piso superior, mientras que el contenedor se fija al piso inferior. El movimiento relativo entre pisos produce esfuerzos cortantes en el fluido y este produce la disipación de energía.

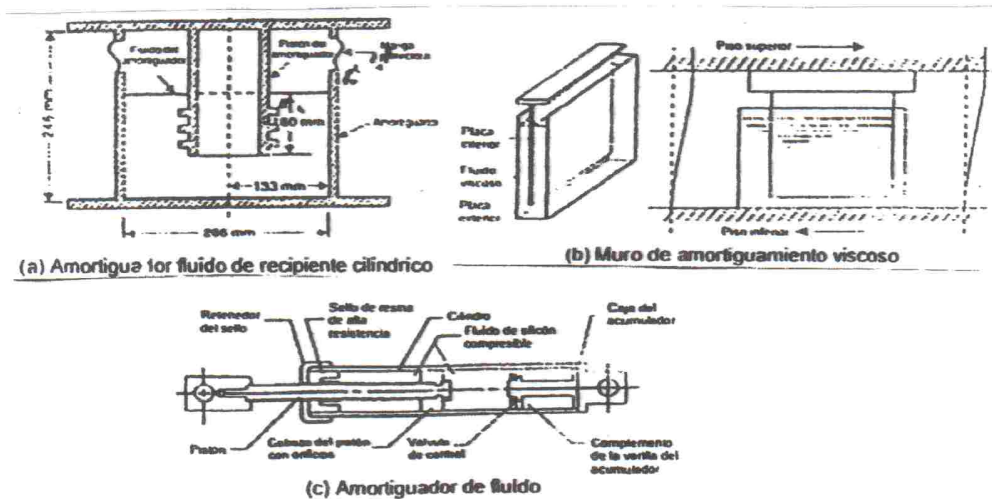


Figura 2. Amortiguadores de fluido viscoso.

Ambos mecanismos discutidos anteriormente, cumplen con su objetivo a través de la deformación de un fluido viscoso que reside en un contenedor abierto. Para maximizar la densidad de disipación de energía en estos mecanismos, se deben emplear materiales con grandes viscosidades. Usualmente, esto lleva a la selección de materiales que poseen un comportamiento dependiente de la frecuencia y de la temperatura.

Existe, sin embargo, otra clase de amortiguadores que se basan en el flujo de fluidos a través de un contenedor cerrado. En estos diseños, el pistón actúa no solo para deformar el fluido localmente, sino que también para forzar al fluido a pasar a través de pequeños orificios. Como resultado, son posibles extremadamente niveles altos de densidad de disipación de energía. Sin embargo, se requieren niveles altos de sofisticación para un diseño interno apropiado del amortiguador.

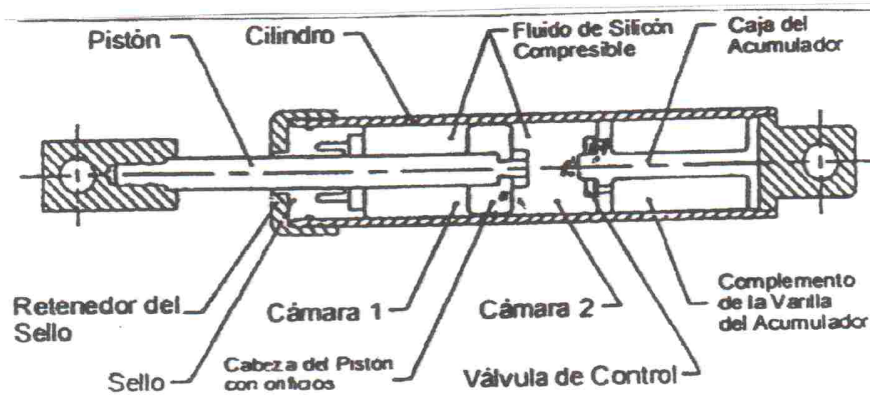


Figura 3. Amortiguador típico de fluido viscoso

Un amortiguador típico de fluido con orificios para aplicación sísmica se muestra en las figuras 2c y figura 3. Este mecanismo cilíndrico contiene un aceite de silicona compresible, el cual es forzado a fluir por la acción de un pistón de acero inoxidable con una cabeza de bronce. La acción de amortiguamiento se provee por el fluido a través de la cabeza del pistón. La cabeza del pistón es hecha con un espacio entre la parte inferior del cilindro y la parte exterior de la cabeza del pistón, lo cual forma un orificio anular. Cuando el amortiguador da un golpe,

el fluido fluye a través de este orificio a altas velocidades. La forma de la cabeza del pistón determina las características de amortiguamiento.

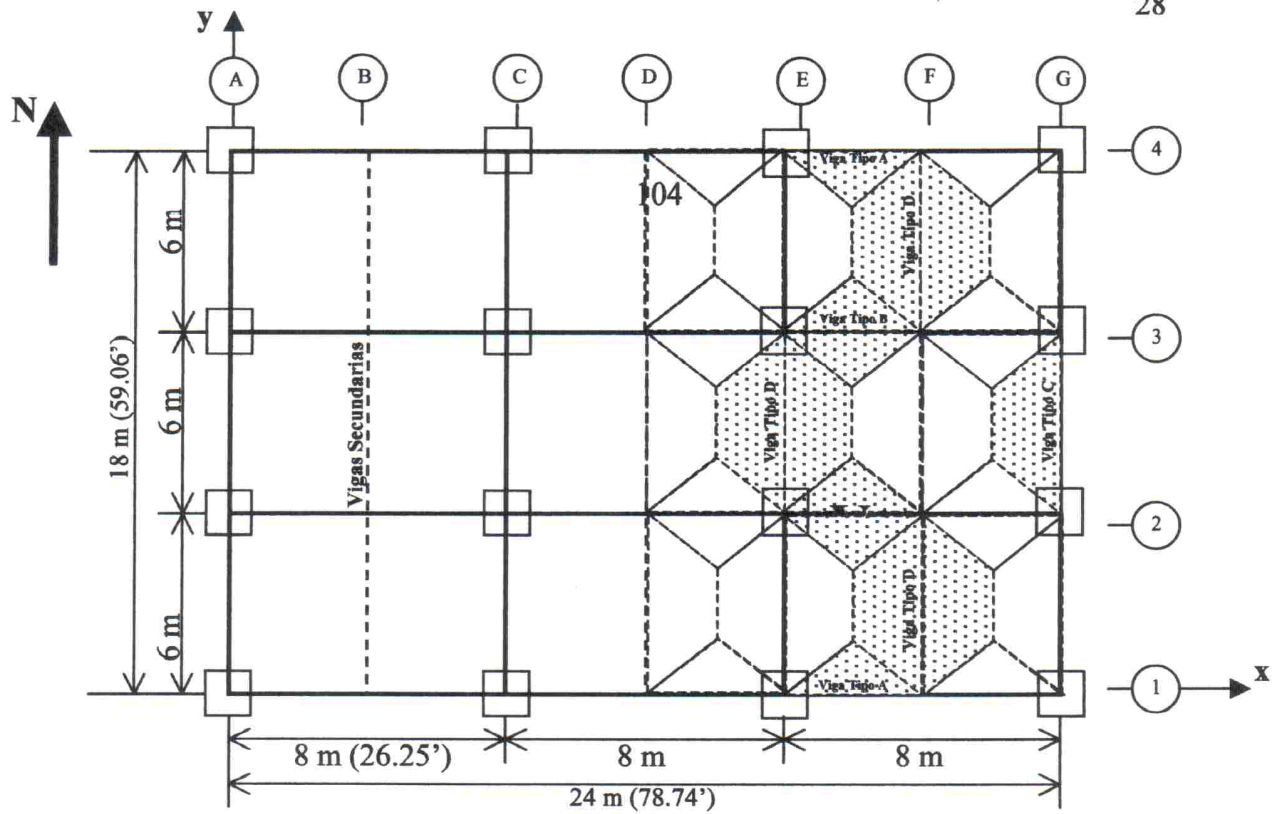
IV. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO DE CONCRETO REFORZADO UTILIZANDO EL ANÁLISIS NO LINEAL ELÁSTICO

A. Descripción de las características principales de la estructura

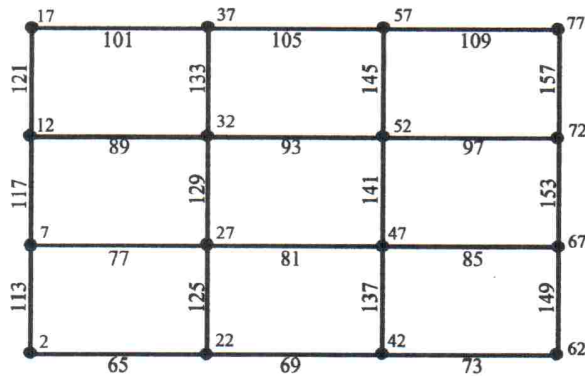
Datos generales, ocupación, colindancias y confiabilidad de los datos:

Se ha decidido evaluar un edificio de concreto reforzado localizado en la Zona 1 de la Ciudad de Guatemala. El año de construcción del edificio fue 1974 y presenta un sistema estructural de marcos de concreto reforzado en ambos sentidos. El edificio tiene cuatro niveles con una altura total de 12 m. El tipo de ocupación son oficinas y el número de personas, entre trabajadores y visitantes, es de aproximadamente 150. El edificio presenta colindancias en el lado norte, este y oeste. Todos estos datos generales y los planos estructurales del edificio fueron proporcionados por el administrador, por lo que se puede asegurar la confiabilidad de los mismos. Según J.C. Castillo(2003:107).

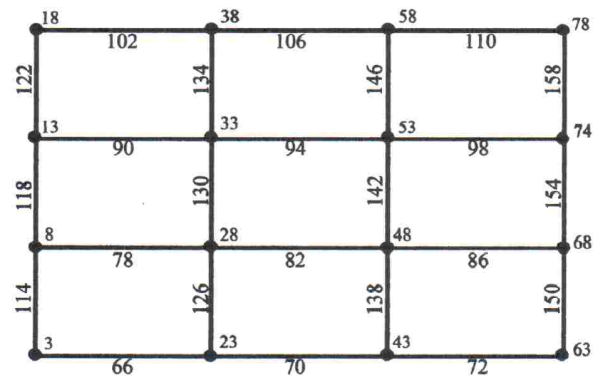
1. Geometría y características principales de la estructura. Como se mencionó con anterioridad, el edificio presenta un sistema estructural de marcos de concreto reforzado en ambos sentidos. En la dirección “y” presenta tres luces de 6 metros cada una y en la dirección “x” 3 luces de 8 metros. El área total del edificio es de 432 metros cuadrados. En la dirección “y” presenta vigas secundarias localizadas en la parte media de las luces de 8 metros. Posee un total de 80 nudos principales y un total de 160 elementos, entre vigas y columnas. En la Figura 4 se puede observar la geometría general de la planta del edificio, la numeración de los elementos y nudos de cada uno de los niveles y las áreas tributarias para cada uno de los tipos de viga. En el Cuadro 2 se muestra la geometría y las características principales del concreto y del refuerzo de columnas, vigas y losas.



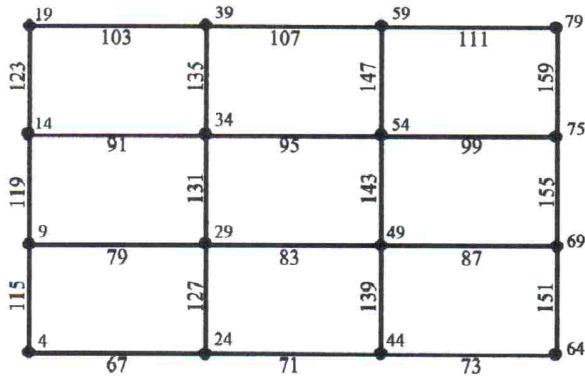
(a) Planta acotada



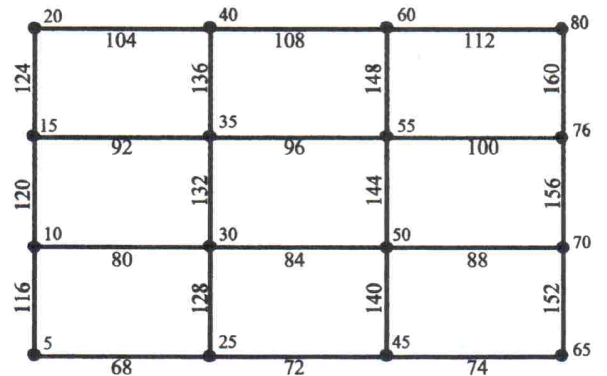
(b) Elementos y nudos nivel 2



(c) Elementos y nudos nivel 3



(d) Elementos y Nudos Nivel 4



(e) Elementos y Nudos Nivel 5

Cuadro 2: Geometría y características del concreto y del refuerzo de columnas, vigas y losas

Elemento	f'_c en lb/in ² (kg/cm ²)	f_y en lb/in ² (kg/cm ²)	Dimensiones (cm)	Varillas
Columnas	4,000 (281)	60,000 (4,218)	70 x 70	12 # 8
Vigas			50 x 75	8 # 6
Vigas Secundarias			30 x 45	6 # 6
Losas			12 (peralte)	N/A

B. Evaluación estructural detallada

Lineamientos en el uso de programas de computadora:

Para la realización del análisis no lineal estático del edificio en mención es necesario de un programa de análisis estructural en computadora. Para este ejemplo, se usó el ETABS 8 Non Linear que cuenta con la herramienta del análisis inelástico. Para poder realizar este análisis en un programa de computadora, se deben de seguir los siguientes pasos principales:

1. Especificar la geometría de la estructura.
2. Definir las propiedades de los materiales.
3. Especificar los elementos que forman parte de la estructura. Aquí se deben de definir las características de las secciones transversales de los elementos del edificio. Estas características dependerán del material seleccionado.
4. Asignar a los elementos del modelo estructural las secciones especificadas en el paso anterior.
5. Asignar restricciones a los elementos y a los nudos. En el caso de tener diafragma rígido, se debe verificar que las vigas tengan restringidos los giros horizontales. Además, los nudos en la base se deben definir empotrados y el resto de los nudos de la estructura libres.

6. Definir los casos de carga estática. Aquí se deben especificar los casos de carga viva, carga muerta, sismo en una o en varias direcciones, etc.

7. Asignar las cargas estáticas a los nudos o elementos.

8. Asignar la masa en los nudos, correspondiente al peso propio de losas, acabados en losas, piso, relleno, sobrecarga muerta (tabiques) etc.

9. Especificar las restricciones del diafragma, dependiendo si es rígido o flexible.

10. Definir las propiedades y el tipo de articulaciones que se asignarán a los elementos. En el programa ETABS 8 Non Linear existen 4 tipos de articulaciones:

- **Articulación PMM:** su cedencia se basa en la interacción de carga axial con momentos flexionantes en la articulación.
- **Articulación P:** su cedencia se basa en la carga axial aplicada en la articulación.
- **Articulación M3:** su cedencia se basa en los momentos flexionantes en la articulación.
- **Articulación V2:** su cedencia se basa en las fuerzas de corte aplicadas en la articulación.

11. Asignar las articulaciones definidas en el paso anterior a los elementos del modelo estructural.

12. Definir los casos de carga estática “Pushover”. En este paso se debe definir el desplazamiento total del edificio y el número mínimo y máximo de iteraciones (incrementos de desplazamiento) que hará el análisis inelástico. En el programa ETABS 8 Non Linear existen 4 distintos métodos que describen la distribución de carga lateral en la estructura para casos de carga “Pushover”:

- **Aplicación de una aceleración uniforme.** En este caso, la fuerza lateral se aplica automáticamente a los nudos, dependiendo de la masa tributaria de ellos.
- **Aplicación de una fuerza lateral a cada nudo, dependiendo del modo de vibración.** Esta fuerza es proporcional al producto de la forma del modo por la frecuencia circular al cuadrado por la masa tributaria a cada nudo.
- **Aplicación de un patrón de carga estática arbitraria.**
- Combinación de cualquiera de los métodos descritos con anterioridad.

Correr el análisis inelástico y visualizar la formación de articulaciones en los elementos del modelo estructural en cada una de las iteraciones realizadas por el programa.

También se debe visualizar el espectro de capacidad vs. demanda y el punto de desempeño de la estructura y comparar los resultados obtenidos con los límites específicos deseados para el edificio. Es importante hacer notar que para determinar la estabilidad global del edificio, es recomendable, pero no obligatorio, realizar un análisis estático y dinámico, dentro del rango lineal, y además, un chequeo de diseño estructural.

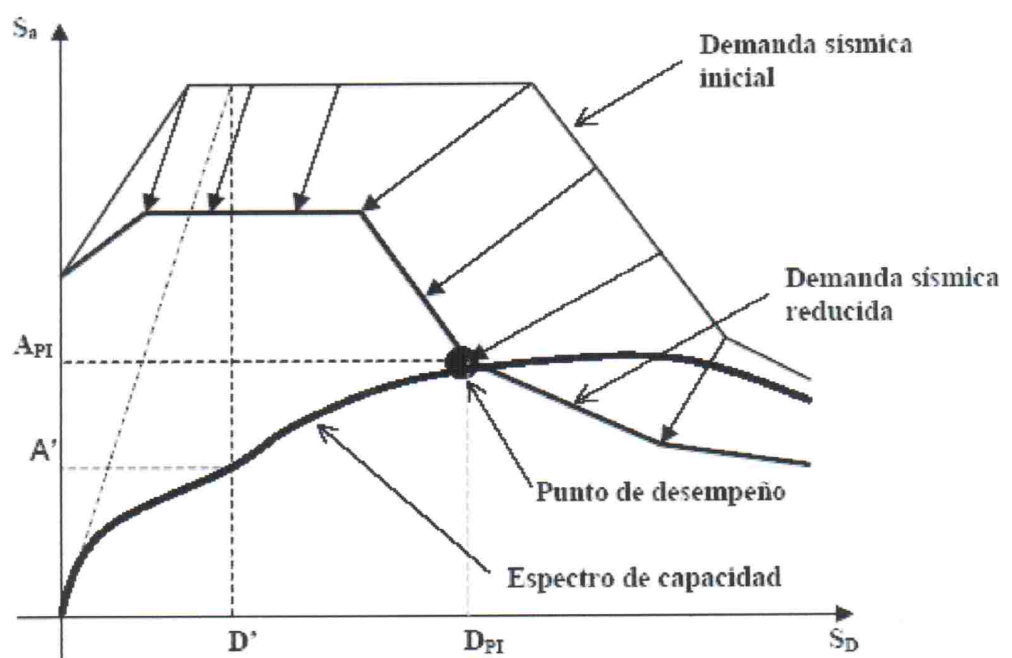
C. Determinación del punto de desempeño de la estructura o máximo desplazamiento

El punto de desempeño es el parámetro que permite determinar la máxima deformación o desplazamiento dado en la estructura. El desempeño depende de la manera en que la capacidad pueda resistir la demanda. Para poder encontrar este punto, el ingeniero debe determinar un punto en el espectro de capacidad. El ingeniero calcula factores de reducción que se deben aplicar al espectro elástico y así tener más energía histerética de disipación asociada con este punto específico. Estos factores de reducción harán que la demanda disminuya. Si el punto de desempeño intercepta a los espectros cerca del punto anterior, entonces ésta es la solución. Si no está cerca, determinar otro punto entre los dos y repetir el proceso hasta obtener el punto óptimo.

El método de capacidad espectral reduce la demanda para encontrar el punto de intersección con el espectro de capacidad, donde el desplazamiento es consistente con el amortiguamiento. El desplazamiento máximo implica un estado único de daños en la estructura que está directamente relacionado con un sismo específico o con la intensidad del movimiento del suelo.

Cuando ya se estimó el punto de desempeño, el ingeniero revisa el desempeño resultante del edificio con un criterio de aceptabilidad, en donde se deben revisar los límites globales de desplazamiento de la estructura y revisar los elementos estructurales vs. sus límites, los cuales dependerán del desempeño global deseado. Al hacer estas revisiones, los analistas pueden encontrar deficiencias en la estructura, lo cual facilitará encontrar estrategias de readecuación que sean técnica y económicamente factibles. También se puede llegar a la conclusión de que la edificación no necesita readecuación y así se ahorra mucho trabajo y dinero.

Figura 5. Curva de capacidad del edificio vs demanda sísmica



Un estimado del desplazamiento final debido a una demanda sísmica en específico se puede obtener con una herramienta llamada aproximación del desplazamiento. Como se puede observar en la figura anterior, esta aproximación se basa en la presunción de que el desplazamiento inelástico es igual al desplazamiento si la estructura permaneciera perfectamente elástica. Generalmente en las estructuras con períodos mayores a 1.0 segundo la aproximación del desplazamiento es similar al desplazamiento inelástico generado por el método de capacidad espectral. Por el otro lado, si la estructura presenta períodos menores que 0.5 segundos, los resultados de ambos métodos pueden llegar a ser considerablemente diferentes.

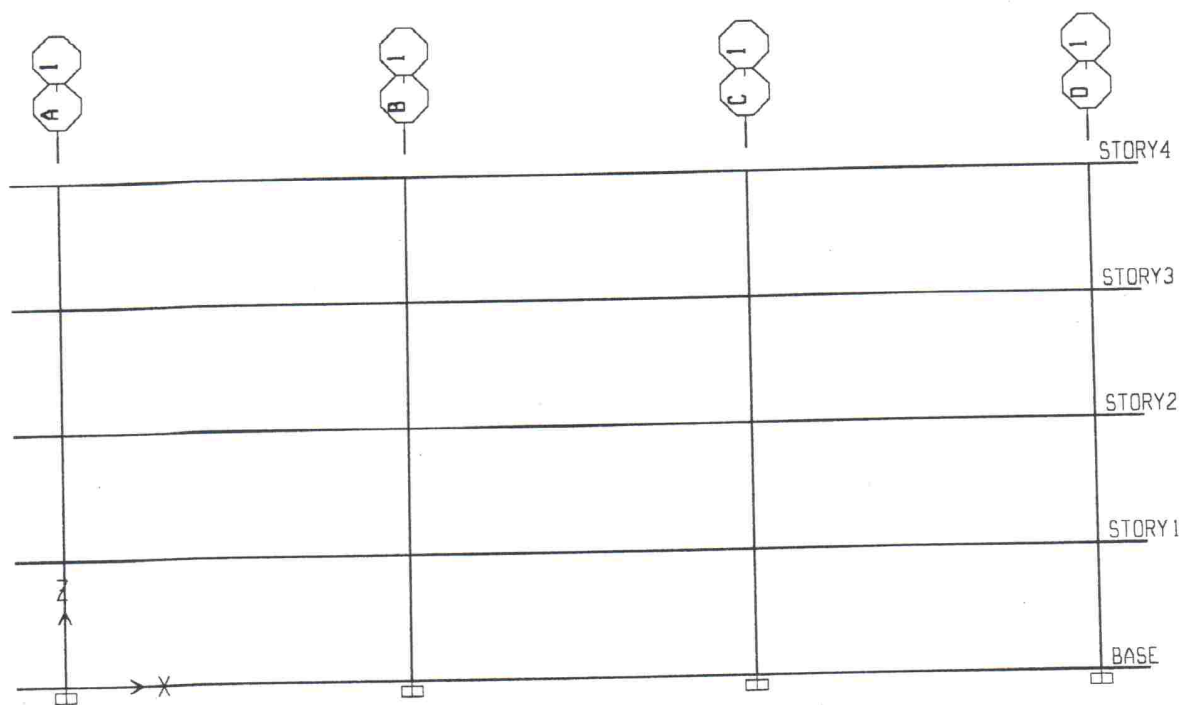
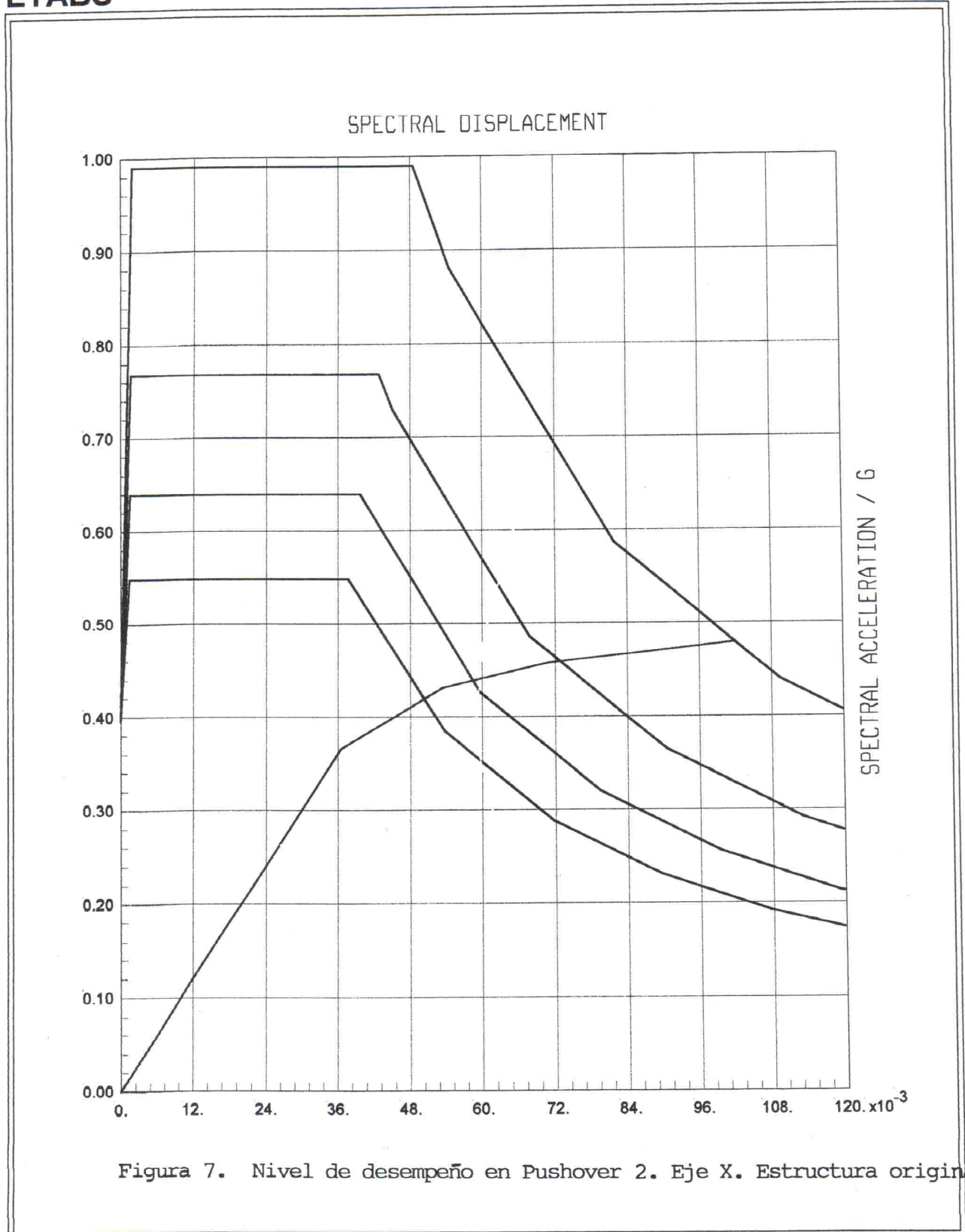


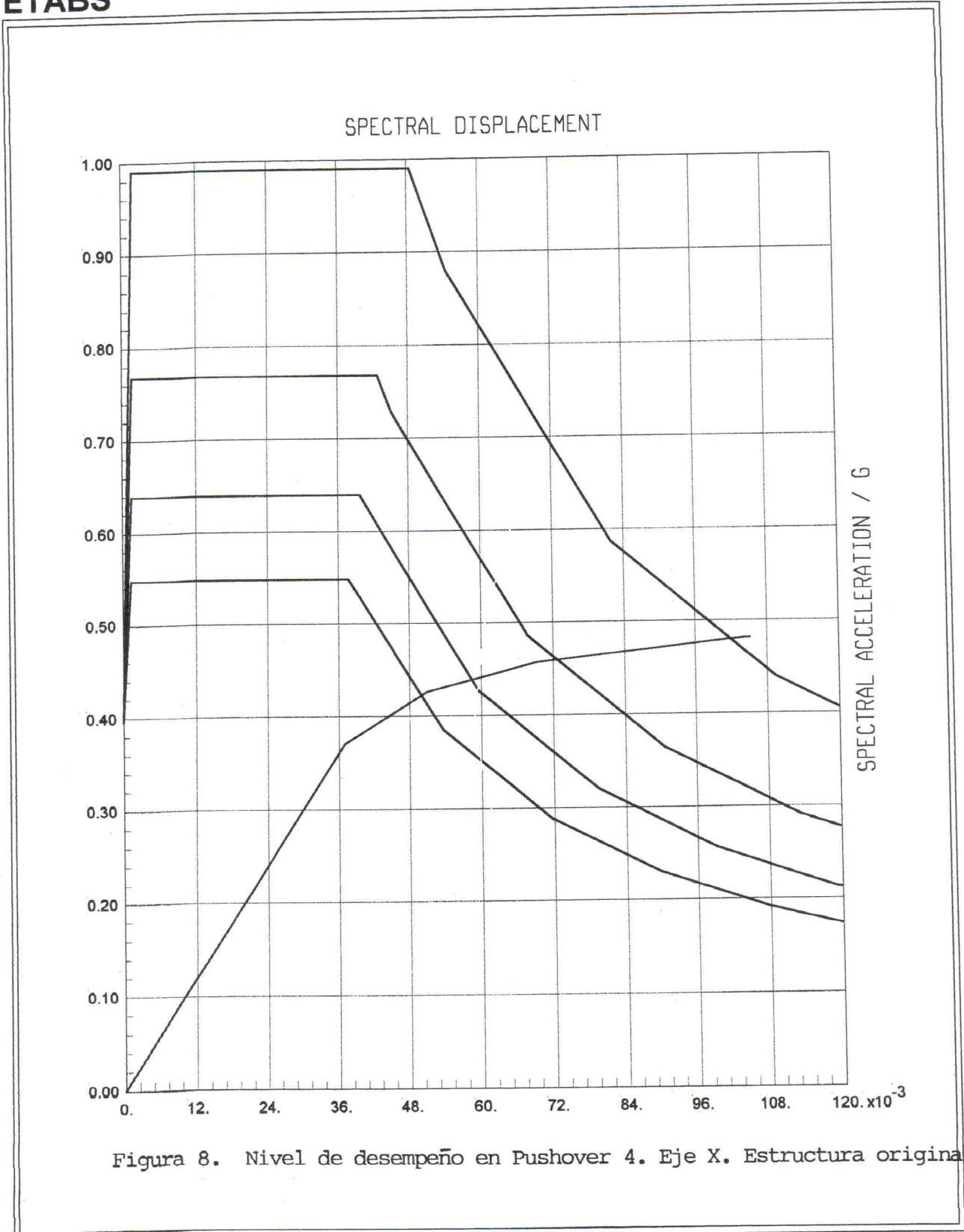
Figura 6. Elevación de la estructura original.

ETABS



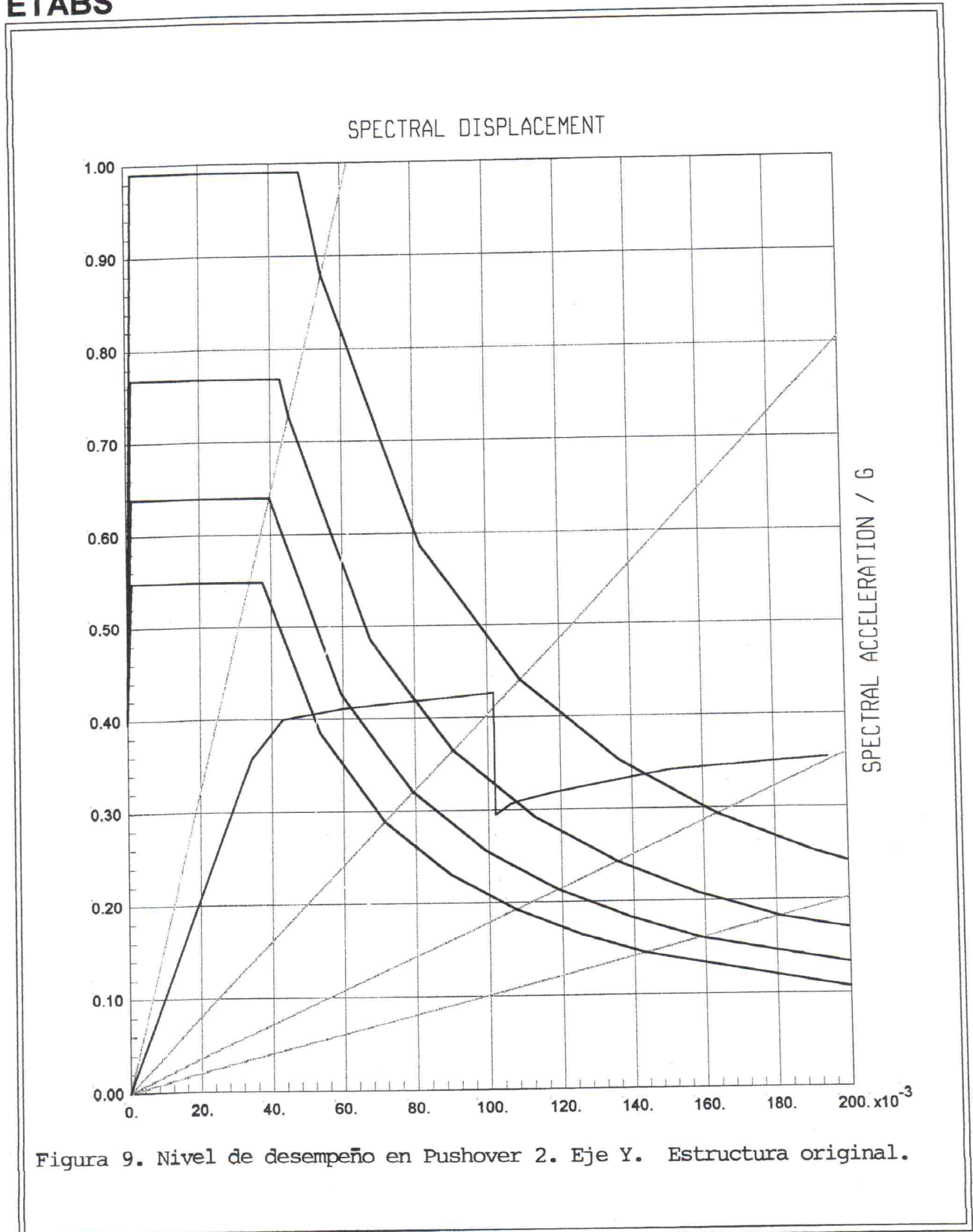
ETABS v8.09 - File:x sin confinamiento - Kgf-m Units
 Pushover Case PUSH2

ETABS

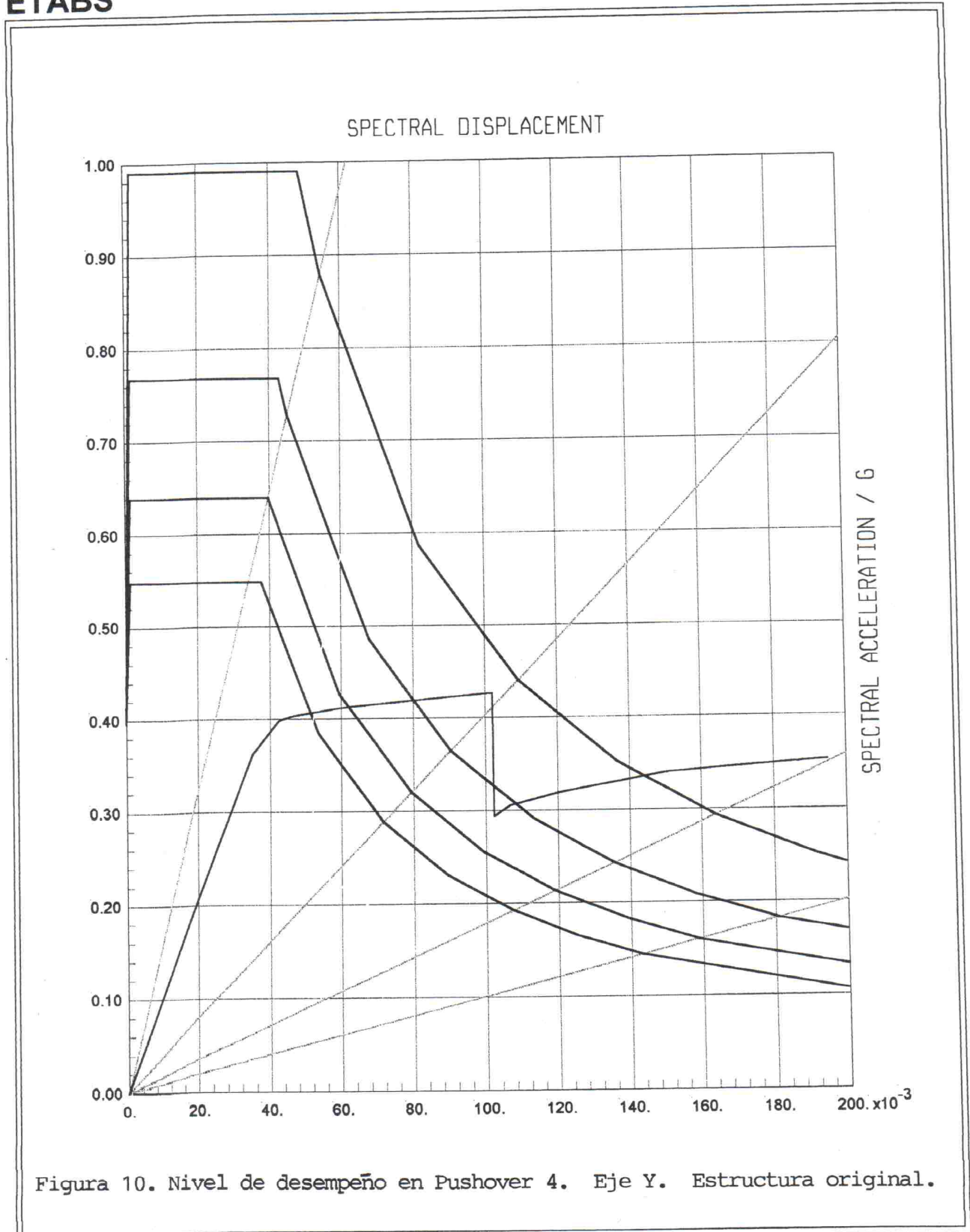


ETABS v8.09 - File:x sin confinamiento - Kgf-m Units
 Pushover Case PUSH4

ETABS



ETABS v8.09 - File:y sin confinamiento - Kgf-m Units
Pushover Case PUSH2



ETABS v8.09 - File:y sin confinamiento - Kgf-m Units
 Pushover Case PUSH4

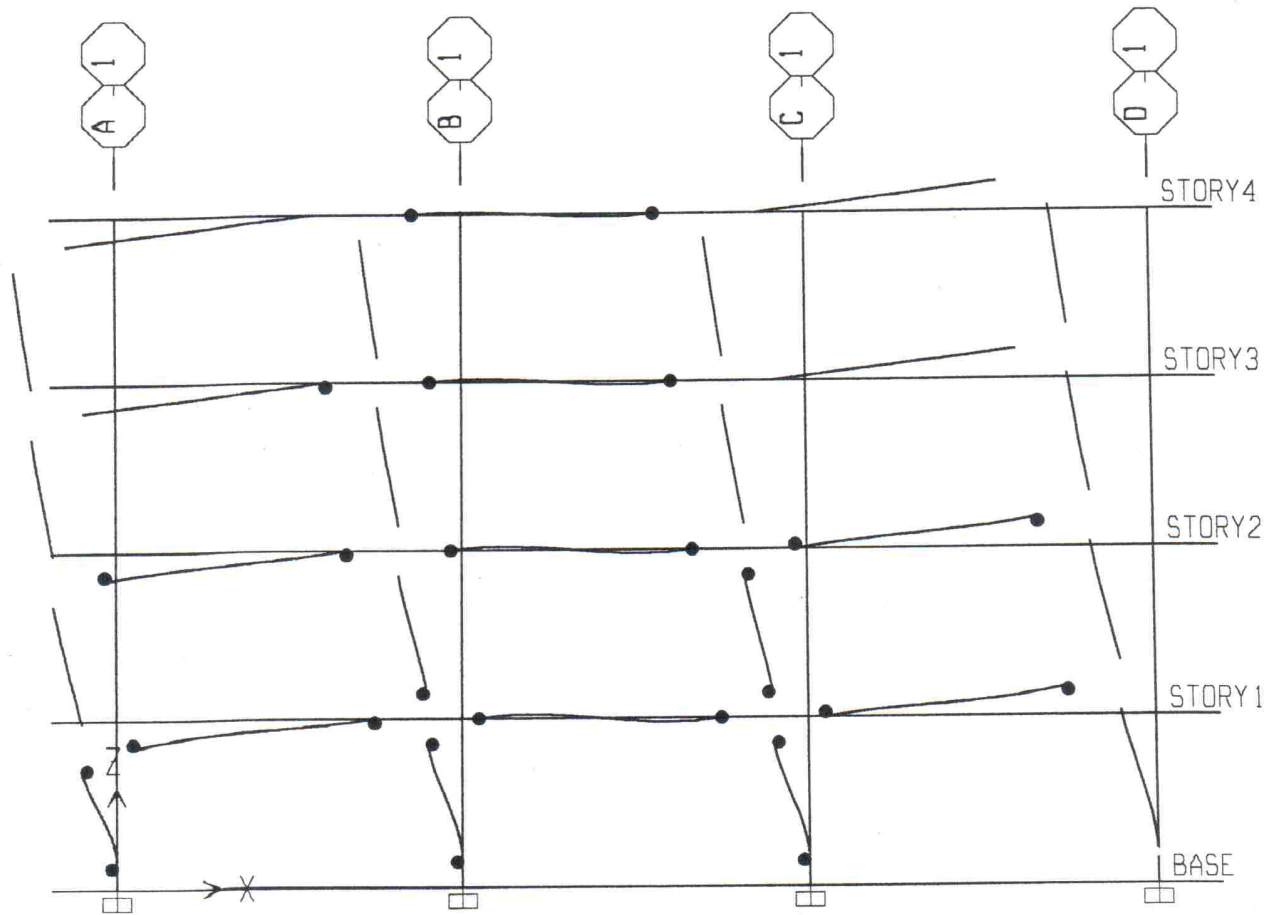


Figura 11. Estructura original. Articulaciones creadas. Eje Y. Pushover 2.

B IO LS CP C D E

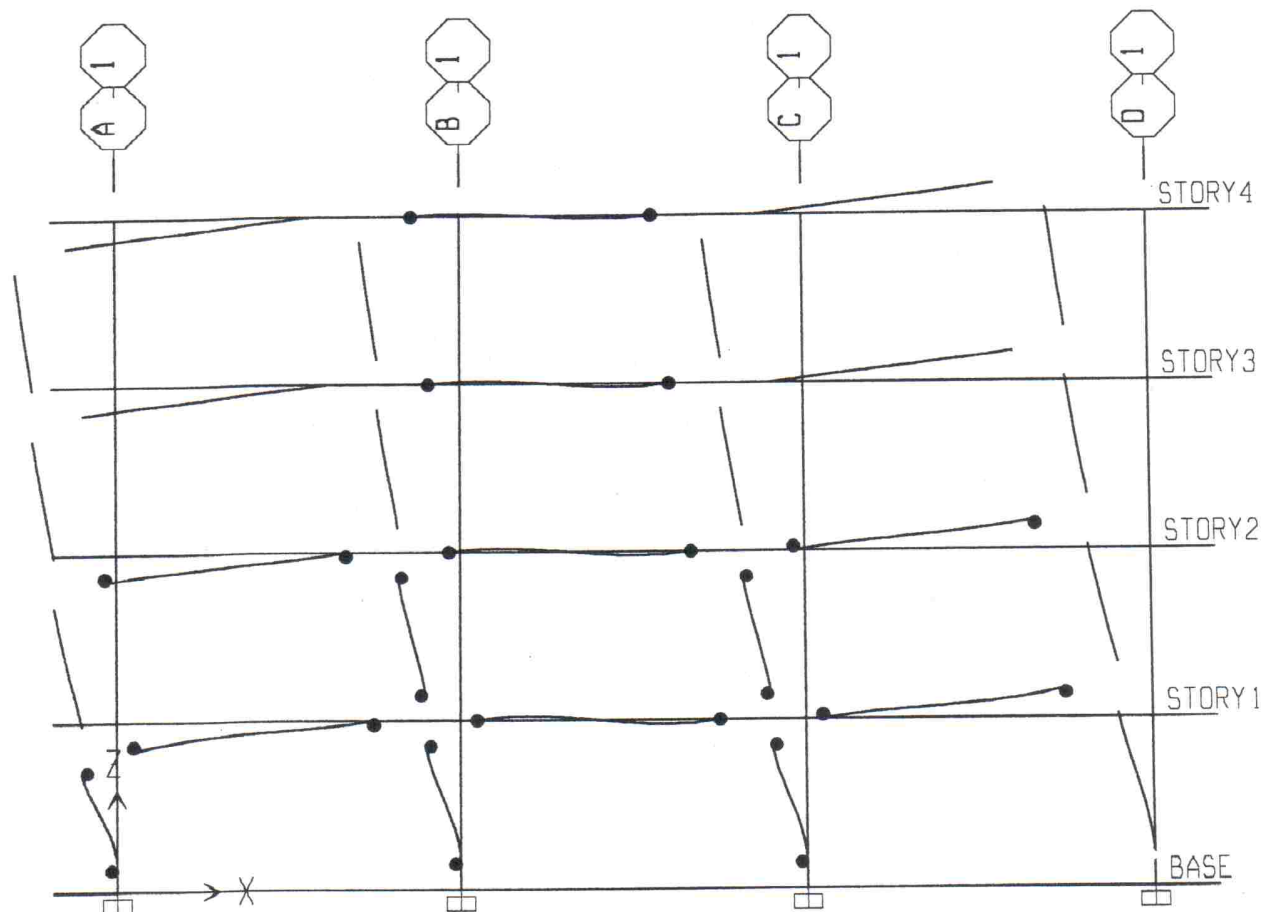


Figura 12. Estructura original. Articulaciones creadas. Eje Y. Pushover 4.

B IO LS CP C D E

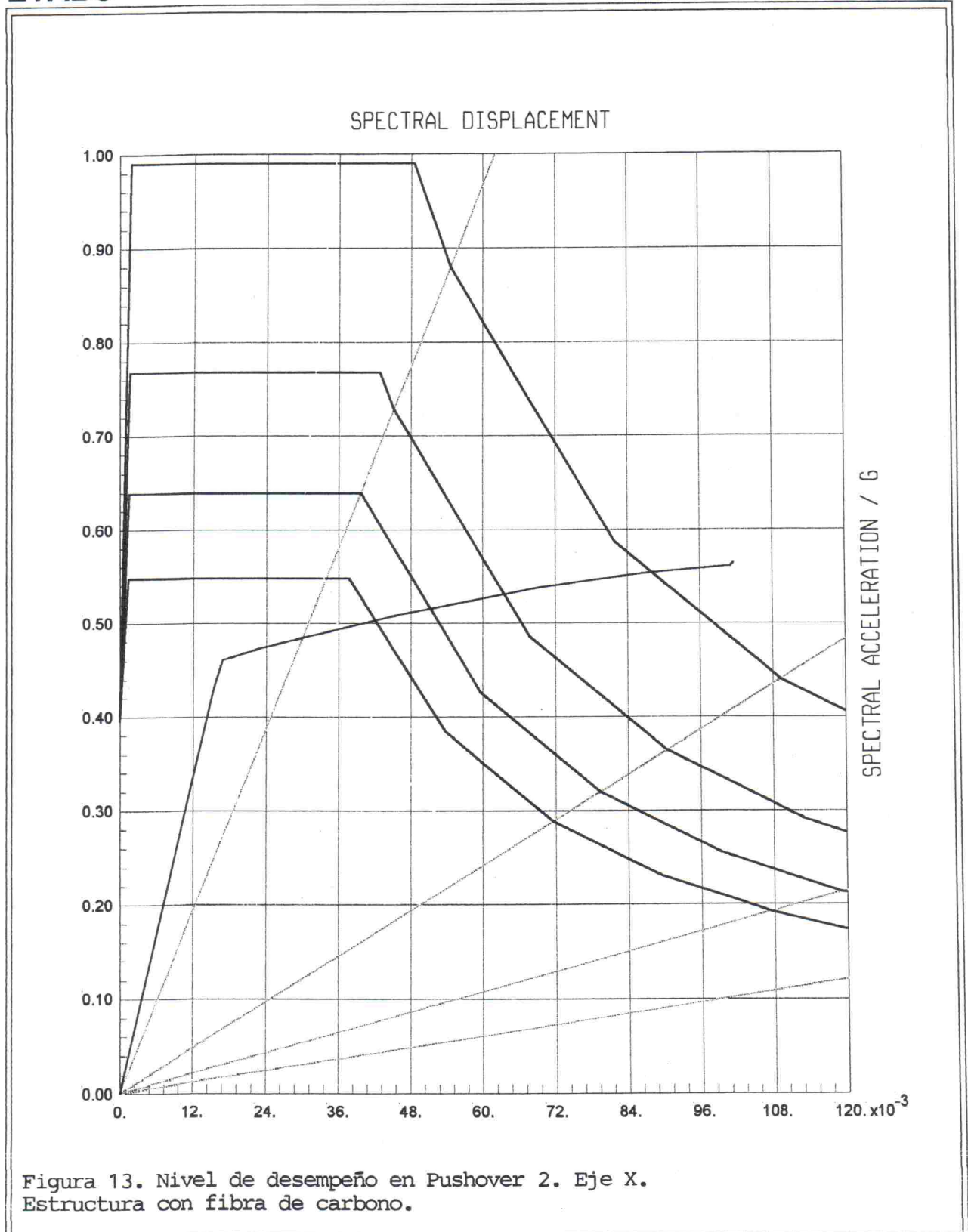
V. ANÁLISIS ESTRUCTURAL CON DIFERENTES TÉCNICAS DE REFUERZO

A) Fibra de Carbono

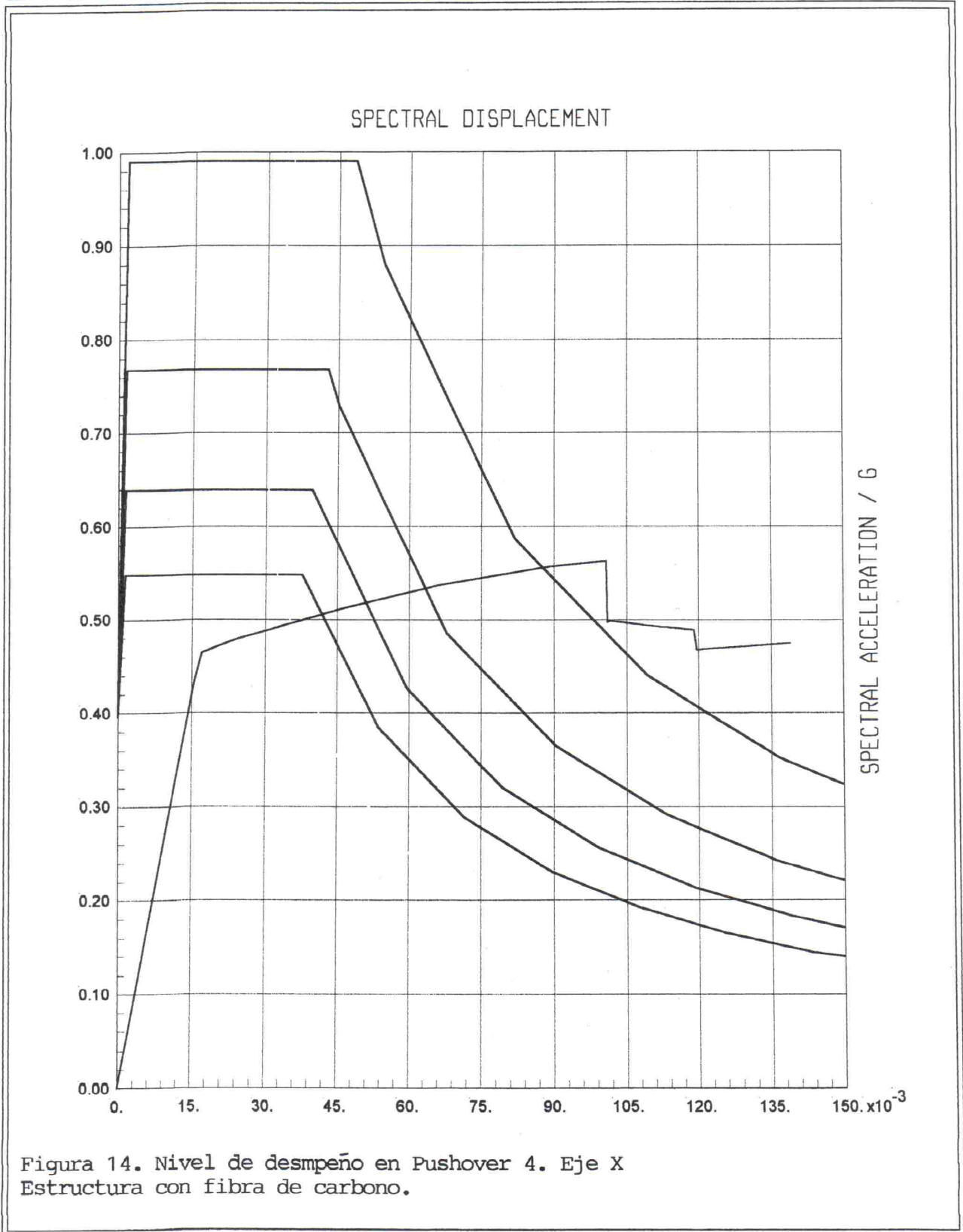
Luego de hacer el análisis original, nos pudimos dar cuenta, que se crearon muchas articulaciones en vigas y columnas. Lo más interesante fue que de primero se empezaron a crear articulaciones en las columnas del primer nivel, luego en vigas y columnas del segundo nivel. Podemos observar que en el Pushover 2 y Pushover 4 las deformaciones laterales llegan a un punto (E) lo cual es demasiada deformación lateral y todas las columnas del primero y segundo nivel llegan a un punto (C), lo cual también es una deformación plástica.

A continuación podemos observar las gráficas de los mismos Pushover, pero ya reforzados con fibra de carbono. En donde se articulan todas las vigas, pero con un punto (B) es decir una pequeña deformación, pero con la mayoría de la carga lateral. También se articularon las columnas, pero solamente del primer nivel con un punto (LS), el cual; es intermedio entre B y C pero esta en el rango elástico, y soportando la mayor carga lateral posible.

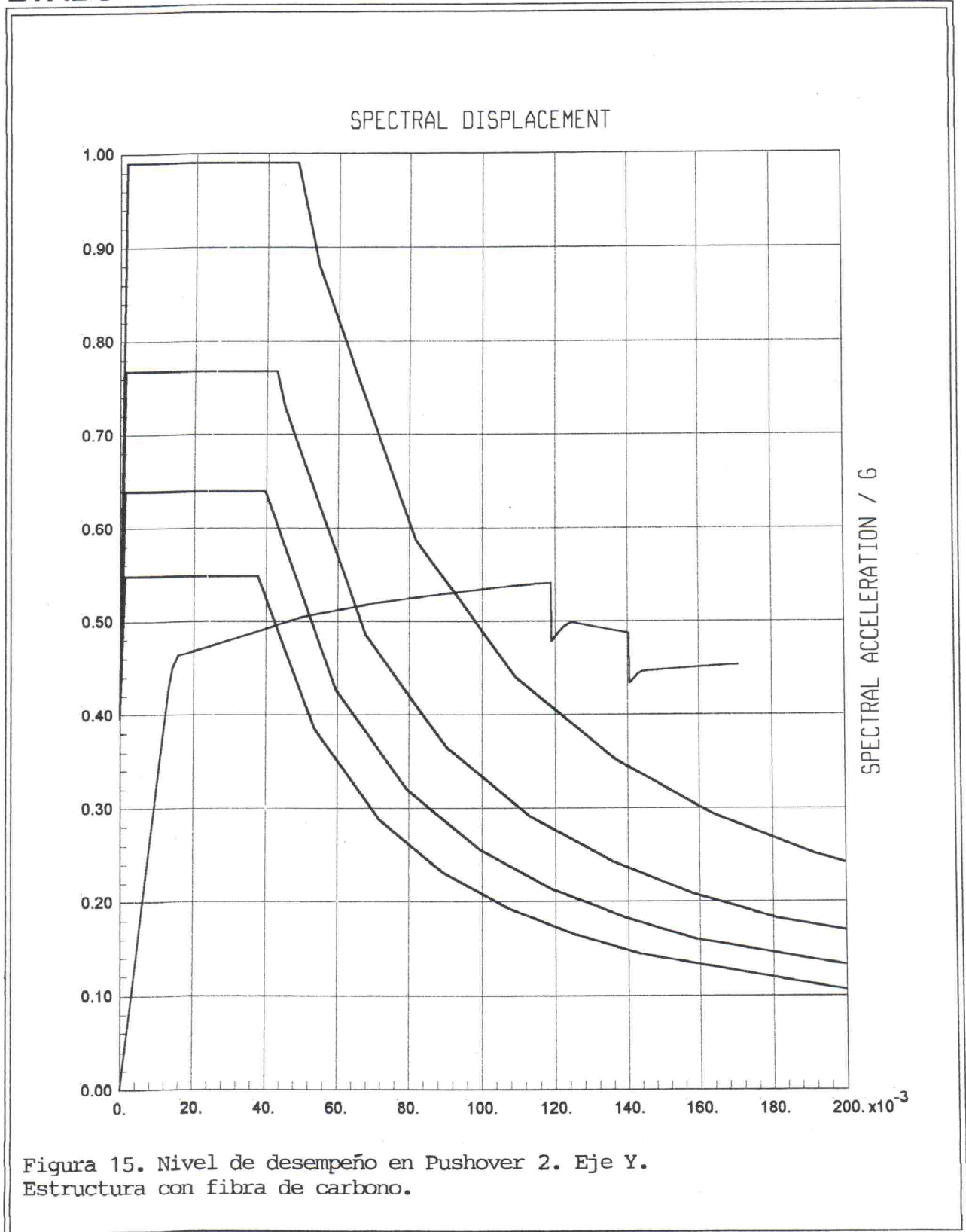
Nos podemos dar cuenta que después de reforzar la estructura, las deformaciones se dan como se esperaba, de primero que se articulen la mayoría de vigas y luego las columnas, pero que no pasen de una deformación lateral del punto (C), como había sucedido en el caso original.



ETABS v8.09 - File:x confinamiento completo - Kgf-m Units
Pushover Case PUSH2

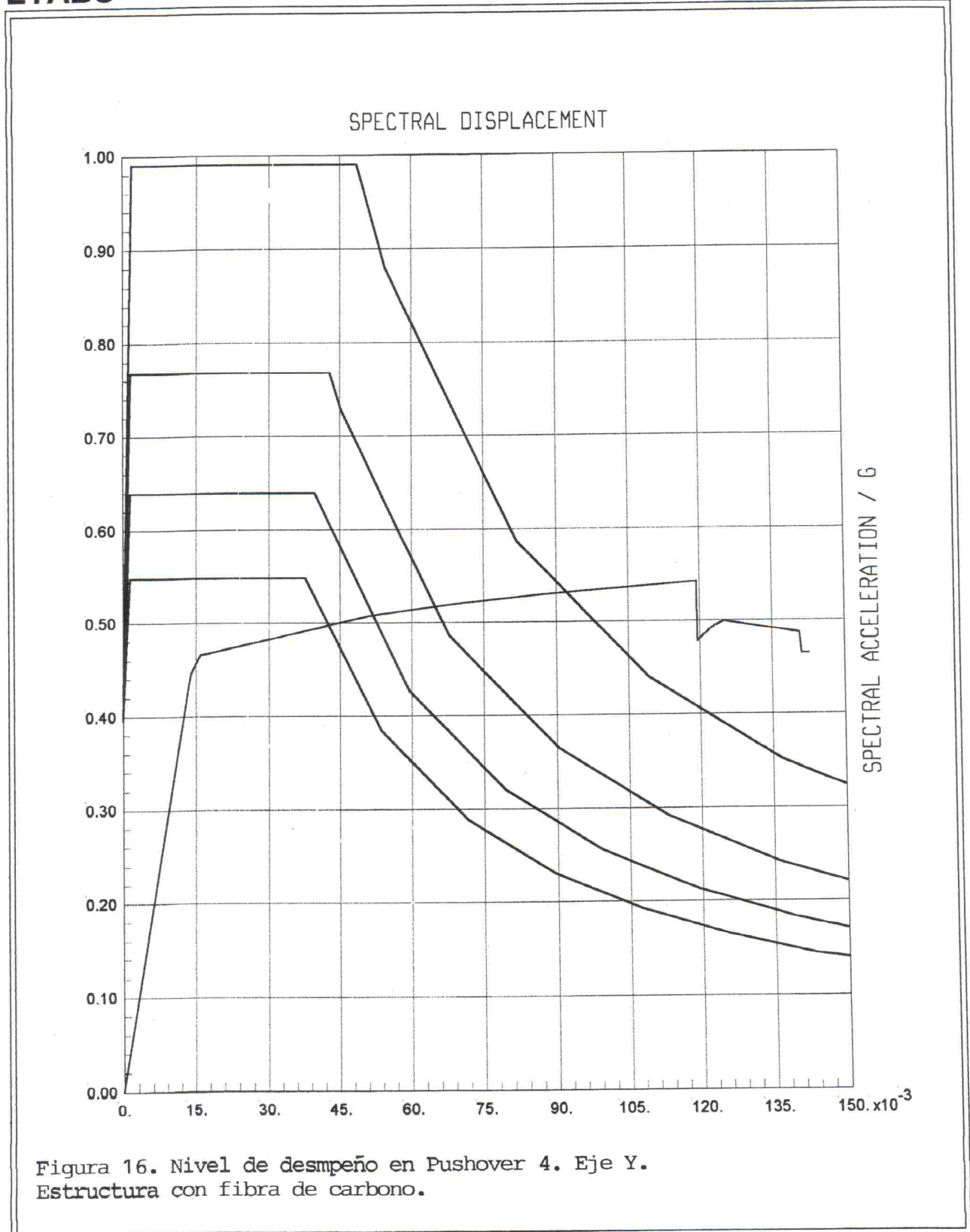


ETABS v8.09 - File:x confinamiento completo - Kgf-m Units
Pushover Case PUSH4



ETABS

Pushover Curve 10/7/03 9:42:42



ETABS v8.09 - File:y confinamiento completo - Kgf-m Units
Pushover Case PUSH4

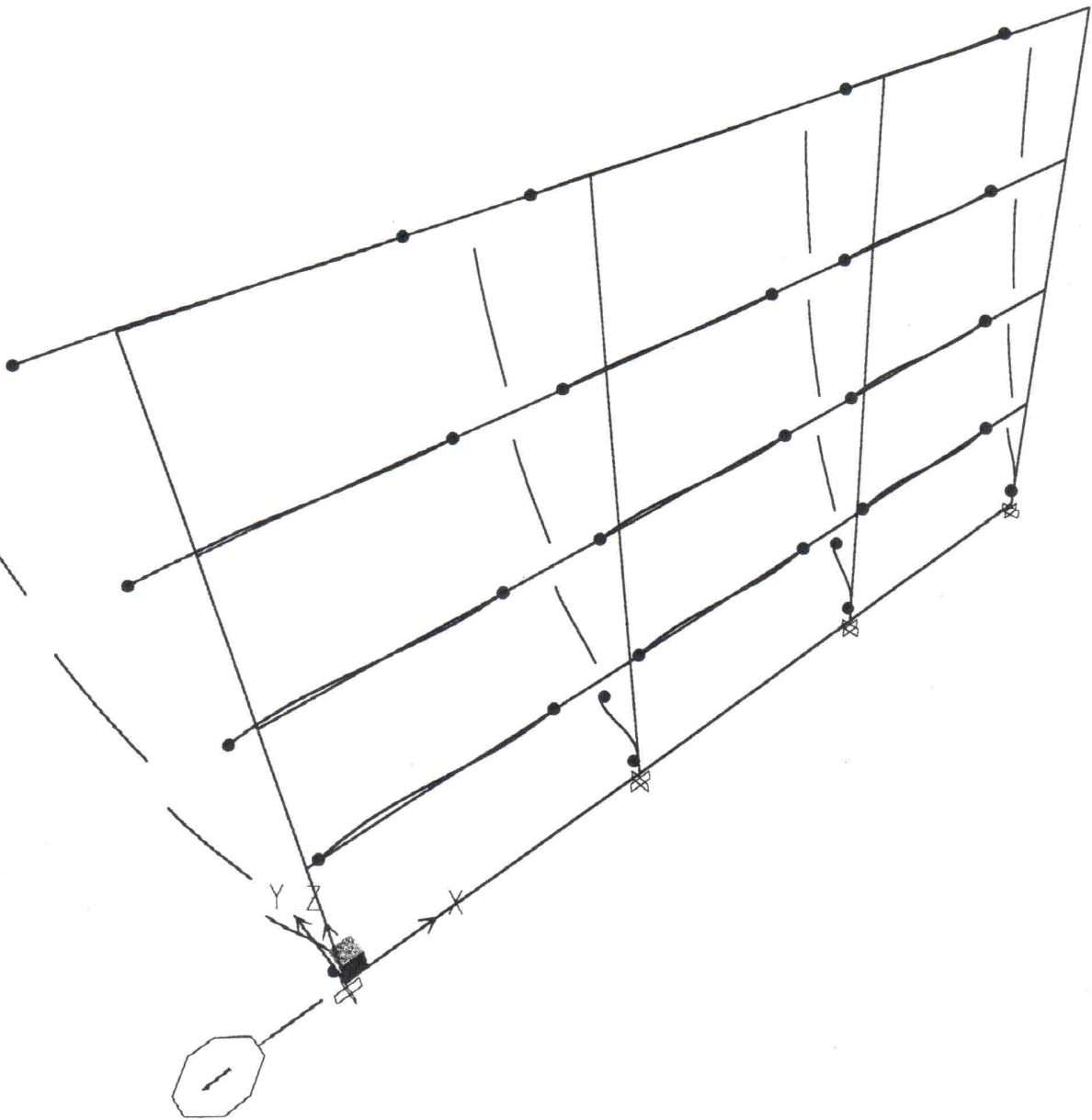


Figura 17. Estructura con fibra de carbono. Articulaciones creadas.
Eje Y. Pushover 2.

B IO LS CP C D E

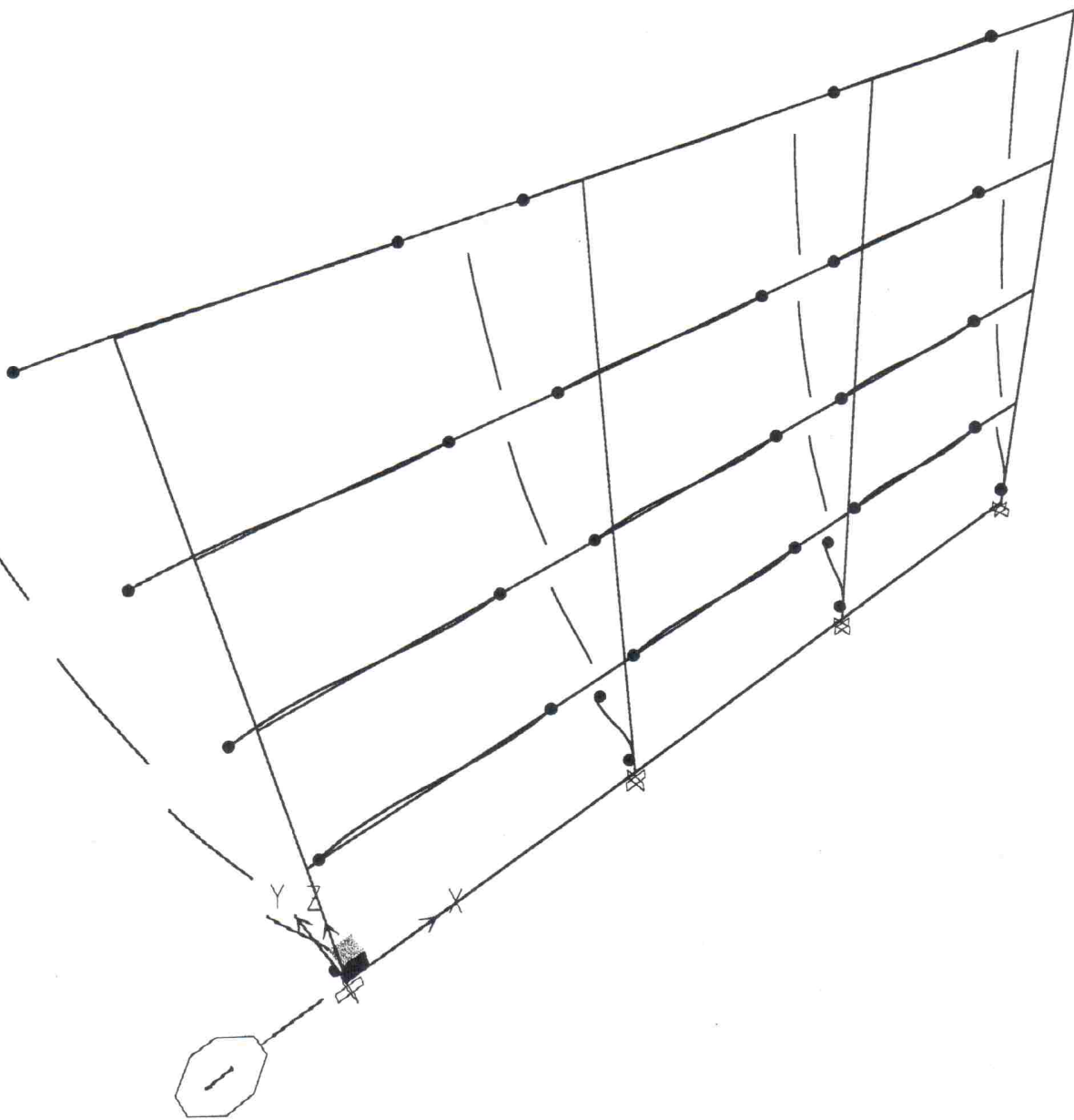


Figura 18. Estructura con fibra de carbono. Articulaciones creadas.
Eje Y. Pushover 4.

B IO LS CP C D E

1. Diseño de refuerzo con fibra de carbono. Se tomó muy en cuenta que tratar de utilizar sólo una vuelta de fibra de carbono, debido que Mbrace dice que la efectividad de adhesión de una vuelta es del 100% mientras que si se utilizaban 2 vueltas la efectividad de adhesión sería del 70%.

a. Vigas de 6 mts de longitud

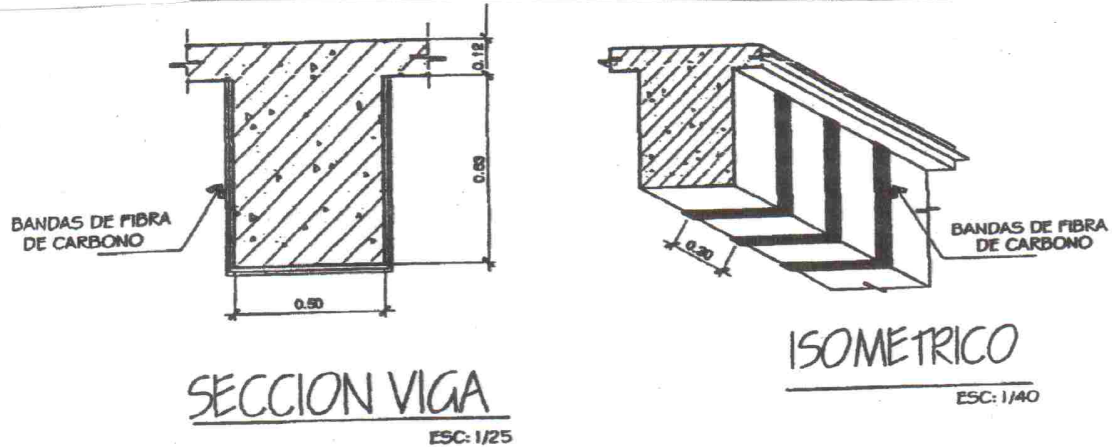


Figura 19. Diseño de refuerzo de vigas de 6 mts de longitud con fibra de carbono.

Cuadro 3
Características para vigas de 6 mts de longitud:

Numero de vueltas por viga	20
Espaciamiento	0.30 mts
Ancho de banda	0.0762 mts
Longitud por banda	1.70 mts
Cantidad de vigas	48
Costo por metro cuadrado terminado	Q 215.00(\$ 27.39)

$$0.762 \text{ mts} * 1.70 \text{ mts} * 20 \text{ vueltas} = 2.59 \text{ mts}^2$$

$$2.59 \text{ mts}^2 * 48 \text{ vigas} = 124.36 \text{ mts}^2$$

$$124.36 \text{ mts}^2 * (Q 215.00/\text{mts}^2) = Q 26,737.40 (\$ 3,406.04)$$

b. Vigas de 8mts de longitud

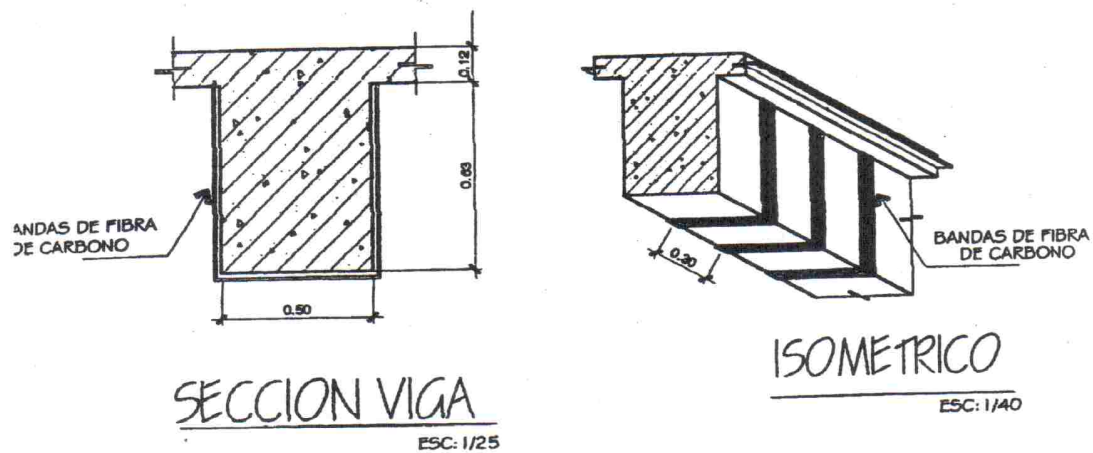


Figura 20. Diseño de refuerzo de vigas de 8 mts. de longitud con fibras de carbono.

Cuadro 4
Características para vigas de 8 mts de longitud:

Numero de vueltas por viga	26
Espaciamiento	0.30 mts
Ancho de banda	0.0762 mts
Longitud por banda	1.70 mts
Cantidad de vigas	48
Costo por metro cuadrado terminado	Q 215.00 (\$ 27.39)

$$0.762 \text{ mts} * 1.70 \text{ mts} * 26 \text{ vueltas} = 3.37 \text{ mts}^2$$

$$3.37 \text{ mts}^2 * 48 \text{ vigas} = 161.76 \text{ mts}^2$$

$$161.76 \text{ mts}^2 * (\text{Q } 215.00/\text{mt}^2) = \text{Q } 34,778.40 (\$ 4430.37)$$

c. Columnas

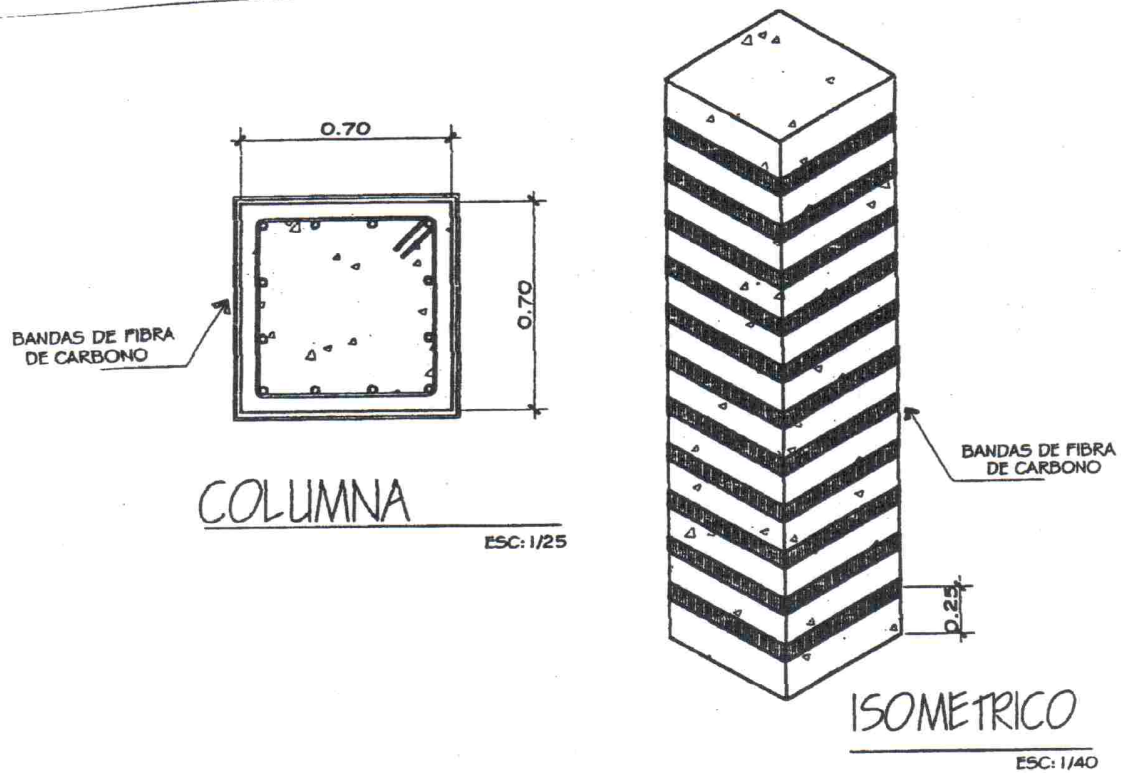


Figura 21. Diseño de refuerzo de columnas con fibras de carbono.

Cuadro 5
Características de fibra de carbono para las columnas:

Numero de vueltas por columna	12
Espaciamiento	0.25 mts
Ancho de banda	0.0762 mts
Longitud por banda	3.10 mts
Cantidad de columnas	64
Costo por metro cuadrado terminado	Q 215.00 (\$ 27.39)

$$0.762 \text{ mts} * 3.10 \text{ mts} * 12 \text{ vueltas} = 2.84 \text{ mts}^2$$

$$2.84 \text{ mts}^2 * 64 \text{ columnas} = 181.42 \text{ mts}^2$$

$$181.42 \text{ mts}^2 * (\text{Q } 215.00/\text{mt}^2) = \text{Q } 39,004.65 (\text{ \$ } 4,968.75)$$

B. Amortiguadores

Los amortiguadores utilizados son del tipo viscoso lineal, los cuales; incrementan el amortiguamiento y su fuerza es directamente proporcional a la velocidad. El valor del amortiguamiento efectivo de los amortiguadores utilizados es de $3,000.00 \text{ Kg} \cdot \text{seg/cm}$. Se desprecia su masa y por lo tanto su peso.

Se colocaron amortiguadores solamente en el primer nivel. Se puede observar en la figura 23 y 24 como el nivel de desempeño de la estructura aumento.

Es importante observar las figuras 25 y 26 donde se observa las articulaciones creadas en los elementos luego del análisis. Se articulan la mayoría de vigas del segundo al cuarto nivel y las columnas del segundo nivel.

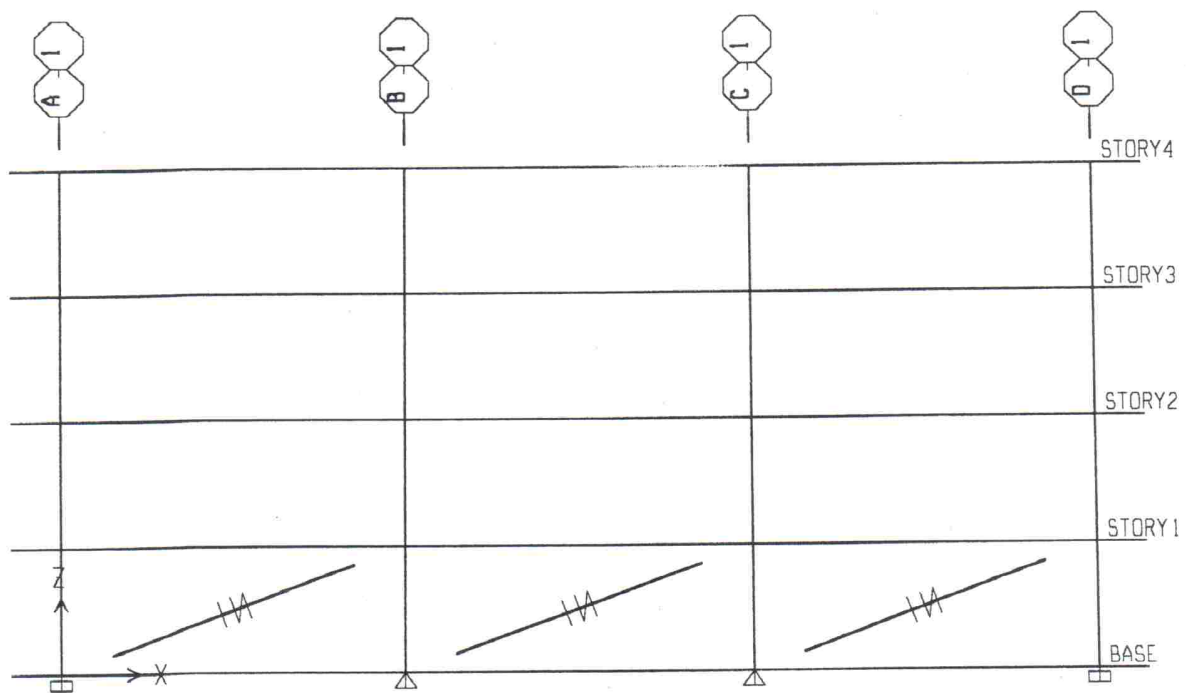
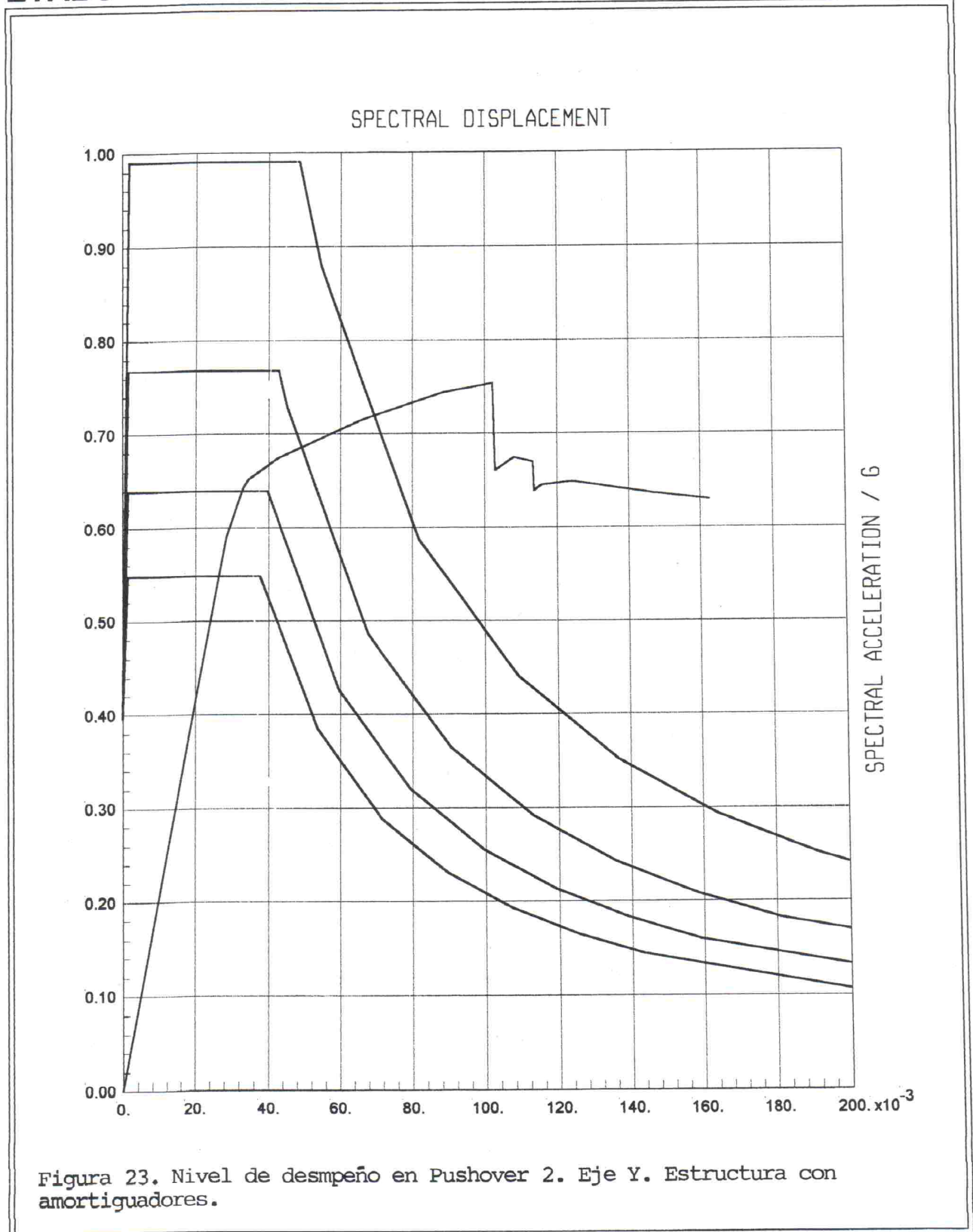
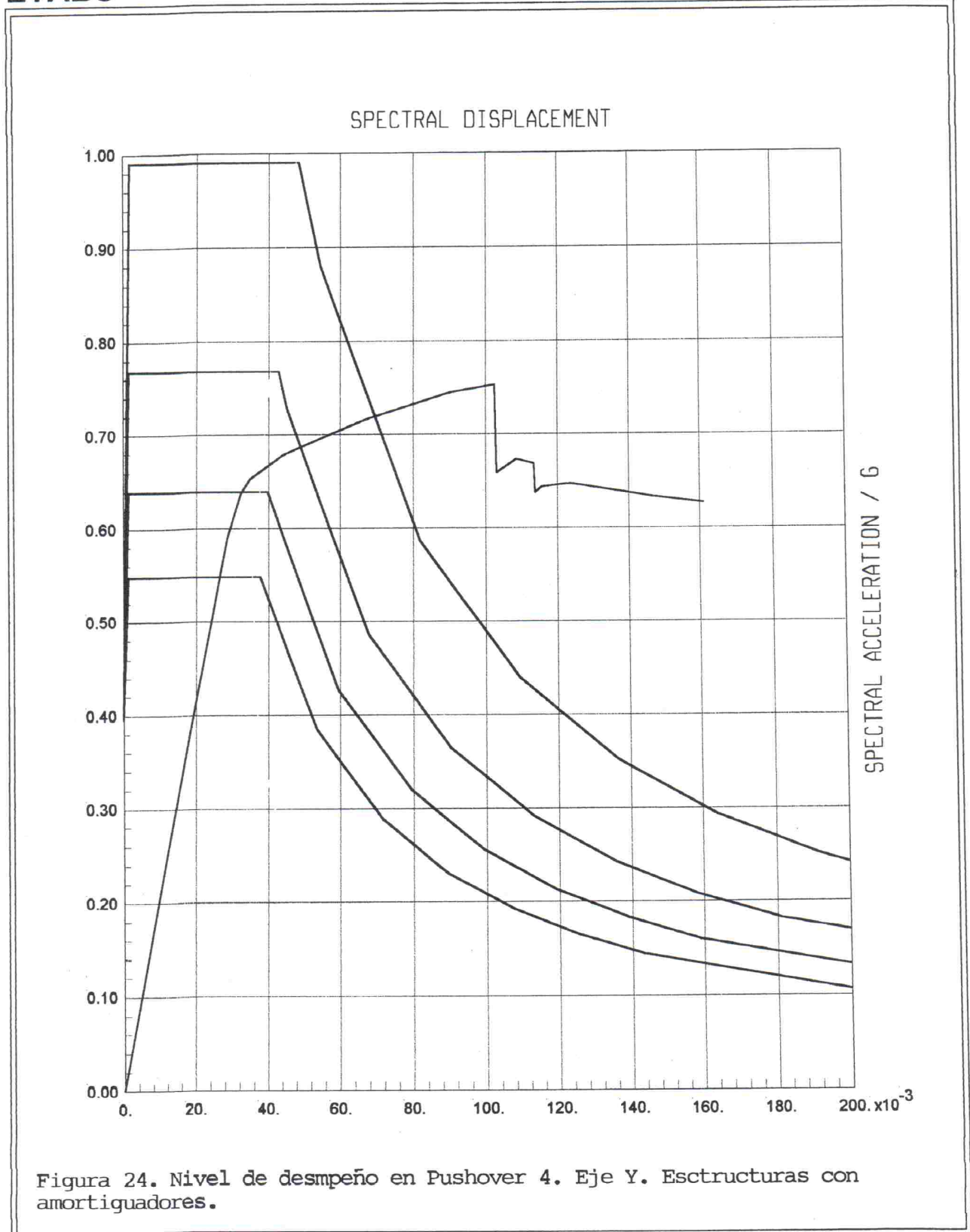


Figura 22. Elevación de edificio con amortiguadores.



ETABS v8.09 - File:y con amortiguadores - Kgf-m Units
Pushover Case PUSH2



ETABS v8.09 - File y con amortiguadores - Kgf-m Units
Pushover Case PUSH4

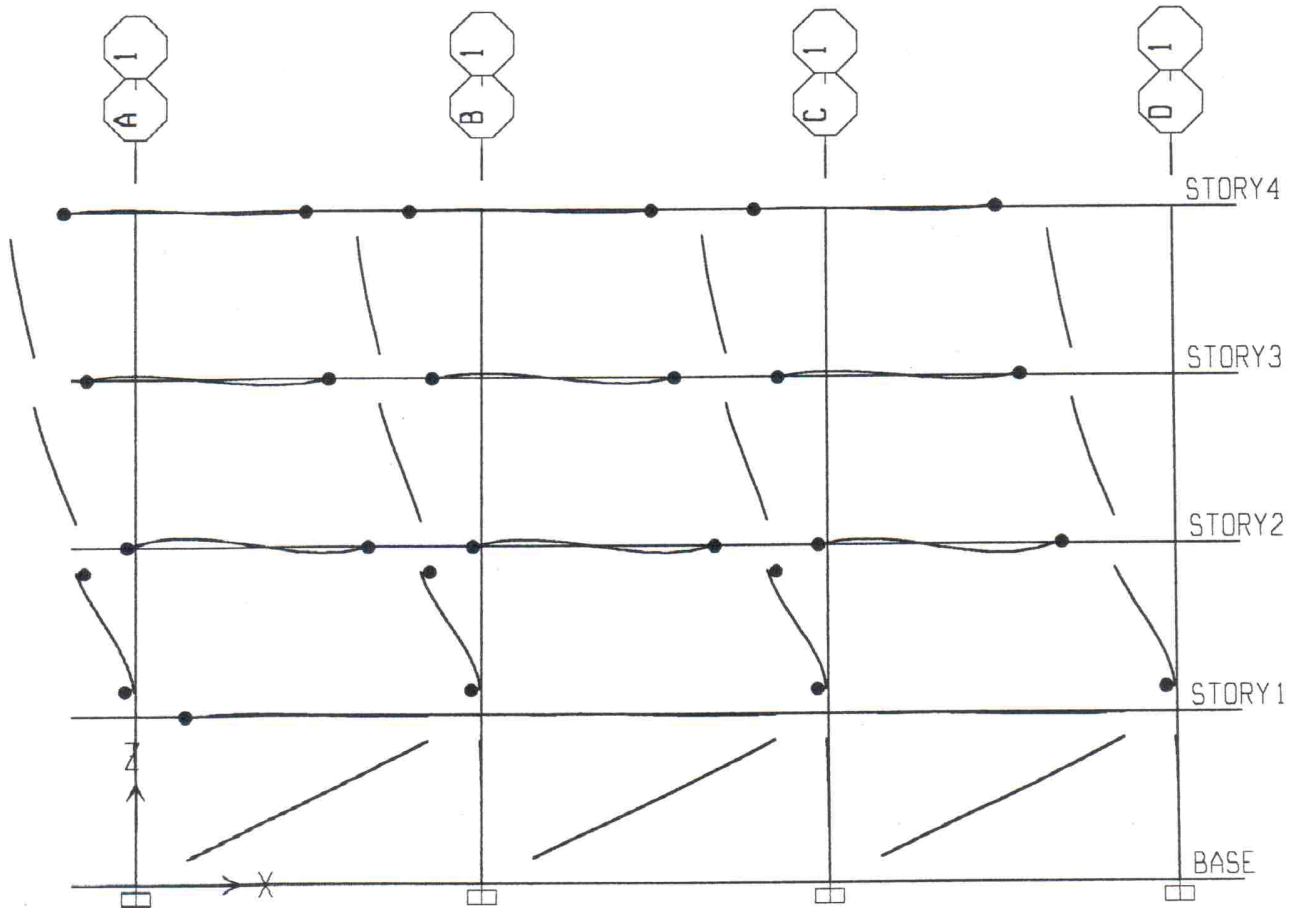


Figura 25. Estructura con amortiguadores. Articulaciones creadas.
Eje Y. Pushover 2.

B IO LS CP C D E

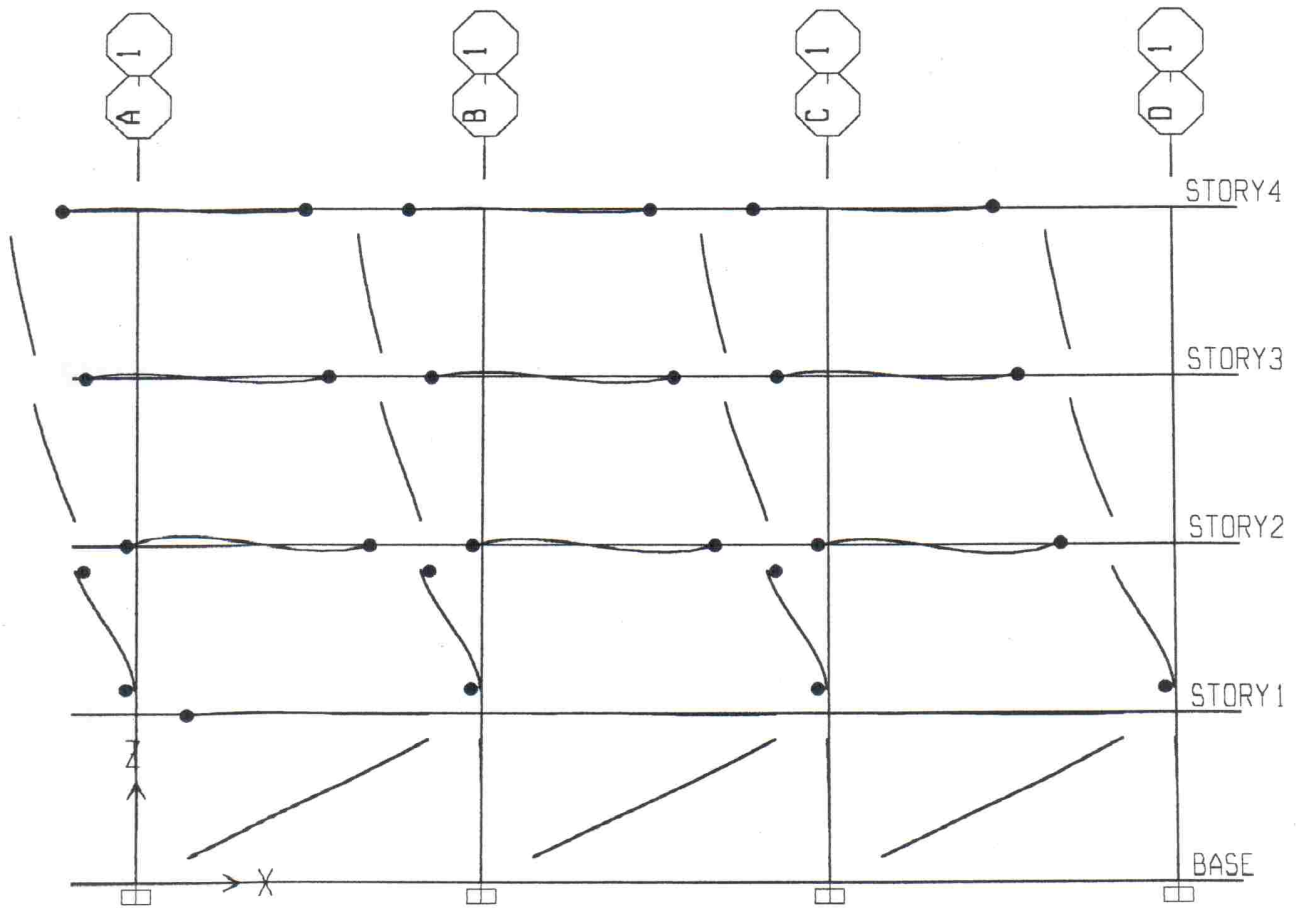
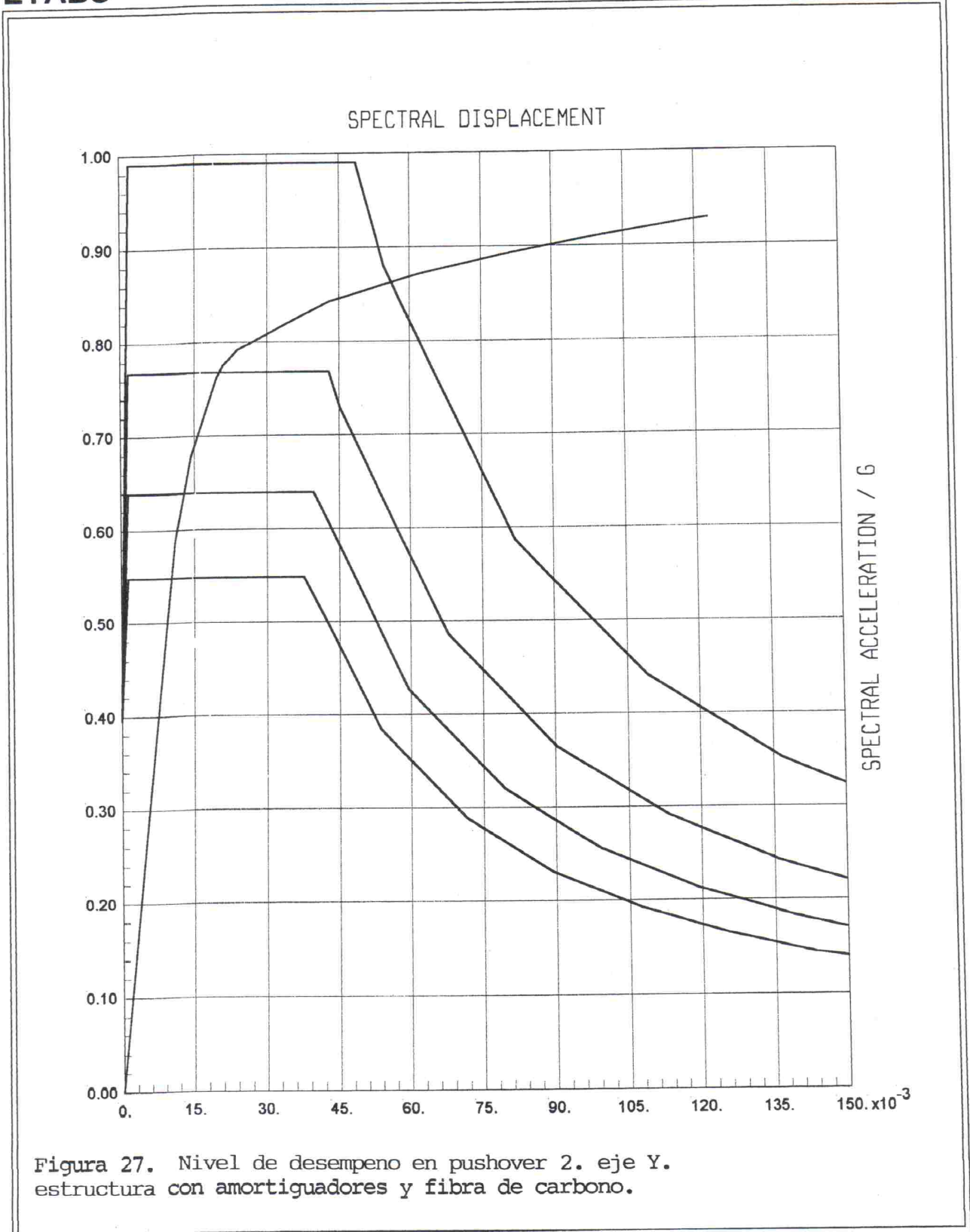
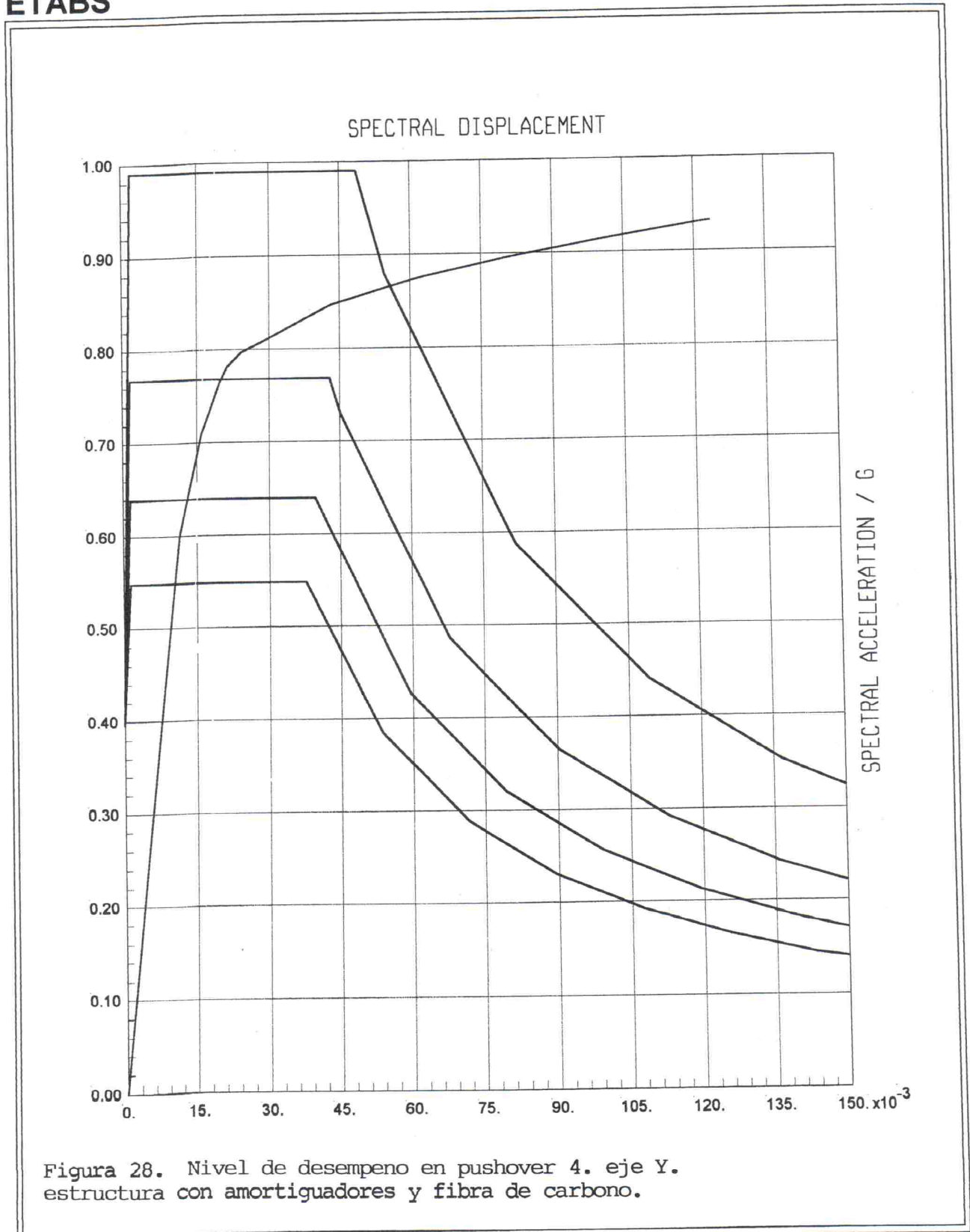


Figura 26. Estructura con amortiguadores. Articulaciones creadas.
Eje Y. Pushover 4.

B IO LS CP C D E





ETABS v8.09 - File:y (confinamiento y amortiguadores) - Kgf-m Units
Pushover Case PUSH4

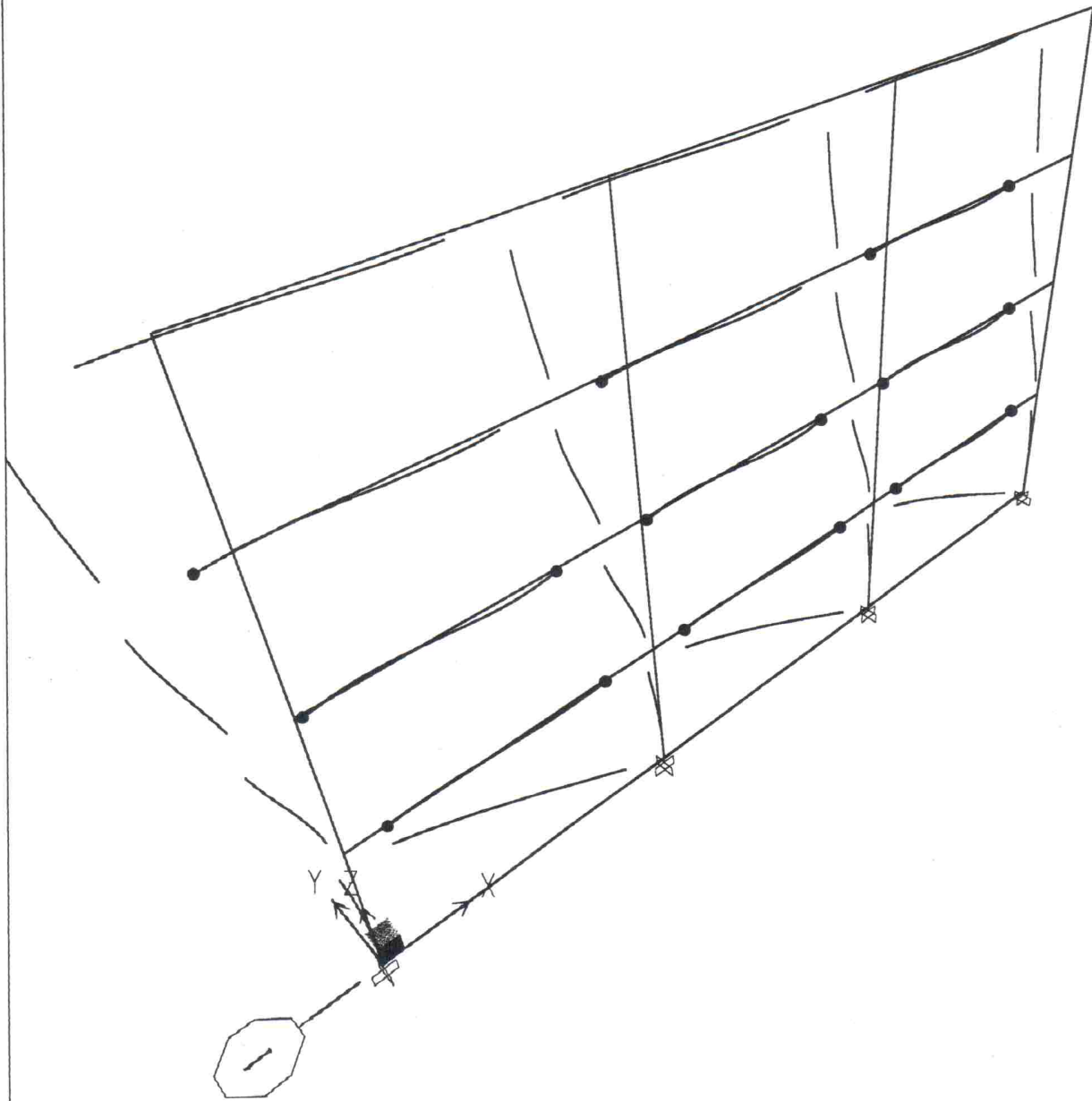


Figura 29. Estructura con amortiguadores y fibra de carbono. articulaciones creadas. eje Y. pushover 2.

B IO LS CP C D E

VI. COSTOS DE FIBRA DE CARBONO PARA REFORZAR ESTRUCTURA

64 COLUMNAS	→	Q 39,004.65 (\$4,968.75)
48 VIGAS (6 mts)	→	Q 26,737.40 (\$ 3,406.04)
48 VIGAS (8 mts)	→	Q 34,778.40 (\$4,430.37)
		Q 100,520.45 (\$12,805.16)

Área total de la estructura = 1728 mts²

Precio / Área = Q 100,520.45 / 1728 mts² = Q 58.17/ mt² (\$ 7.41/ mt²)

El Costo de reforzamiento de la estructura es relativamente bajo al costo de construcción, como podemos observar por metro cuadrado el reforzamiento es de Q58.17, mientras que la construcción puede estar más o menos en Q3000.00 por metro cuadrado, es decir; para el beneficio y la seguridad que se va obtener el costo de reforzamiento es del 2 % en relación al costo de construcción.

El costo de los amortiguadores, depende del fabricante, en Taylor devices (Estados Unidos), unos amortiguadores como los utilizados están en el rango de \$5,000 a \$10,000.

VII. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Se pudo dar cuenta de la importancia que es el uso de fibra de carbono para el refuerzo de estructuras ya existentes, debido a que por medio de las fibras se aumento el nivel de desempeño de la estructura.

Para analizar el refuerzo por fibras de carbono se utilizó una equivalencia de las fibras de carbono a acero las cuales fueron proporcionadas por SIKA Guatemala.

Luego por medio del programa ETABS se analizó la estructura en donde el confinamiento de toda la estructura estaba mayor de $d/2$, se colocaron todas las cargas correspondientes y se agregó sismo por medio de un espectro de AGIES. Luego de correr el programa de análisis, se utilizó el método de Pushover por medio del cual se iba agregando carga lateral a la estructura.

El primer pushover se hizo solamente con carga muerta, luego en el Segundo se utilizó carga muerta y aceleración horizontal, es aquí donde podemos apreciar cómo se van articulando las vigas y columnas cada vez más, conforme el pushover va avanzando.

Luego el tercer pushover fue con carga muerta y carga viva, y éste nos sirvió para realizar el cuarto pushover que fue viva más muerta y aceleración horizontal y donde podemos observar cuáles eran los miembros que se articulaban primero de la estructura, que era lo de queríamos reforzar primordialmente.

Después de hacer este análisis completo, y observar que la mayoría de miembros se articulaban, se utilizó la mejor solución para reforzar la estructura, pero sin agregar miembros estructurales, muros de carga, o agrandar la sección de los miembros existentes. Luego de una larga búsqueda se encontró el siguiente material: fibra de carbono, el cual tiene infinidad de usos.

La utilización que se le dará a la fibra de carbono en la estructura, es de confinamiento. Para lograr este confinamiento en el programa ETABS, se tuvo que hacer una equivalencia de la fibra de carbono a acero. Estos datos fueron proporcionados SIKA Guatemala.

Luego de saber, que una banda de fibra de carbono representa:

- Aumento de capacidad debido a algún cambio en el uso.
- Confinamiento pasivo para aumentar la resistencia sísmica.
- Control y cosido de fisuras.
- Reforzamiento alrededor de las nuevas aberturas en las placas.

Se colocó fibra de carbono en columnas y vigas, a una distancia menor a $d/2$, logrando así un mejor confinamiento en toda la estructura.

Para verificar, se reanalizó la estructura pero ya con los nuevos cambios. Se logró que la estructura aumentara un nivel de desempeño mejor que el original.

La estructura final reforzada con fibra de carbono, es una estructura que soportara mayor aceleración, pero al mismo tiempo se hará una estructura más rígida y por consecuencia el desplazamiento que puede tener después de aplicarle los pushover será menor.

Con el refuerzo de fibra de carbono que se colocó en las columnas a un espaciamiento de 25 cm y una longitud de 3.10 metros se logro darle un excelente confinamiento a las mismas, debido a que la equivalencia del ancho de fibra de carbono colocada es a un hierro de 3/8 grado 60.

Las vigas se les colocó también un refuerzo de fibra de carbono de un acho de 7.62 cm lo cual es equivalente a un hierro de 3/8 grado 60 y este se colocó a un espaciamiento de 30 cm entre banda y banda.

El costo de mano de obra, materiales de construcción, es decir; aplicación de resina y fibra de carbono, fue dada por personal de SIKA Guatemala y es de Q 215.00 por metro cuadrado terminado.

Luego de calcular todo el material necesario para el refuerzo de toda la estructura, el cual consistió en reforzar 64 columnas de 3 metros de altura con una sección de 70 cm por 70 cm, 48 vigas de 6 metros con una base de 50cm y un peralte de 75 cm y 48 vigas de 8 metros con una base de 50cm y un peralte de 75 cm. Nos pudimos dar cuenta que era necesario 467.54 metros cuadrados de fibra de carbono, lo cual tiene un costo de Q100,520.45.

El costo de reforzar toda la estructura a primera vista se observa un poco alto, pero si nos damos cuenta que el edificio tiene un área total de 1728 metros cuadrados de construcción. El costo de reforzamiento por metro cuadrado del edificio será de Q 58.17, lo cual es bastante barato con el fin de tener un edificio con mucho menor vulnerabilidad.

Para hacer una relación más clara, si el costo de la construcción del edificio fue de Q3000.00 por metro cuadro terminado. El reforzamiento de toda la estructura seria de

1.94% del costo total de construcción, es bastante barato para los beneficios que se va a obtener.

Independientemente de volverse una estructura mayor confinada, se volverá más resistente a cortante, a carga axial, un poco más rígida y soportara mayor aceleración.

Luego se hizo el análisis con amortiguadores en el mismo programa ETABS. Se tomó como base la estructura original. Se colocaron amortiguadores solamente en el primer nivel, los cuales son de tipo viscoso lineal, los cuales incrementan el amortiguamiento y su fuerza es directamente proporcional a la velocidad. El valor del amortiguamiento efectivo de los amortiguadores utilizados es de 3,000.00 Kg * seg/cm. Se despreció su masa y por lo tanto su peso.

Con los amortiguadores, se logró un nivel de desempeño mucho mejor que con fibra de carbono, pero es interesante observar que al hacer el análisis de pushover con los amortiguadores los miembros del primer nivel no sufren ninguna articulación, mientras que los primeros en articularse son las columnas del segundo nivel y las vigas del segundo al cuarto nivel.

La utilización de amortiguadores es de gran utilidad en la reducción de vulnerabilidad en edificios de concreto debido a que soportan mayor aceleración que la fibra de carbono.

VIII. CONCLUSIONES

1. La fibra de carbono ayuda al confinamiento de la estructura, y por ende aumenta el nivel de desempeño de la misma.
2. Los amortiguadores son una excelente solución para aumentar el nivel de desempeño de la estructura. Pero se articulan las columnas del nivel superior de donde se colocaron los amortiguadores.
3. El costo de reforzar una estructura con fibra de carbono con relación al costo de construcción de la edificación no es significativo.
4. Los programas estructurales son herramientas sumamente útiles en el análisis estructural. Pero, sin los conocimientos necesarios acerca de la equivalencia de fibra de carbono a acero y la utilización de amortiguadores el reforzamiento de esta estructura no hubiera podido ser realizada.
5. La combinación de fibra de carbono y amortiguadores es una excelente opción al refuerzo de estructuras existentes, en donde no se quiere agregar elementos estructurales, muros de carga, ni agrandar secciones de columnas y vigas.

IX. RECOMENDACIONES

1. Al utilizar cualquier tipo de reforzamiento es importante analizar la estructura original y determinar que es lo necesario reforzar, es decir; si es confinamiento, corte, etc. Con los resultados obtenidos podemos escoger el material a utilizar.
2. Con el programa ETABS, debería existir una forma más sencilla de introducir la distribución de estribos en los miembros estructurales.
3. Si se quiere aumentar el desempeño de una estructura se recomienda utilizar amortiguadores, debido a que es una forma sencilla de lograr el objetivo, siempre y cuando se coloquen los amortiguadores necesarios y en el lugar indicado de la estructura.

X. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Argueta C., Luis Alberto. 2004. *Interacción suelo Estructura: Un Método Refinado*. Tesis de Maestría Universidad del Valle de Guatemala. 64 pags.
2. Beaudoin, Y., Labossiere, P. and Neale, K.W., 1998. *Wet-Dry Action on the Bond Between Composite Materials and Reinforced Concrete Beams*. Durability of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction, Universite de Sherbrooke, pp.537-546, 1998.
3. Castillo., Juan Carlos. 2003. *Analisis no lineal estatico de edificios de concreto por medio del método de capacidad espectral*. Tesis de Maestría Universidad del Valle de Guatemala. 191 págs.
4. Fernandez., Alfredo. 2002. *Amortiguadores Viscosos. Un sistema Pasivo De Disipación de Energia Sismica*. Tesis de Maestría Universidad del Valle de Guatemala. 134 págs.
5. Karbhari, M.B. and Howie, I., 1997. *Effect of Composite Wrap Architecture on Strengthening of Concrete Due to Confinement: II-Strain and Damage Effects*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 16, No. II, 1997.
6. Leming, M.B. and Peshkam. L.G., 1995. *Proceedings of the Sixth International Conference, Structural Faults and Repairs*. pp. 161-162.
7. Mack, J.K., and Holt, E.E., 1999. *The Effect of Vapor Barrier Encapsulation of Concrete By FRP Composite Strengthening Systems*. 44 th International SAMPE Symposium and Exhibition, Long Beach, CA.
8. Mays, G.C., 1993. *Bridge Management Conference*. pp. 2, 1993.
9. *Normas Estructurales de Diseño y Construcción Recomendadas para la República de Guatemala*. 1996. Asociación Guatemalteca de Ingeniería Estructural y Sísmica (AGIES). Guatemala.
10. Rahman. A.H. Kingsley and Crimi, J., 1996. *Proceedings of the Second International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*. Montreal, Canada, pp. 681, 1996.
11. *Sistema Compuesto de Refuerzo MBrace*. Guia de diseño estructural. Segunda edición. Master Builders Technologies. Cleveland, OH. 1998.

12. Soudki, Khaled A. And Green, M.F. 1997. *Freeze-Thaw Response of CFRP Wrapped Concrete*. *Concrete International*, Vol. 19, pp. 64-72, August 1997.
13. Technical Research Centre of Finland, 1998. *Effect of Bubbles in Sealing on Bridge Decks*. Research Report No. 43, Espoo, Finland, 1998.(in Finnish).
14. Toutanji, H. and P. Balaguru, 1998. *Durability Characteristics of Concrete Columns Wrapped with FRP Tow Sheets*. *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 52-62, February 1998.
15. Toutanji, H.A. and Gomez, W., 1997. *Durability Characteristics of Concrete Beams Externally Bonded with FRP Composite Strengthening System Composite Sheets*. *Cement & Concrete Composites*. Vol. 19, August 1997.
16. Yagi, K., Tanaka, T., Sakai, H., and Otaguro, H., 1997. *Durability of Carbon Fiber Sheet for Repair and Retrofitting*. *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Proceedings of the Third International Symposium, Vol.2, Sapporo, Japan, October, 1997.