

***FILOSOFIA DE DISEÑO SISMO-RESISTENTE DE
ESTRUCTURAS EN GUATEMALA
APLICACION DE LA PROPUESTA DEL REGLAMENTO
DE DISEÑO SISMO-RESISTENTE DE ESTRUCTURAS
PARA GUATEMALA , PUBLICADA EN 1992.***

Ing. Alfredo Arce Valenzuela

RESUMEN

Guatemala y sus regiones adyacentes de centroamerica, poseen un marco sismo-tectonico complejo Considerando el crecimiento significativo de la infraestructura en este pais, implica la existencia y el incremento de un alto riesgo sismico. En esta region diferentes tipos de terremotos destructivos ocurren, por lo que es necesario establecer un criterio de diseño para que las edificaciones tengan un comportamiento adecuado al experimentar este fenomeno , a traves de un Reglamento de Diseño Sismo-Resistente de Estructuras

Un ejemplo de diseño de un edificio de 10 niveles siguiendo la Propuesta de Diseño Sismico para Guatemala se desarrolla en este articulo, (Referencia 1), dandole énfasis al metodo para estimar la carga de diseño sismica, considerando la amenaza sismica existente en la region

Los cortes sismicos en la base del edificio son calculados por los procedimientos de la fuerza lateral equivalente y por el analisis modal, aplicando teoria de analisis dinamico. (Referencia 2), (figuras 4 y 5)

INTRODUCCION

Aqui se presenta un ejemplo de diseño de un edificio de 10 niveles siguiendo los criterios establecidos en los siguientes documentos

1. Propuesta de Reglamento de Diseño Sismo-Resistente de Estructuras para Guatemala, presentado en el 8o. Seminario Internacional de Sismologia e Ingenieria de

Terremotos en Tsukuba, Japon y publicado en 1992 (Referencia 1), para determinar la carga sismica de diseño.

2. UBC-1988 (Uniform Building Code) para determinar las cargas de diseño verticales.
3. ACI (American Concrete Institute) y el Reglamento Sismico de Nueva Zelanda para el diseño de concreto reforzado.

Geometria de la Estructura:

En las figuras 1 y 2, se muestra un dibujo esquemático en planta y elevación del sistema estructural. Visto en planta el edificio tiene 20.50 x 24.10 m, centro a centro de las columnas exteriores y alcanza una altura de 28.35 m sobre el nivel de la calle. Todos los niveles tienen una altura de 3.15 m excepto el sótano que tiene una altura de 3.65 m.

ESPECIFICACIONES DE CARGA VERTICAL Y MATERIALES

2.1 Cargas de diseño (cargas uniformes)

- Tabicaciones 250 Kg/m² (mampostería reforzada)
- Entrepisos 1100 Kg/m²
- Carga viva 200 Kg/m²

2.2 Materiales

- Concreto $f_c = 210 \text{ Kg/cm}^2$ (3000 psi)
- Acero de refuerzo $f_y = 4220 \text{ Kg/cm}^2$ (60000 psi)

2.3 Dimensiones de elementos estructurales

Debido a que un edificio de varios niveles es una estructura indeterminada, las dimensiones de los elementos no pueden ser calculadas directamente basándose en esfuerzos permisibles. Para determinar las dimensiones de los elementos, fue necesario

analizar el edificio para momentos flexionantes, cortantes y cargas axiales y luego comparar los esfuerzos inducidos con los esfuerzos permisibles.

Las dimensiones de los elementos estructurales al final del analisis son las siguientes:

- **Vigas** 0.30 x 0.65 m en direccion norte -sur
 0.30 x 0.70 m en direccion este-oeste
- **Columnas** 0.70 x 0.70 m en seccion cuadrada
 0.90 m de diametro en seccion circular
- **Muros de corte** Las secciones transversales se indican en la planta tipica con
 espesores de 0.20 - 0.25 m y elementos de borde de 0.70 x 0.70 m

PLANTEAMIENTO DE DISEÑO DUCTIL

3.1 Conceptos estructurales y detalles de refuerzo

En este diseño de marcos ductiles con características para resistir sismos severos se le dio énfasis a los conceptos estructurales y detalles de refuerzo (Figuras 6 y 7).

Consideraciones especiales:

1. A la relacion necesaria de resistencia a la flexion de las columnas con respecto a la resistencia a flexion de las vigas, necesarias para reducir la posibilidad de ocurrencia de articulaciones plasticas simultaneamente en la parte superior e inferior de las columnas
2. A la relacion necesaria de resistencia al cortante respecto a la resistencia a la flexion para evitar fallas por corte en vigas y columnas al momento de ocurrir deformaciones inelasticas considerables
3. A la colocacion del refuerzo en vigas y columnas para proporcionarles una resistencia a la flexion adecuada y ductilidad.
4. A la colocacion del refuerzo en vigas, columnas y juntas viga-columna para proporcionar una resistencia al cortante adecuada y anclaje.

5. Los marcos del edificio fueron diseñados para que tuvieran un comportamiento ductil siguiendo los criterios establecidos en el Metodo de Diseño por Capacidad.
6. Es importante mencionar que el metodo de diseño por esfuerzos de trabajo no fue aplicado porque es bien reconocido que una estimacion apropiada de resistencia y ductilidad de la estructura no puede ser realizada usando este metodo.

Se requiere que un metodo de resistencia ultima sea aplicado para el diseño sismico.

CONFIGURACION ESTRUCTURAL

Los elementos verticales destinados a resistir la carga sismica fueron ubicados simetricamente alrededor del centro de masa del edificio (figura 1)

- a) Para minimizar la respuesta torsional de la estructura durante un sismo.
- b) Debido a que el comportamiento de una estructura asimetrica es dificil de predecir, aun trabajando con modelos muy elaborados por computadora

La no participacion de elementos no estructurales en la respuesta de la estructura fue tomada en cuenta para evitar resultados inesperados y efectos torsionales indeseables.

4.1 Estrategia en la localizacion de Muros Estructurales

La desicion de como orientar y localizar los muros estructurales dentro del edificio, fue gobernada por requerimientos funcionales y estructurales. En este caso los muros contribuiran a resistir los momentos de volteo, fuerzas cortantes y torsionales en cada nivel

En este caso especifico , la mayoria de los muros estan ubicados en la periferia para lograr mejor resistencia torsional

La seccion transversal del muro ubicado en la interseccion de los ejes 1-C obedece a las dimensiones del elevador (requerimiento funcional) y la forma de los muros ubicados en la interseccion de los ejes 3-C y 4-C obedece a tratar de mantener el centro de rigidez C.R.

tan cerca como sea posible al centro de masa C.M para evitar que la fuerza inercial horizontal actue con una determinada excentricidad. (requerimiento estructural)

Tambien fueron diseñados elementos de borde para permitir que las vigas que concurren en estos extremos del muro, esten efectivamente ancladas, y para acomodar el refuerzo a flexion principal, tambien para proveer estabilidad lateral evitando asi un posible pandeo al tratarse de una pared delgada y para proporcionar un confinamiento efectivo en el concreto a compresion en una zona de alto potencial de ocurrencia de articulaciones plasticas.

METODO DE DISEÑO

5.1 Nivel de Proteccion Sismica Requerida para el Edificio

La severidad del movimiento del suelo representada por el coeficiente A_0 (se utilizara para definir los diferentes sismos de diseño), dependiendo de la localizacion geografica de la estructura (figura 3A) y el Indice de Sismicidad relacionado, estan especificados por la zonificacion sismica. El Indice de sismicidad tiene valores de 1 a 4, el Indice 4 esta asociado con el sismo mas severo

$$A_0 = 0.30 \quad \text{Indice de Sismicidad} = 4$$

El edificio es asignado a uno de los tres Grupos de Exposicion a la Amenaza Sismica, I, II, o III, dependiendo del tipo de uso del edificio Grupo III requiere el nivel mas alto de proteccion

Exposicion de Amenaza Sismica = Grupo II

(Edificio de Apartamentos que tiene mas de 4 niveles)

El edificio es asignado a una de las cuatro Categorías de Protección Sísmica A, B, C, o D, basándose en la combinación del Índice de Sísmicidad y el Grupo de Exposición a la Amenaza Sísmica. Categoría D requiere el más alto nivel de Protección Sísmica

Categoría de Protección Sísmica = C

5.2 Requerimientos Estructurales Generales

(Bases de Diseño)

- Fuerzas de diseño serán determinadas aplicando los procedimientos mencionados en La Propuesta de Diseño Sísmico para Guatemala.
- Las fuerzas internas son determinadas usando un modelo linealmente elástico.
- Los elementos estructurales son dimensionados para las fuerzas determinadas, y las conexiones generalmente deben desarrollar la resistencia de los elementos que allí convergen
- La deformación del edificio será limitada, y el diseño de la cimentación deberá acomodar las fuerzas y movimientos inducidos al edificio por un sismo

5.3 Condiciones del Suelo

Para calcular el valor del coeficiente del suelo, S , el cual será usado en el cálculo de las fuerzas sísmicas, se debe elegir uno de los tres tipos de suelo que coincidan con las condiciones del lugar.

Perfil del Terreno tipo = S_2

Coficiente del tipo de suelo : $S = 1.2$

5.4 Sistema Estructural

Eligiendo uno de los cuatro sistemas generales, el cual sea representativo del edificio. El factor de Modificación de Respuesta , R, para el calculo de las fuerzas sismicas y el Factor de Amplificacion de Deformaciones, Cd, para calcular la deformacion relativa en entresijos, estan dados en funcion del tipo del sistema estructural y del sistema para resistir las cargas gravitacionales.

Sistema Dual R = 5.5 Cd = 5

5.5 Configuracion

El edificio se clasifica como regular o irregular tanto en su configuracion en planta como en su configuracion vertical. La configuracion vertical determina el metodo de analisis a ser usado

Configuracion: Configuracion Regular en planta y elevacion

5.6 Metodo de Analisis

El minimo nivel de analisis requerido se determina dependiendo de la categoria del edificio y de la regularidad o irregularidad del sistema estructural usado. Metodos mas rigurosos de analisis que el minimo requerido puede aplicarse para cualquier edificio.

Edificios ubicados dentro de la Categoria de Proteccion Sismica C y D que tienen configuracion vertical regular, como minimo deben ser analizados por el metodo de la Fuerza Lateral Equivalente Edificios comprendidos dentro de las categorias C y D que tengan configuracion vertical irregular deben ser analizados considerando las propiedades dinamicas del edificio, y condicionalmente se puede usar el metodo de Analisis Modal

Categoria C ----> Metodo de Analisis Minimo : Fuerza Lateral Equivalente

En este caso se uso : Analisis Modal (metodo mas riguroso)

**DETERMINACION DE LAS FUERZAS SISMICAS Y DESPLAZAMIENTOS
POR EL METODO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE**

El corte en la Base, V, se determina por las siguientes formulas....

Direccion Norte- Sur	Direccion Este-Oeste
$V_Y = C_{SY} (W)$	$V_X = C_{SX} (W)$
$V_Y = 0.1057 (7280) \text{ ton}$	$V_X = 0.11165 (7280) \text{ Ton}$
$V_Y = 770 \text{ Ton} \quad (*1)$	$V_X = 812.8 \text{ Ton} \quad (*1)$

(*1) Para aplicar en analisis estatico

$$V_{Y(1.4 T_a)} = 0.0845 (7280) \text{ Ton} \quad V_{X(1.4 T_a)} = 0.08922 (7280) \text{ Ton}$$

$$V_{Y(1.4 T_a)} = 615 \text{ Ton} \quad (*2) \quad V_{X(1.4 T_a)} = 649.50 \text{ Ton} \quad (*2)$$

(*2) Para comparar con analisis dinamico

Direccion Norte- Sur	Direccion Este-Oeste
----------------------	----------------------

usando el coeficiente sismico, Cs, dado por la formula. $C_s = A_0 (FAD) / R$
(figura 3B)

$$C_{SY} = [(1.2) A_0 S] / [R T^{2/3}]$$

$$C_{SX} = [(1.2) A_0 S] / [R T^{2/3}]$$

$$C_{SY} = [1.2 (0.30) (1.2)] / [(5.5) (0.64)^{2/3}]$$

$$C_{SX} = [1.2 (0.30) (1.2)] / [(5.5) (0.59)^{2/3}]$$

$$C_{SY} = 0.1057$$

$$C_{SX} = 0.11165$$

El valor de C_s a ser usado si el periodo del edificio no es calculado, esta dado por la formula. ..

$$C_s = 2.5 A_0 / R$$

$$C_s = (2.5) (0.30) / (5.5)$$

$$C_s = 0.1363$$

Las formulas para calcular el periodo T_a estan dadas. Si el periodo fundamental del edificio calculado, T , es usado, no debera exceder $1.2 T_a$.

$$T_{aY} = 0.05 h_n / L_Y^{1/2} \quad (*3) \quad T_{aX} = 0.05 h_n / L_X^{1/2} \quad (*3)$$

$$T_{aY} = 0.05 (105') / (67.26')^{1/2} \quad T_{aX} = 0.05 (105') / (79.06')^{1/2}$$

$$T_{aY} = 0.64 \text{ segundos.} \quad T_{aX} = 0.59 \text{ segundos.}$$

(*3) h_n , L_X y L_Y estan dados en pies

La distribucion vertical de las fuerzas sismicas sera parabolica, y puede ser interpolada entre estos dos rangos, dependiendo del periodo.

$$F_j = C_{Vj} (V)$$

$$C_{Vj} = W_j h_j^K / \sum_{i=1}^n W_i h_i^K$$

Para $T < 0.50$ $K = 1$ y Para $T > 2.50$ $K = 2$

Las masas de cada nivel son las siguientes:

Nivel	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Masa (Kg-seg ² / cm)	994	782	782	755	755	755	755	755	755	333

Las fuerzas cortantes y torsionales serán distribuidas horizontalmente, proporcionalmente a las rigideces de los elementos. La magnitud de la torsión accidental viene dada por

$$e_x = 0.05 L_x \quad M_{tj} = V_y e_x$$

$$e_y = 0.05 L_y \quad M_{tj} = V_x e_y$$

donde $j = 1$ a 10 niveles

Los desplazamientos relativos en los entrepisos fueron calculados usando el factor de amplificación, C_d , para considerar los efectos inelásticos y el factor de amplificación P -delta, si fuera aplicable.

$$d_j = C_d \times d_{je}$$

DETERMINACION DE LAS FUERZAS SISMICAS Y DESPLAZMIENTOS POR EL METODO DE ANALISIS MODAL

El edificio fue modelado con un grado de libertad por nivel, usando los tres modos de vibración más pequeños o todos los modos con un período mayor de 0.4 segundos.

El cortante sísmico modal fue determinado usando el coeficiente sísmico modal y la carga gravitacional efectiva. Los cortantes modales, momentos flectores y desplazamientos relativos fueron calculados por métodos estáticos lineales y las fuerzas modales y deformaciones fueron determinadas por las siguientes fórmulas:

$$V_m = C_{sm} W_m$$

$$C_{sm} = 1.2 A_0 S / R T_m^{2/3} \quad \text{y} \quad C_{sm} < 2.5 A_0 / R$$

$$W_m = \left[\sum_{j=1}^n W_j F_{jm} \right]^2 / \sum_{j=1}^n W_j F_{jm}^2$$

donde $J = 1$ a 10 niveles

y $m =$ modos

Dirección - Norte Sur		Dirección Este-Oeste	
$T_1 = 0.69$ seg.	$W_1 = 0.676 (W)$	$T_1 = 0.74$ seg.	$W_1 = 0.724 (W)$

$T_2 = 0.15 \text{ seg.}$	$W_2 = 0.198 (W)$	$T_2 = 0.20 \text{ seg.}$	$W_2 = 0.157 (W)$
$T_3 = 0.06 \text{ seg.}$	$W_3 = 0.069 (W)$	$T_3 = 0.09 \text{ seg.}$	$W_3 = 0.062 (W)$
$T_4 = 0.04 \text{ seg.}$	$W_4 = 0.033 (W)$	$T_4 = 0.05 \text{ seg.}$	$W_4 = 0.032 (W)$
$T_5 = 0.03 \text{ seg.}$	$W_5 = 0.015 (W)$	$T_5 = 0.04 \text{ seg.}$	$W_5 = 0.016 (W)$

Donde $W = 7,280 \text{ Ton}$

Coefficiente Sismico Modal	Cortante Basal Modal	Coefficiente Sismico Modal	Cortante Basal Modal
$C_{S1} = 0.100$	$V_1 = 495 \text{ Ton}$	$C_{S1} = 0.096$	$V_1 = 506 \text{ Ton}$
$C_{S2} = 0.136$	$V_2 = 196 \text{ Ton}$	$C_{S2} = 0.136$	$V_2 = 155 \text{ Ton}$
$C_{S3} = 0.136$	$V_3 = 68 \text{ Ton}$	$C_{S3} = 0.136$	$V_3 = 61 \text{ Ton}$
$C_{S4} = 0.136$	$V_4 = 33 \text{ Ton}$	$C_{S4} = 0.136$	$V_4 = 32 \text{ Ton}$
$C_{S5} = 0.136$	$V_5 = 15 \text{ Ton}$	$C_{S5} = 0.136$	$V_5 = 16 \text{ Ton}$

Los valores de diseño para cortantes, momentos y desplazamientos relativos se determinaron por la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las cantidades modales. Si el resultado del corte basal es menor que el determinado por el Método de la Fuerza Lateral Equivalente usando $T = 1.4 T_a$, los valores de diseño fueron incrementados por la relación de los dos cortantes basales.

Dirección - Norte Sur	Dirección Este-Oeste
1) Corte Basal Modal V_m	
$V_{mY} = [V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2]^{1/2}$	$V_{mX} = [V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + V_5^2]^{1/2}$
$V_{mY} = 537 \text{ Ton}$	$V_{mX} = 532 \text{ Ton}$

2) Fuerza Lateral Equivalente V	
$V_Y = 770 \text{ Ton}$	$V_X = 812.8 \text{ Ton}$

3) $V_{(1.4T_2)}$

$$V_{Y(1.4T_2)} = 615 \text{ Ton}$$

$$V_{X(1.4T_2)} = 649.5 \text{ Ton}$$

4) Factor (Relacion de cortes Basales)

$$V_{Y(1.4T_2)} / V_{mY} = 615 / 537 = 1.145$$

$$V_{X(1.4T_2)} / V_{mX} = 649.5 / 532 = 1.221$$

5) V de diseño

$$V_{Y \text{ diseño}} = 1.145 V_{mY} = 615 \text{ Ton}$$

$$V_{X \text{ diseño}} = 1.221 V_{mX} = 649.5 \text{ Ton}$$

El edificio sera diseñado para resistir los momentos de volteo de diseño. El momento de volteo calculado puede ser reducido en un 10 % para el diseño de la cimentacion.

6.0 LIMITES DE DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS

Los desplazamientos relativos calculados por el Metodo de la Fuerza Lateral Equivalente o por el Metodo de Analisis Modal, estan limitados a los valores permisibles dados en funcion de el Grupo de Exposicion a la Amenaza Sismica. (ver figura 4).

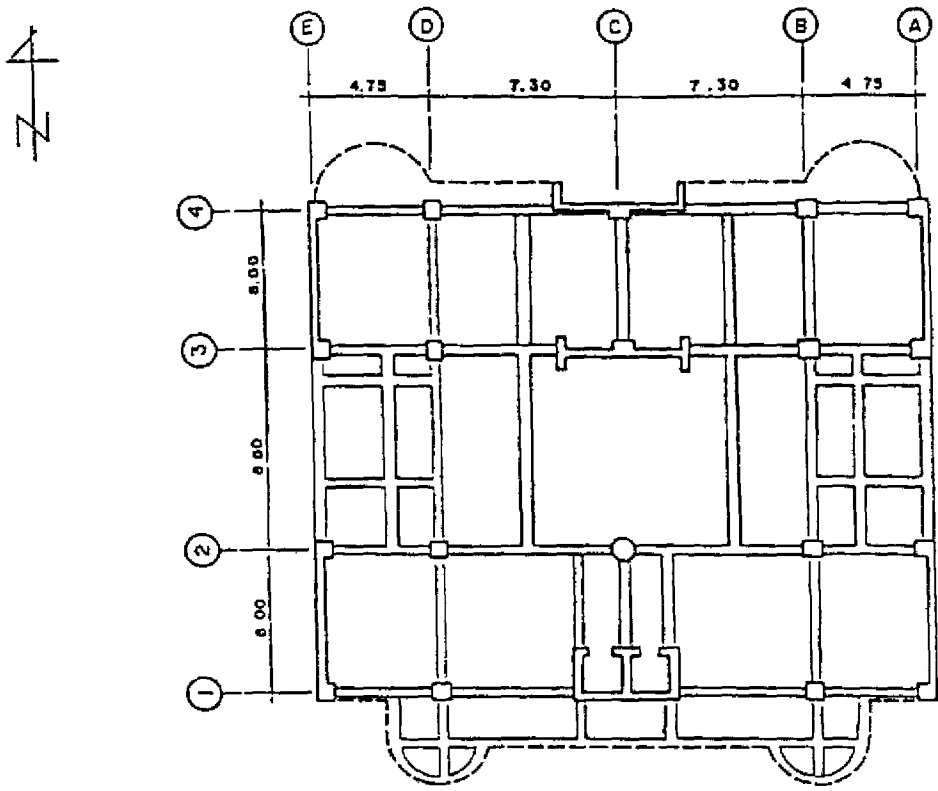
7.0 INTERACCION SUELO - ESTRUCTURA

Considerando el efecto de interacción suelo - estructura, el corte basal y las fuerzas de diseño decrecen, pero pueden incrementarse las deformaciones laterales y efectos secundarios.

REFERENCIAS

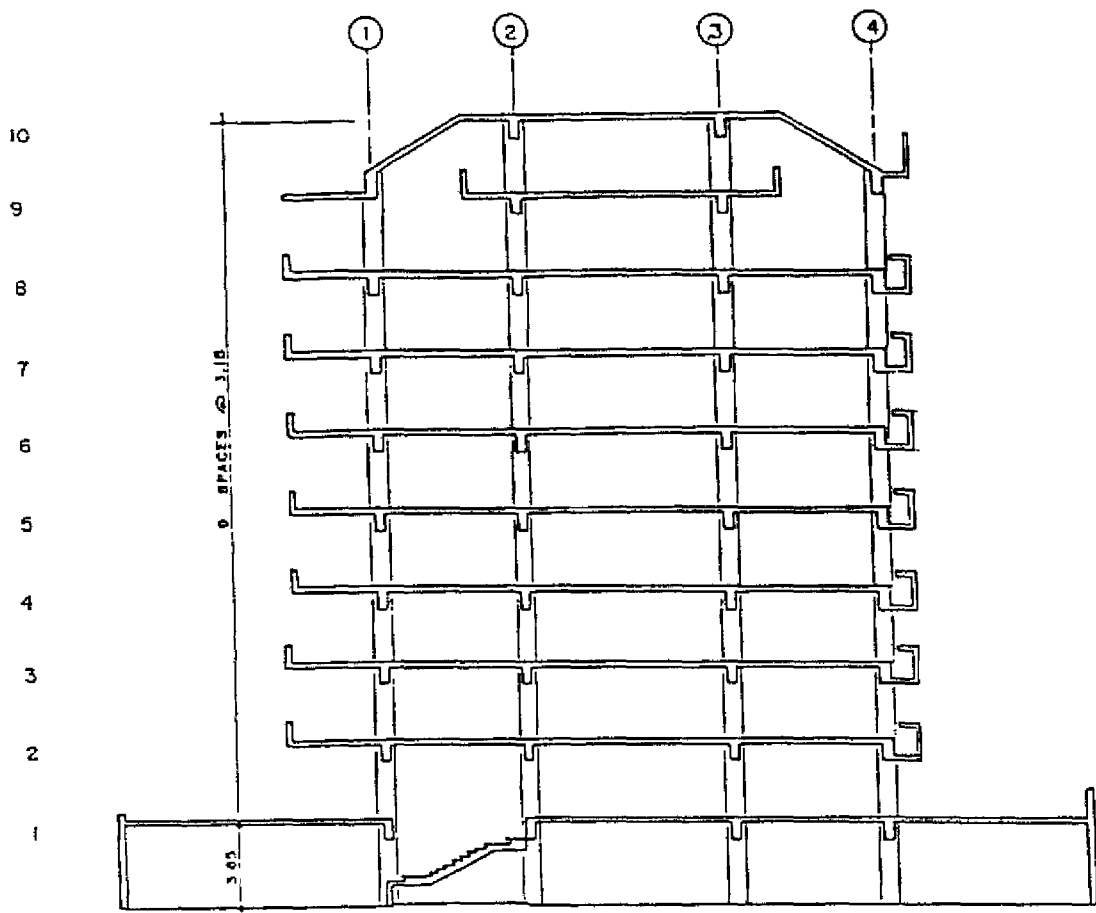
1. **ARCE VALENZUELA, ALFREDO. “ Proposal Of Seismic Design Regulation For Guatemala ”.** Bulletin of the International Institute of Seismology and Earthquake Engineering, IISEE, Volume 26, pp 337-360. 1992.

CLOUGH, R.W. AND J. PENZIEN. “Dynamics of Structures”. Mc.Graw-Hill Book Company, 1975.



**PLANO ESQUEMATICO DEL SISTEMA ESTRUCTURAL
DEL EDIFICIO DE 10 NIVELES**

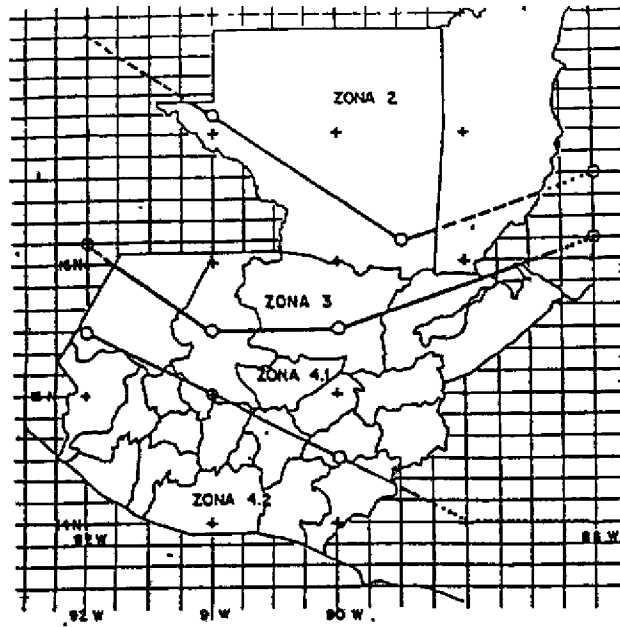
FIGURA 1



**SISTEMA ESTRUCTURAL DEL EDIFICIO
DE 10 NIVELES**

FIGURA 2

PROYECTO: NORMAS PARA DISEÑO SISMO-RESISTENTE
 REPUBLICA DE GUATEMALA



MAPA DE ZONIFICACION SISMICA DE GUATEMALA

FIGURA 3-A

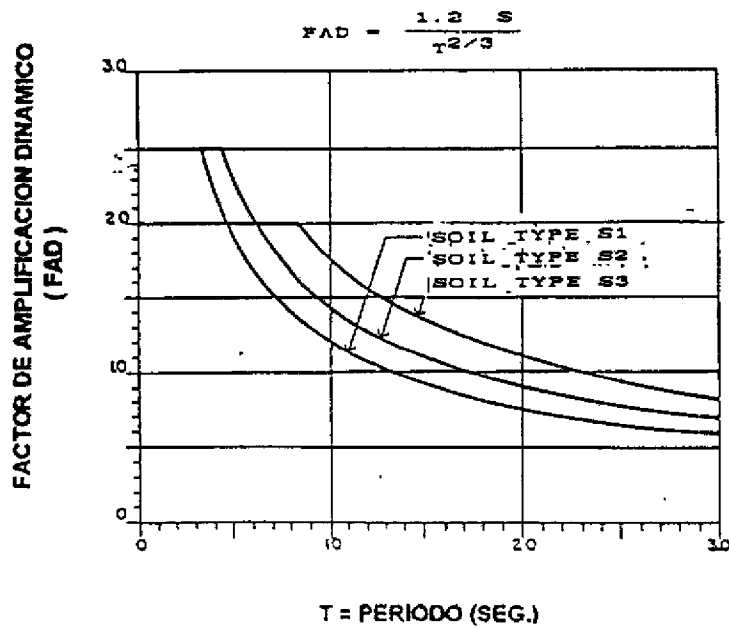
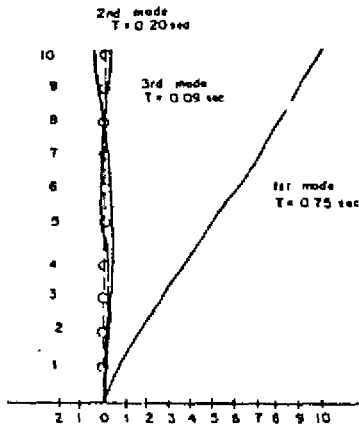


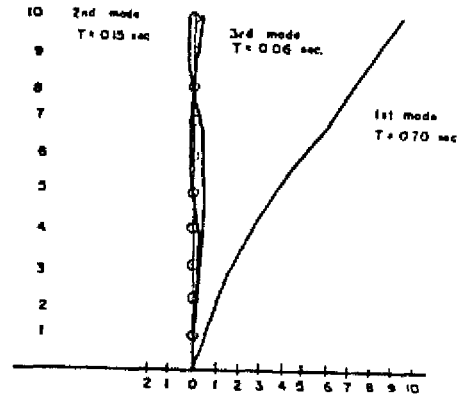
FIGURA 3-B

**EXCITACION SISMICA
DIRECCION ESTE-OESTE**



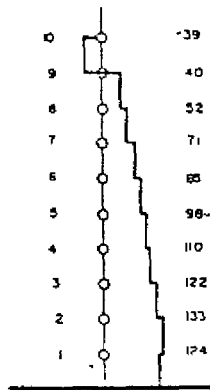
DESPLAZAMIENTO (CMS)

**EXCITACION SISMICA
DIRECCION NORTE - SUR**

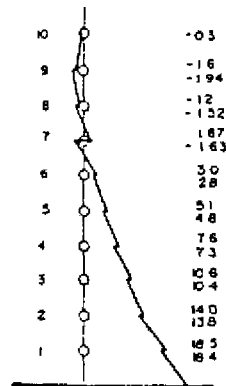


DESPLAZAMIENTOS (CMS)

FIGURA - 4



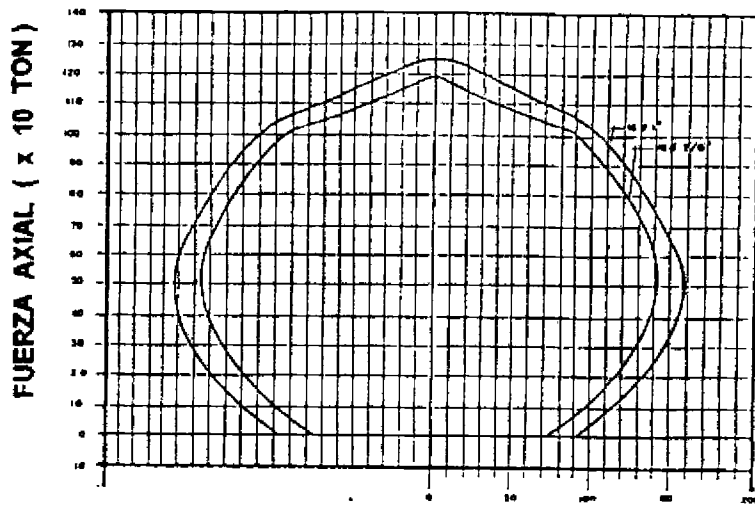
CORTANTES MODALES ELASTICOS (TON)



MOMENTOS DE VOLTEO (TON-M x 10²)

MUROS DE CORTE EN EJES A - E

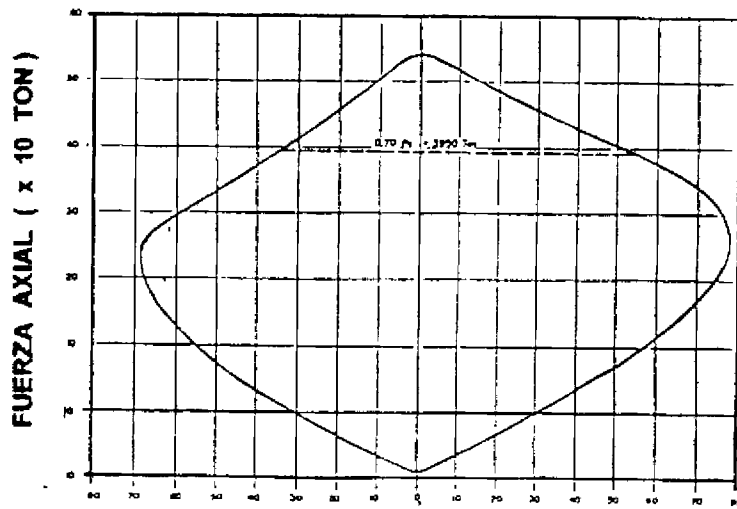
FIGURA 5



MOMENTO (TON - M)

DIAGRAMA DE INTERACCION
COLUMNA 0.70 x 0.70

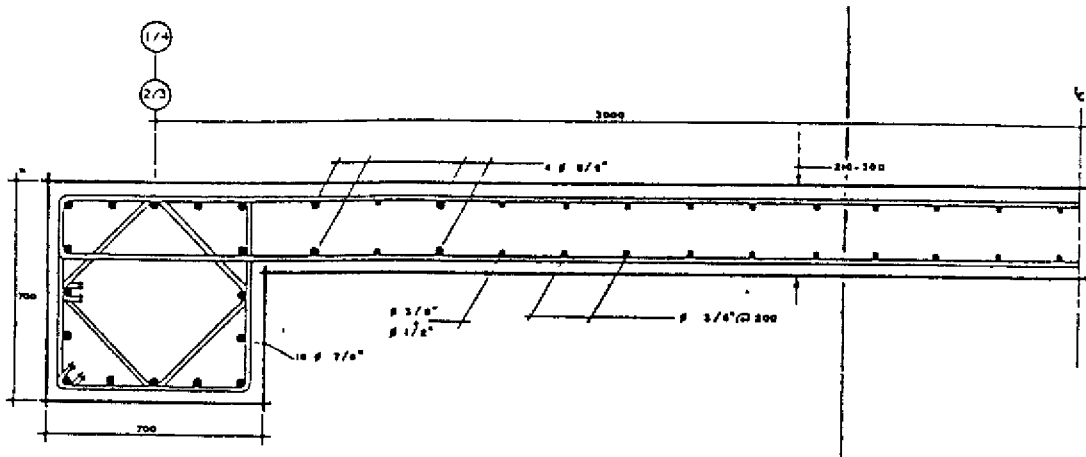
FIGURA 6 - A



MOMENTO (TON - M)

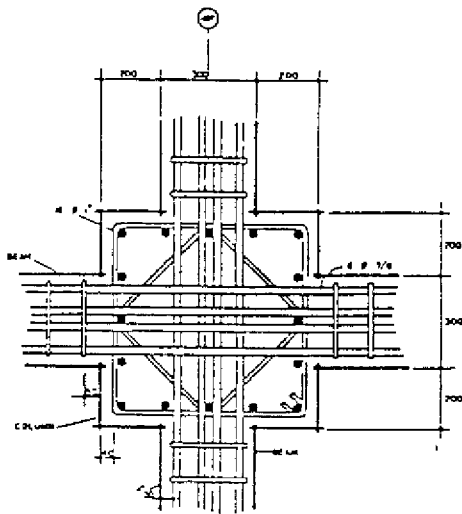
DIAGRAMA DE INTERACCION
MURO DE CORTE A - E

FIGURA 6 - B

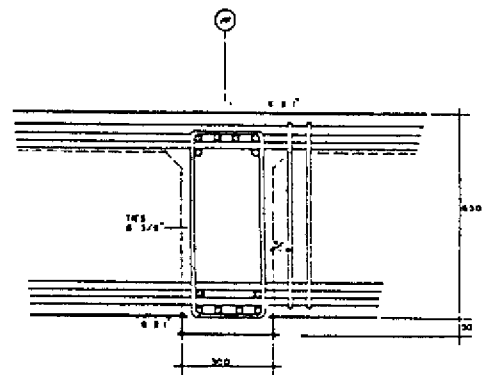


REFUERZO EN MURO DE CORTE

FIGURA 7-A



CONEXION VIGA - COLUMNA



CONEXION EN VIGAS

FIGURA 7-B