

7  
624.171  
ZAM  
C.2



# Escuela Superior Politécnica del Litoral

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción



## “Análisis Dinámico del Reservorio de Agua del Campus de la Espol”

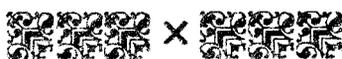
**TESIS DE GRADUO**

Previa a la Obtención del Título de:

**INGENIERO MECANICO**

Presentada por:

**Luis Daniel Zambrano Molina**



Guayaquil - Ecuador

Año - 2001



D-26875

CIB

# AGRADECIMIENTO

A todas las personas que de una u otra manera colaboraron en la realización de este trabajo y especialmente al Ing. Eduardo Orcés, Director de Tesis, por su invaluable ayuda

# DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la  
vida

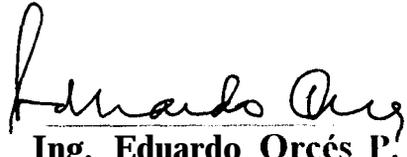
A mis padres, por **haberme**  
dado educación

A María Auxiliadora, **por**  
haberme dado la felicidad

# TRIBUNAL DE GRADUACION



**Ing. Marcos Tapia Q.**  
**Delegado por el Decano**  
**de la FIMCP**



**Ing. Eduardo Orcés P.**  
**Director de Tesis**



**Ing- Manuel Helguero G.**  
**Vocal**



# RESUMEN

Una de las ramas más importantes de la ingeniería es el cálculo y diseño de estructuras. Con el desarrollo de la tecnología de los microcomputadores, se ha generalizado el uso de la teoría de los elementos finitos para analizar problemas de ingeniería de todo tipo, uno de los cuales es el diseño y análisis estructural en el cual se basa este trabajo.

Esta tesis comienza con generalidades del MEF y los pasos a seguir en un análisis estructural aplicando el método, se dan las pautas para el modelado y recomendaciones para el análisis.

Se realiza una introducción al programa de análisis estructural utilizado.

Se describen los conceptos básicos de dinámica estructural y los métodos numéricos que se emplean para resolver sistemas dinámicos.

Se describe el **reservorio** de agua del Campus Prosperina de la ESPOL cuya configuración no es común por la forma que tiene y se propone realizar el análisis sísmico de la estructura.

Se hace el modelado del reservorio de agua y se procesa ta información por medio de **SAP2000** para análisis dinámico y se muestran los resultados de este.

Por último, se realizan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

# ÍNDICE GENERAL

Pag.

RESUMEN .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	IV
SIMBOLOGÍA .....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS .....	VII
ÍNDICE DE PLANOS .....	VIII
INTRODUCCIÓN .....	1

## I. GENERALIDADES DEL METODO DE ELEMENTOS FINITOS .....

3

1.1 Introducción .....

3

1.2 Principios básicos para la utilización del método de elementos finitos .....

4

1.3 Pasos del análisis por elementos finitos .....

6

1.4 Pautas para el modelado .....

8

## II. DINÁMICA DE ESTRUCTURAS .....

9

2.1 Conceptos básicos .....

9

2.2 Ecuación general .....

11

2.3 Método de superposición modal .....

13

2.3.1 Transformación a ecuaciones modales.....	13
2.3.2 Relación de participación de masa.....	15
2.4 Método del espectro de respuesta.....	16
2.5 Efectos ortogonales en el análisis espectral.....	19
<b>III. ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN SAP2000.....</b>	<b>21</b>
3.1 Introducción.....	21
3.2 Interfaz gráfica.....	23
3.3 Modelizado..	24
3.4 Preproceso .....	25
3.5 Análisis.....	26
3.6 Postproceso .....	27
<b>IV. RESERVORIO DE AGUA DE LA ESPOL.....</b>	<b>29</b>
4.1 Modelo de la estructura en <b>3D</b> .....	29
4.2 Configuración geométrica.....	30
4.3 Interacción suelo-estructura.....	34
4.4 Dinámica del líquido en el tanque .....	35
<b>V. ANÁLISIS DINÁMICO DEL RESERVORIO DE AGUA .....</b>	<b>37</b>
5.1 Modelizado de la geometría.....	37
5.2 Definición de materiales y secciones.....	38

5.3	Asignación de propiedades y cargas.....	42
5.4	Definición del tipo de análisis.....	51
5.5	Análisis.....	53
5.6	<b>Visualización de resultados..</b> .....	<b>60</b>
5.7	Verificación del cumplimiento del código de construcción.....	63

<b>VI.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>67</b>
------------	--	-----------

<b>APÉNDICES</b>
------------------

<b>BIBLIOGRAFÍA</b>
---------------------

## ABREVIATURAS

CEC	Código Ecuatoriano de la <b>Construcción</b>
CQC	Complete Quadratic Combination
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
LDR	Load Dependent <b>Ritz</b>
MEF	Método de Elementos Finitos
SRSS	Square Root of <b>the</b> Sum of <b>the</b> Squares
UBC94	Uniform Building <b>Code</b> 94

## SIMBOLOGÍA

$\Omega^2$	Matriz de eigenvalores
$\gamma$	Relación de Poisson
C	Matriz de amortiguamiento
E	Módulo de Young
F	Vector de cargas
$f_j$	Vectores espaciales independientes del tiempo
g	Gravedad
G	Módulo transversal
$g(t)_j$	Vectores dependientes del tiempo
K	Matriz de rigidez
L	Altura del tanque
M	Matriz diagonal de masas
$m_i$	Carga unitaria en la dirección $i$
$p_n$	Factores de participación modal
$S(\omega)_a$	Espectro de <b>seudo-aceleración</b>
T	Periodo de vibración
$\ddot{u}(t)_a$	Aceleraciones absolutas de los nodos
$u(t)_a$	Desplazamientos absolutos de los nodos
$\dot{u}(t)_a$	Velocidades absolutas de los nodos
$\ddot{u}(t)_{ig}$	Aceleración relativa del suelo en la dirección $i$
$V_i$	Fracción volumétrica del elemento $i$
$V_x$	Cortante total en la base
$X_{masa}$	Relación de participación de masa en la dirección $x$
$\delta$	Vector de desplazamiento
$\zeta$	Relación de amortiguamiento
$\lambda$	Eigenvalor
$\Phi$	Matriz de los vectores independientes del tiempo
$\omega$	Frecuencia de vibración
$\omega_n$	Frecuencia natural de vibración

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1</b>	Discretización de un medio continuo
<b>Figura 2.1</b>	Espectro de pseudo-aceleración
<b>Figura 2.2</b>	Seudo-aceleración normalizada
<b>Figura 2.3</b>	Efectos de <b>direccionalidad</b>
<b>Figura 3.1</b>	Interfaz gráfica
<b>Figura 3.2</b>	Selección de unidades
<b>Figura 3.3</b>	Grupo de auto selección
<b>Figura 4.1</b>	modelo 3D del reservorio
<b>Figura 4.2</b>	Designación de secciones
<b>Figura 4.3</b>	Sección transversal equivalente
<b>Figura 4.4</b>	Dinámica del líquido en el tanque
<b>Figura 5.1</b>	Importación de archivos
<b>Figura 5.2</b>	Definición de materiales ortotrópicos
<b>Figura 5.3</b>	Definición de las secciones Shell
<b>Figura 5.4</b>	Definición de las secciones Frame
<b>Figura 5.5</b>	Datos del refuerzo
<b>Figura 5.6</b>	Asignación de secciones
<b>Figura 5.7</b>	Definición de un Patrón de juntas
<b>Figura 5.8</b>	Asignación de juntas al patrón
<b>Figura 5.9</b>	<b>Visualización</b> de la presión interior
<b>Figura 5.10</b>	Asignación de la presión al tubo interior
<b>Figura 5.11</b>	Distribución de presiones
<b>Figura 5.12</b>	Asignación de restricciones
<b>Figura 5.13</b>	Selección de restricciones
<b>Figura 5.14</b>	Asignación restricciones de desplazamiento
<b>Figura 5.15</b>	Espectro de Respuesta del <b>CEC</b>
<b>Figura 5.16</b>	Acelerograma <b>Elcentro</b>
<b>Figura 5.17</b>	Parámetros dinámicos
<b>Figura 5.18</b>	Funciones de espectros de respuesta
<b>Figura 5.19</b>	Definición del caso de análisis para el espectro
<b>Figura 5.20</b>	Definición de la función de historia de tiempo
<b>Figura 5.21</b>	Caso de análisis de historia de tiempo
<b>Figura 5.22</b>	Periodo de la estructura
<b>Figura 5.23</b>	Cortante para el espectro

figura 5.24	Cortante para la Historia de tiempo
Figura 5.25	Desplazamiento máximo para el espectro
<b>Figura 5.26</b>	<b>Desplazamiento máximo para Time History</b>
<b>Figura 5.27</b>	<b>Curvas de Interacción</b>
Figura 5.28	Relación de Esfuerzo para las columnas
<b>Figura 5.29</b>	<b>Esfuerzos en la Pared</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla I</b> Propiedades básicas
Tabla <b>II</b> Propiedades de las secciones formadas
Tabla <b>III</b> Propiedades de las vigas
Tabla <b>IV</b> Propiedades de las columnas
Tabla V Coeficiente de Suelo S y Coeficiente $C_m$

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano **1** Plano Estructural del **Reservorio** de Agua de la **ESPOL**

## INTRODUCCIÓN

El Código Ecuatoriano de la Construcción (**CEC**), tomando en cuenta los avances de la ingeniería en terremotos, se ha visto en la necesidad de reformar las normas de diseño antisísmico.

Muchos de los ingenieros encargados de diseñar, construir o fiscalizar obras de construcción no tienen un conocimiento a profundidad del análisis espectral, por lo que éste trabajo sirve para dar un conocimiento sólido sobre la forma de manejar un análisis dinámico de estructuras.

En esta tesis se investiga la respuesta dinámica del reservorio de agua de la ESPOL ante un terremoto típico. Además se verifica que la estructura cumple con el **CEC**. Para esto, se determina la frecuencia fundamental de vibración y el cortante basal en el tanque, además de lógicamente los esfuerzos, producidos por las cargas dinámicas generadas en el sismo.

Para modelar el reservorio se utiliza AUTOCAD, y el análisis se lo realiza en **SAP2000**, habiendo previamente definido y asignado los materiales, restricciones y cargas presentes en el sistema real.

El análisis dinámico espectral utiliza la mayor amplitud de los modos de vibración que aportan significativamente a la respuesta de la estructura.

Para el terremoto típico se somete la base a un acelerograma específico y se analiza la respuesta dinámica para incrementos pequeños en el tiempo.

Las combinaciones modales se realizan mediante el método “Complete Quadratic Combination (**CQC**)” que es una medida estadística para obtener la mayor respuesta total en el sistema estructural.

Para tomar en cuenta los efectos producidos por la dirección de la aceleración del suelo, se utiliza el método “Square Root of the Sum of the Square (**SRSS**)” que combina las orientaciones para que la estructura sea igualmente resistente en cualquier dirección.

Este tipo de análisis se hace necesario cuando la estructura no es de tipo edificio en la cual se puede utilizar el método estático para investigar la resistencia sísmica.

# CAPÍTULO 1

## I. GENERALIDADES DEL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.

### 1.1 Introducción

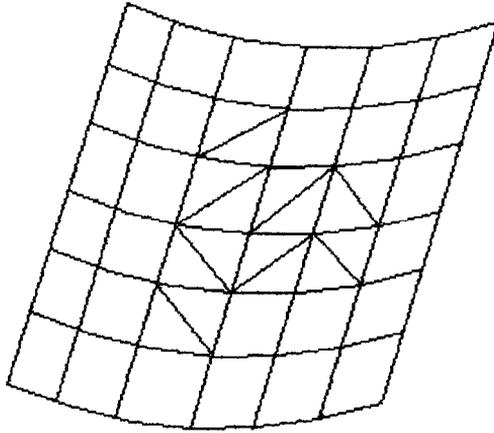
El método de elementos finitos es el método mas poderoso que existe para el cálculo estructural. Su versatilidad permite el estudio de sistemas que tienen forma arbitraria y sometidos a cualquier combinación de cargas y apoyadas de diversas maneras, en tan solo pocas horas. Con algo de imaginación cualquier clase de problema estructural puede ser resuelta; por esto, el método de los elementos finitos rápidamente ha desplazado a los métodos tradicionales de cálculo estructural

La teoría de los elementos finitos no solamente es aplicable a estructuras, sino que se aplica a todas las ramas de la ingeniería, pasando desde la resolución de redes y sistemas eléctricos hasta problemas de transferencia de calor y fluidos.

## **1.2 Principios básicos para la utilización del método.**

El método de elementos finitos fue desarrollado para resolver aquellos problemas que difícilmente podían tratarse por métodos clásicos de **diseño**. Con el desarrollo de las computadoras, hasta los pequeños problemas de ingeniería que antes se los trataba manualmente, ahora se los analiza y resuelve con esta herramienta.

El método se basa en la discretización de un medio continuo y, considerarlo a éste como constituido por pequeñas porciones de material llamadas elementos finitos, y unidos entre sí en los extremos denominados puntos nodales o nodos.



**Figura 1.1** Discretización de un medio continuo

Esta estructura discreta es analizada mediante un sistema de ecuaciones lineales. Las matrices generadas en la resolución de estos sistemas es muy grande por lo que solo pueden ser resueltas con la ayuda de un computador.

La fuente básica para la solución de problemas estructurales es la teoría de elasticidad: equilibrio, **compactibilidad** y condiciones de contorno, en conjunto con las propiedades elásticas de los materiales que se utilizan.

La rigidez de una estructura representa la constante de proporcionalidad entre la carga y la deformación en cualquier elemento. Así se puede establecer una proposición general para toda estructura:

$$\{F\}=[K]\{\delta\} \quad (1.1)$$

donde:

$\{F\}$  Vector de cargas, que contiene todos los componentes x e y de las fuerzas sobre los nudos de un sistema.

$[K]$  Matriz de rigidez, cuadrada, que contiene todos los coeficientes de rigidez que relacionan las fuerzas con los desplazamientos.

$\{\delta\}$  Vector de desplazamiento, que contiene los componentes x e y de todos los desplazamientos en los nudos.

### 1.3 Pasos del análisis de elementos finitos.

El análisis por elementos finitos para estructuras consta de siete pasos

(1):

1.- Modelado y discretización de la estructura.

2.- Selección de los tipos de elementos finitos a emplearse y definición de propiedades.

3.- Conformación de las matrices de rigidez en el caso de análisis estático o de masas y amortiguamiento en caso de análisis dinámico.

4.- Aplicación de cargas.

5.- Definición de condiciones de borde o **frontera**.

6.-**Resolución de los** sistemas de ecuaciones lineales.

7.- Cálculo de **fuerzas** internas de los elementos en base a los desplazamientos nodales.

Para resolver los sistemas de ecuaciones se pueden utilizar los métodos directos o algún método iterativo. En el programa de computación SAP se utiliza el método directo de eliminación de Gauss.

Los pasos 3,6 y 7 los realiza el programa, mientras que los pasos 1,2 y 4 son definidos por el ingeniero estructural.

---

(1) Tomado de **Finite Element Analysis**, Constantine C. Spirakos, pag. 2-3

#### í.4 Pautas para el modelado.

- Definir nodos en y cerca de los puntos de carga, en puntos de discontinuidad tanto de forma como de propiedades, en las regiones donde se necesite información más exacta.
- La forma de los elementos shell debe ser lo más próximo a un cuadrado si el elemento tiene cuatro nodos, y a un triángulo equilátero si tiene tres nodos.
- Para modelar superficies curvas, el ángulo entre elementos debe ser preferentemente menor de 20 grados.
- Tratar de reducir el sistema de ecuaciones a resolver y así aumentar la eficiencia **computacional**, aplicando las restricciones de desplazamiento que la estructura o algunos de sus miembros tuviera. Para esto se debe tener un entendimiento claro de como se comporta el sistema estructural.

# CAPÍTULO 2

## II. DINÁMICA DE ESTRUCTURAS.

### 2.4 Conceptos básicos

Para resolver un sistema estructural sujeto a cargas dinámicas, **ya** no solo se usan las relaciones fuerza-deformación junto con las ecuaciones de equilibrio, sino que la energía también es muy importante. En cualquier punto de la estructura el trabajo que ingresa al sistema debe ser igual a la suma de la energía cinética, la energía de deformación y la energía disipada en el sistema.

Un sistema de  $n$  grados de libertad tiene  $n$  frecuencias naturales. Cuando la vibración toma lugar en alguna frecuencia natural hay una establecida relación entre las amplitudes de los nodos, **a** esta configuración se la conoce como el modo normal.

Si la vibración es forzada, la frecuencia del sistema será la frecuencia de excitación y la amplitud de los nodos tenderá a la máxima amplitud que causarían las frecuencias naturales más cercanas.

**Modo normal de oscilación es el** modo en el que cada masa tiene movimiento armónico a la misma frecuencia pasando a través de la posición de equilibrio.

Para encontrar las frecuencias naturales del sistema

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (2.1)$$

Se asume una solución y se llega a la ecuación característica. Las raíces de la ecuación característica son las frecuencias naturales de vibración al cuadrado ( $\lambda = \omega^2$ ), y se denominan **eigenvalores**. Sustituyendo las frecuencias naturales en el sistema derivado de las ecuaciones diferenciales se obtienen las formas modales o modos y se denominan **eigenvectores**.

Se puede asumir que los modos tienen formas senoidales, éstos modos se llaman **vectores de Ritz**; esto se efectúa con el fin de dar más participación de masa a los modos y además para aumentar la eficiencia computacional.

Para vibración excitada por la fuerza armónica  $F_1 \text{sen } \omega t$  en un sistema de 2 grados de libertad puede ser representado por la siguiente ecuación matricial

$$\begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} \\ k_{21} & k_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_1 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{sen } \omega t \quad (2.2)$$

la solución es:

$$x_1 = X_1 \text{sen } \omega t = \frac{(k_{22} - m_2 \omega^2) F}{m_1 m_2 (\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2)} \text{sen } \omega t \quad (2.3a)$$

$$x_2 = X_2 \text{sen } \omega t = \frac{-k_{12} F}{m_1 m_2 (\omega_1^2 - \omega^2)(\omega_2^2 - \omega^2)} \text{sen } \omega t \quad (2.3b)$$

## 2.2. Ecuación general.

Todas las estructuras físicas cuando son sometidas a cargas o desplazamientos se comportan dinámicamente.

En el análisis por elementos finitos, las masas son concentradas en los nodos. En un sistema **descrito de esta manera** el equilibrio de **fuerzas se puede** expresar en función del tiempo:

$$F(t)_I + F(t)_D + F(t)_S = F(t) \quad (2.4)$$

Para sistemas estructurales lineales **esta** ecuación se convierte en:

$$M\ddot{u}(t)_a + C\dot{u}(t)_a + K u(t)_a = F(t) \quad (2.5)$$

Donde:

M : Matriz de masas.

C : Matriz de **amortiguamiento** o disipación de energía.

K : Matriz de rigidez estática.

$u(t)_a$ ,  $\dot{u}(t)_a$ ,  $\ddot{u}(t)_a$ : Desplazamientos, velocidades y **aceleraciones** absolutas de los nodos.

Para carga sísmica  $F(t) = 0$ .

Escribiendo los desplazamientos, velocidades y aceleraciones absolutas de los nodos en términos de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones del suelo tenemos:

$$M\ddot{u}(t)_a + C\dot{u}(t)_a + Ku(t)_a = -m_x\ddot{u}(t)_{xg} - m_y\ddot{u}(t)_{yg} - m_z\ddot{u}(t)_{zg} \quad (2.6)$$

Donde:

$$m_i = m l_i$$

Es importante notar que la carga es provocada por desplazamientos de la base y no por cargas externas.

Hay varios métodos **numéricos** para resolver la ecuación (2.6), entre los cuales están:

- Análisis dinámico usando superposición modal.

- Análisis dinámico usando el espectro de respuesta de la carga sísmica

## 2.3 Método de superposición modal

Este método es el más común y efectivo para analizar estructuras lineales.

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t)_a + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t)_a + \mathbf{K}\mathbf{u}(t)_a = \mathbf{F}(t) = \sum_{j=1}^J f_j g(t)_j \quad (2.7)$$

Todas las cargas dependientes del tiempo, incluyendo viento y sismos pueden ser representados por la suma de “j” vectores espaciales los cuales no dependen del tiempo y por “j” funciones que sí dependen del tiempo.

### 2.3.1 Transformación a ecuaciones modales.

Para resolver la ecuación (2.7) se usa la separación de variables, la cual es:

$$\mathbf{u}(t) = \Phi \mathbf{Y}(t) \quad (2.8)$$

$\Phi$  : Matriz “N por N” de vectores independientes del tiempo.

$\mathbf{Y}(t)$  : Vector de N funciones dependientes del tiempo.

Las funciones espaciales deben cumplir las condiciones de ortogonalidad tanto para la masa como para la rigidez:

$$\Phi^T M \Phi = I \quad \text{y} \quad \Phi^T K \Phi = \Omega^2$$

$I$  : Matriz diagonal unitaria.

$\Omega^2$  : Matriz diagonal en la que los términos son  $\omega_n^2$ .

$\omega_n^2$  no **necesariamente** es una frecuencia de vibración libre del sistema.

El vector  $\phi_n$  se normaliza de tal manera que la masa generalizada es igual a 1,  $\phi_n^T M \phi_n = 1$ .

Sustituyendo la ecuación (2.8) en la ecuación (2.7) y multiplicando por  $\Phi^T$  tenemos:

$$I \ddot{Y}(t) + d \dot{Y}(t) + \Omega^2 Y(t) = \sum_{j=1}^J p_j g(t)_i \quad (2.9)$$

$p_j = \Phi^T f_j$  : factor modal de participación.

$d_n = 2\zeta_n \omega_n$  : amortiguamiento modal.

$\zeta_n$  es definido como la relación de amortiguamiento en el modo  $n$  al amortiguamiento crítico del modo.

Desacoplando las ecuaciones modales, y para movimiento sísmico tridimensional:

$$\ddot{y}(t)_n + 2\zeta_n \omega_n \dot{y}(t)_n + \omega_n^2 y(t)_n = p_{nx} \ddot{u}(t)_{gx} + p_{ny} \ddot{u}(t)_{gy} + p_{nz} \ddot{u}(t)_{gz} \quad (2.10)$$

### 2.3.2 Relación de participación de masa

Los códigos de construcción exigen que mas del 90 % de la masa esté incluida en el cálculo de la respuesta para cada dirección principal. Estos requerimientos están basados en calcular el cortante en la base producido por la aceleración en una dirección particular.

Las fuerzas inerciales en los nodos en la dirección x son:

$$f_{xi} = M \ddot{u}(t) = M \phi_n \ddot{y}_n = p_{nx} M \phi_n \quad (2.11)$$

$y_n = p_{nx}$  debido a que la solución en estado estable no depende del amortiguamiento.

Entonces el cortante total en la base para el modo n es la suma de todas las fuerzas nodales en los N modos. Esto es:

$$V_x = \sum_{n=1}^N p_{nx}^2 \quad (2.12)$$

La relación de participación de masa es definida como la participación de masa dividida por el total de masa en esa dirección.

$$X_{masa} = \frac{\sum_{n=1}^N p_{nx}^2}{\sum m_x} \quad (2.13a)$$

$$Y_{masa} = \frac{\sum_{n=1}^N p_{ny}^2}{\sum m_y} \quad (2.13b)$$

$$Z_{masa} = \frac{\sum_{n=1}^N p_{nz}^2}{\sum m_z} \quad (2.13c)$$

## 2.4 Método del espectro de respuesta

El método involucra el cálculo de solamente los máximos valores de desplazamiento y fuerzas en los miembros en cada modo usando el espectro de diseño que es el promedio de diferentes terremotos.

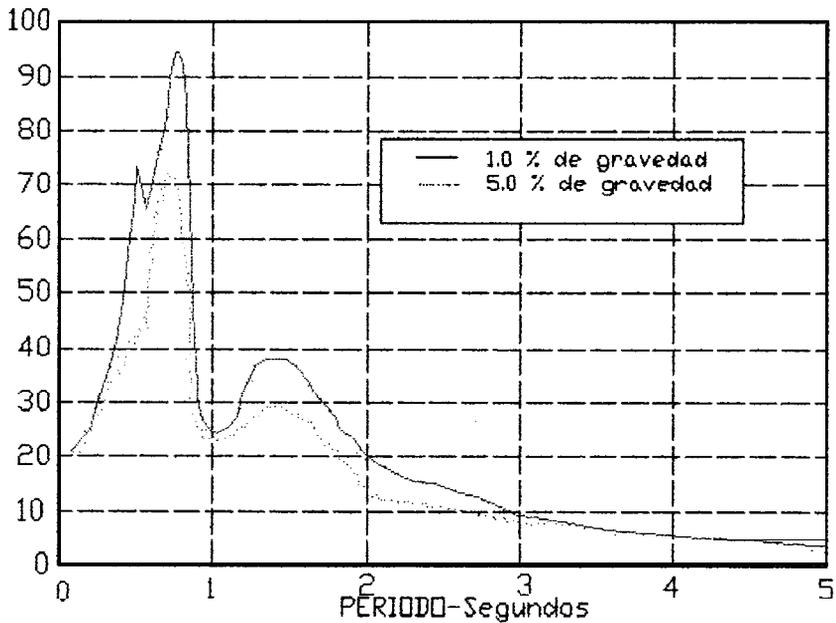
Para movimiento sísmico en una dirección, la ecuación modal, es reescrita como:

$$\ddot{y}(t)_n + 2\zeta\omega_n\dot{y}(t)_n + \omega_n^2 y(t)_n = p_{ni}\ddot{u}(t)_{gx} \quad (2.14)$$

Dada la aceleración del suelo  $\ddot{u}(t)_g$ , el amortiguamiento  $\zeta$  y asumiendo  $p_{ni} = -\Phi^T M_i = -1$ , esta ecuación se resuelve para **varios** valores de  $\omega$ .

Para presentar la solución gráficamente, se define el espectro de Seudo-aceleración que tiene unidades de aceleración ver-sus periodo.

$$S(\omega)_a = \omega^2 y(\omega)_{MAX} \text{ y } T = 2\pi / \omega$$



**Figura 2.1** Espectro de pseudo-aceleración,  $S(\omega) = \omega^2 y(\omega)_{MAX}$   
Tomado de Three Dimensional Analysis of **Structures**

Para cero amortiguamiento, la aceleración total del sistema es igual a la pseudo-aceleración. Es por esto, que el espectro de respuesta se presenta de esta manera.

El máximo desplazamiento modal de una estructura, para un modo  $n$  con periodo  $T_n$  y correspondiente valor de espectro de respuesta  $S(\omega_n)$  es:

$$u_n = y(T_n)_{MAX} \Phi_n = S(\omega_n) / \omega_n^2 \quad (2.15)$$

Para estimar el valor pico de la fuerza o el desplazamiento en una estructura hay algunos métodos como el Square Root of the Sum of the Squares (SRSS), pero el más exacto es el Complete Quadratic

Combination (CQC), que está basado en la teoría de vibración aleatoria.

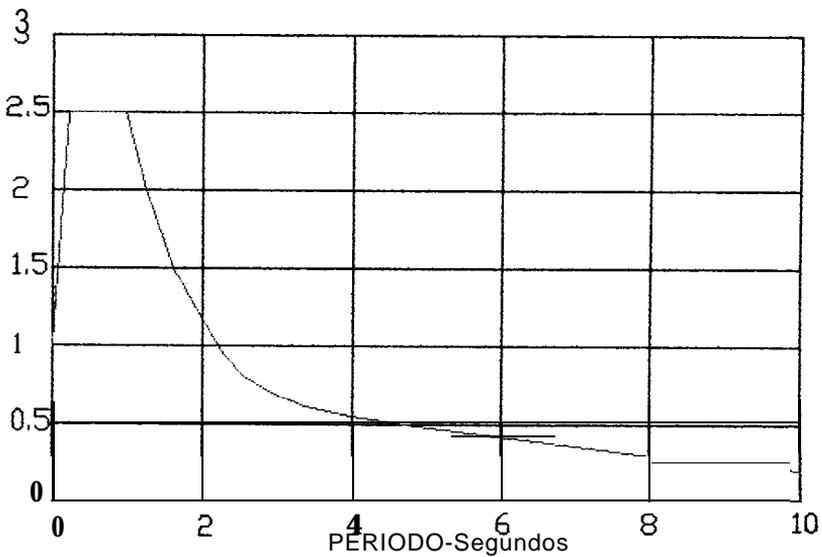
$$F = \sqrt{\sum_n \sum_m f_n \rho_{mn} f_m} \quad (2.16)$$

$f_n$  : fuerza modal

$$\rho_{mn} = \frac{8\zeta^2 (1+r)r^{3/2}}{(1-r^2)^2 + 4\zeta^2 r(1+r)^2} \quad (2.17)$$

$$r = \frac{\omega_n}{\omega_m} \leq 1$$

Muchos códigos de construcción especifican el espectro de diseño en la siguiente forma

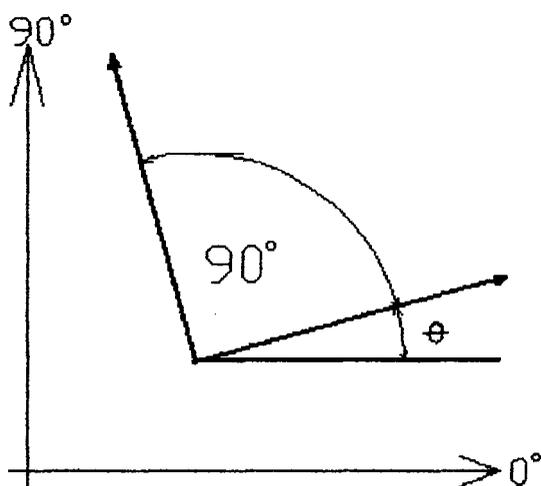


**Figura 2.2** Seudo-aceleración normalizada  
Tomado de Wilson (1)

## 2.5 Efectos ortogonales en el análisis espectral

Para que una estructura esté bien **diseñada** debe ser capaz no solamente de resistir temblores en una dirección, sino en cualquier dirección posible.

Para esto, algunos códigos establecen 100% de la carga sísmica en la dirección principal y 30% en dirección perpendicular a ésta



**Figura 2.3** Efectos de direccionalidad  
Tomado de Three Dimensional Analysis of **Structures**

El método para la combinación de los efectos de ortogonalidad del espectro es el CQC3 cuya ecuación fundamental para la estimación del valor pico de la fuerza es:

$$F = \left[ F_0^2 + a^2 F_{90}^2 - (1 - a^2)(F_0^2 - F_{90}^2) \text{sen}^2 \theta + 2(1 - a^2) F_{0-90} \text{sen} \theta \cos \theta + F_z^2 \right]^{1/2} \quad (2.18)$$

donde:

$$F_0^2 = \sum_n \sum_m f_{0n} \rho_{nm} f_{0m} \quad (2.19a)$$

$$F_{90}^2 = \sum_n \sum_m f_{90n} \rho_{nm} f_{90m} \quad (2.19b)$$

$$F_{0-90}^2 = \sum_n \sum_m f_{0n} \rho_{nm} f_{90m} \quad (2.19c)$$

$$F_z^2 = \sum_n \sum_m f_{zn} \rho_{nm} f_{zm} \quad (2.19d)$$

$f_{0n}$  y  $f_{90n}$  son los valores modales producidos por el 100% del espectro lateral aplicado a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  y  $f_{zn}$  es la respuesta modal del espectro vertical que podría ser diferente del espectro lateral.

Para  $a = 1$

$$F_{MAX} = \sqrt{F_0^2 + F_{90}^2 + F_z^2} \quad (2.20)$$

Lo que nos da como resultado el SRSS.

Como se puede ver, el valor de  $F_{MAX}$  no depende del sistema de referencia y la estructura resultante tendrá a todos sus miembros diseñados para resistir de igual manera temblores en todas direcciones. Este método es aceptable en los códigos de construcción.

# CAPÍTULO 3

## III. ANÁLISIS ESTRUCTURAL EN SAP 2000

### 3.1 Introducción.

**SAP2000** es el programa mas popular que existe para resolver sistemas estructurales lineales y no lineales, sometidos a cualquier estado de carga ya **sea** estática o dinámica.

Este programa puede diseñar bajo los códigos de construcción tanto americano como británico y canadiense, para acero como para concreto, lo que es una gran ventaja con respecto a otros programas estructurales.

La **interfaz** de **SAP2000** es muy amigable, de tal manera que en la misma ventana en que se ingresan los datos y geometría del modelo, se visualizan los resultados.

En el diseño de elementos de acero se han incorporado opciones como auto-selección del perfil óptimo para los miembros del sistema.

En el diseño en concreto puede calcular la cantidad de refuerzo requerida para cualquier condición de carga tanto en columnas como en vigas.

Los elementos pueden ser agrupados para propósitos de diseño.

Con la pulsación del ratón sobre un elemento o nodo se muestran **desplazamientos**, fuerzas, rotaciones, etc.

### 3.2 Interfaz gráfica.

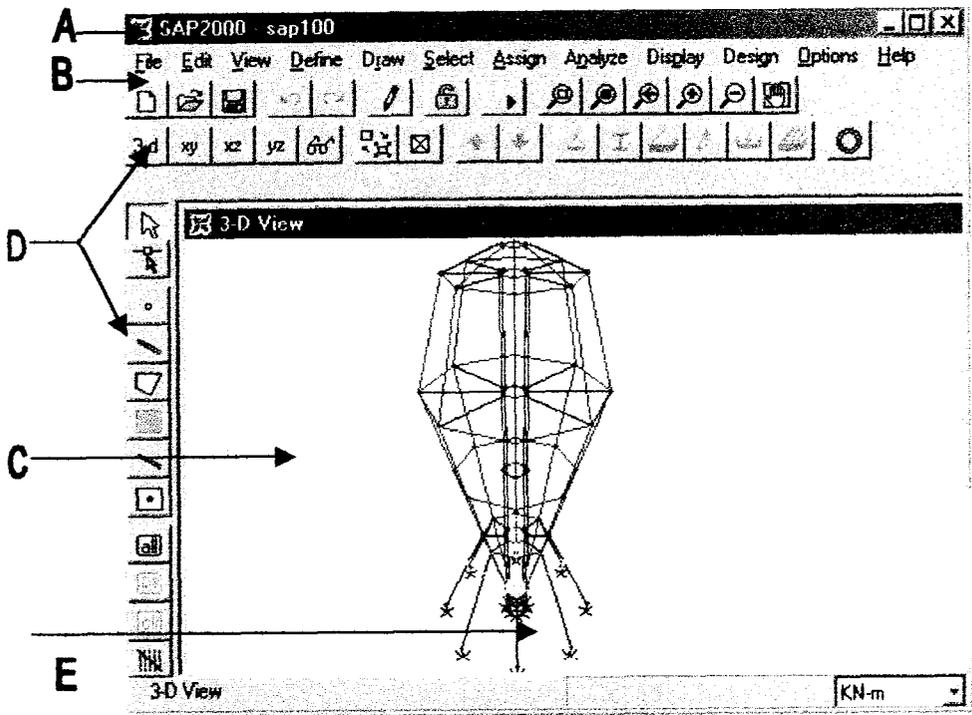


Figura 3.1 Interfat gráfica

La figura muestra la **interfaz** de **SAP2000**. A continuación se muestra una descripción de los componentes de la misma.

A: Barra de título.- Muestra el nombre del programa y el nombre del archivo actual.

B: Barra de menú.- Está localizada justo debajo de la barra de título y contiene los menús desplegables.

C: Área viva.- Esta región es donde el modelo es definido, analizado y mostrado.

D: Barra de herramientas.- Estas barras proveen de un rápido acceso a los comandos mas utilizados acelerando el proceso de análisis.

E: Miniaxis.- Indica el origen y la vista con relación a las tres dimensiones del área **viva**.

### 3.3 Modelado.

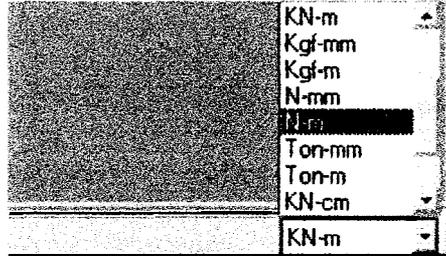
Para modelar la estructura existen tres posibilidades:

1 Utilizar los model templates, que son formas estructurales básicas que luego son editadas para modelar la estructura.

2 La utilización de mallas tridimensionales que servirán para ubicar los nodos y elementos en el espacio.

3.- La importación de archivos de intercambio gráfico (.**dxf**). Estos archivos son generados en algún programa de dibujo como AUTOCAD.

En cualquiera de las tres formas para dibujar la estructura o editarla, se debe, previamente, determinar las unidades; esto se hace en la parte inferior de la ventana de **SAP2000** como se muestra en la figura



**Figura 3.2** Selección de unidades

El programa maneja automáticamente las conversiones de unidades si el usuario requiriera ingresar datos en otras unidades.

### 3.4 Preproceso.

El preproceso consiste en definir los estados y los casos de carga, **ya** sean estos estáticos como dinámicos; esto se hace en el menú Define.

En general, se deben seleccionar los miembros para luego asignar las propiedades de los elementos estructurales y del sistema, así como las **restricciones** de desplazamiento y los tipos de puntos de apoyo.

El programa asigna en el momento de creación de un elemento ciertos ejes locales. Para todos los elementos, el eje local **1** tiene su dirección

longitudinal, el eje local 2 es perpendicular al eje 1 y está en el plano transversal del elemento y el eje **3** es perpendicular a los otros dos siguiendo la regla de la mano derecha.

### 3.5 Análisis.

Antes de ejecutar el análisis se deben setear los parámetros, estáticos como dinámicos. Ahora se realiza el análisis presionando la opción Run del menú Analyse. Esto despliega una ventana en la cual se visualizan los pasos del análisis **y**, si alguna advertencia se produce. Después de revisarlos se presiona el botón Ok.

Una opción muy importante en el análisis de estructuras metálicas es la Autoselección. Para hacer este tipo de análisis la plantilla frame Sections debe contener los diferentes perfiles entre los cuales se escogerá al óptimo. Se debe seleccionar Add Auto **Select**, con lo que se visualiza la ventana Auto Selection Sections donde se asigna nombre al grupo.

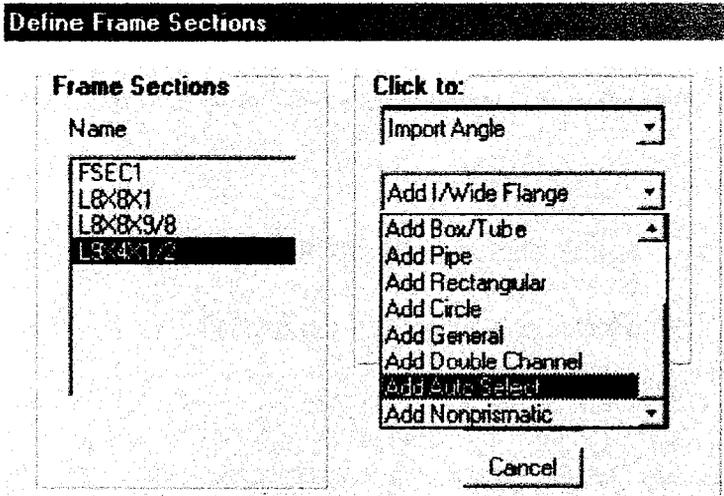


Figura 3.3 Grupo de auto selección

### 3.6 Postprocesado.

Después del análisis, automáticamente aparece la estructura en posición deformada.

Dando un clic derecho con el ratón en cualquier elemento o nodo, se muestra un cuadro con los resultados obtenidos. Además se pueden tabular los resultados y seleccionar ciertos de ellos para después imprimirlos o guardarlos en un archivo de texto.

Por lo general se desea verificar que la estructura se encuentre dentro de los límites de esfuerzo permitidos por el código de diseño. Este paso el SAP2000 lo hace automáticamente debido a que posee los códigos para diseño en concreto y acero mas importantes. Los

elementos se muestran en colores que significan un nivel de esfuerzo, el color rojo es para un elemento completamente esforzado.

El análisis efectuado por **SAP2000** genera dos archivos de salida tipo texto: el archivo de extensión **.EKO** que contiene la información empleada en el análisis y el archivo de extensión **.OUT** que contiene los resultados del análisis así como los específicamente **seleccionados**. El peso de los elementos está incluido en el archivo **.EKO**, esto sirve para un análisis preliminar del costo de la obra.

# CAPÍTULO 4

## IV. RESERVORIO DE AGUA DE LA ESPOL

### 4.1 Modelo de la estructura en 3D.

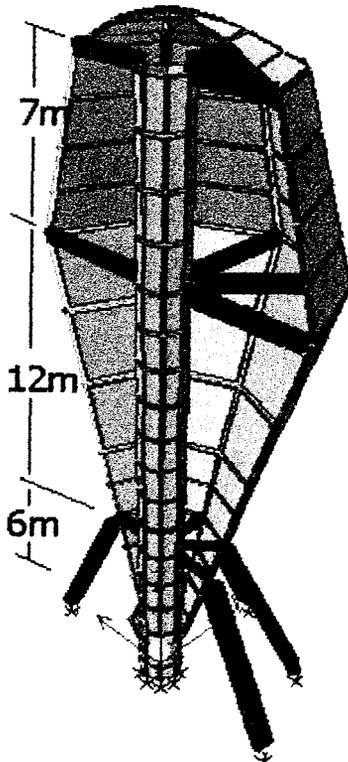


Figura 4.1 modelo 3D del reservorio

## 4.2 Configuración geométrica.

En esta sección se detalla cierta información sobre los tipos de secciones y propiedades del material de construcción empleado en la construcción así como también las equivalencias que se necesitan para el análisis. Para mayor información se puede consultar el apéndice C

Estas son las propiedades de los elementos estructurales utilizados:

	ACERO	CONCRETO
Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	<b>7840</b>	<b>2307</b>
Módulo de young (GPa)	E = 200	E = 27.4
Módulo transversal (Gpa)	<b>G = 77</b>	<b>G = 11.4</b>
Relación de poisson	$\gamma = 0.3$	$\gamma = 0.2$
Resistencia (MPa)	<b>F<sub>Y</sub> = 411</b>	<b>f<sub>C</sub> = 25</b>
Resistencia transversal (MPa)	<b>F<sub>YS</sub> = 158</b>	<b>f<sub>CS</sub> = 10.4</b>

**Tabla I** Propiedades básicas

### **Paredes del reservorio:**

Debido a que la configuración de las paredes es la de un material compuesto con propiedades ortotrópicas, se deben determinar las propiedades resultantes en las direcciones horizontal y vertical. Por esto, se muestra a continuación un cálculo modelo.

Fara la pared del tipo EXTMED:

Espesor 28 cm

Varillas horizontales  $2\Phi 18$  mm c/10 cm

Varillas verticales  $2\Phi 18$ mm c/18 cm

La densidad del material compuesto es:

$$\rho = \rho_{VAR}V_{VAR} + \rho_{CON}V_{CON} = 2393 \text{ Kg/m}^3$$

El volumen total =  $280000 \text{ cm}^3$

Voi. varillas =  $7917 \text{ cm}^3$

Por lo que la fracción volumétrica de las varillas es:

$$V_{VAR} = \text{Vol. varillas} / \text{Voi. total} = 0,028$$

Asumiendo  $V_{VACIOS} = 0.03$

Se tiene que la fracción volumétrica del concreto es:

$$V_{CONC} = 1 - 0.028 - 0.03 = 0.942$$

El módulo de Young longitudinal resultante es:

$$EL = V_{VAR}E_{VAR} + V_{CON}E_{CON} = 31.4$$

El módulo de Young transversal es:

$$E_T = \frac{1}{V_{VAR}/E_{VAR} + V_{CON}/E_{CON}} = 28.8 \text{ GPa.}$$

El módulo de Young resultante en las direcciones X, Y y Z son:

$$E_X = \frac{10}{15.6} (31.4) + \frac{5.6}{15.6} (28.97) = 30.53 \text{ GPa}$$

$$E_Y = \frac{5.6}{15.6} (31.4) + \frac{10}{15.6} (28.97) = 29.8 \text{ GPa}$$

$$E_Z = E_T = 28.97$$

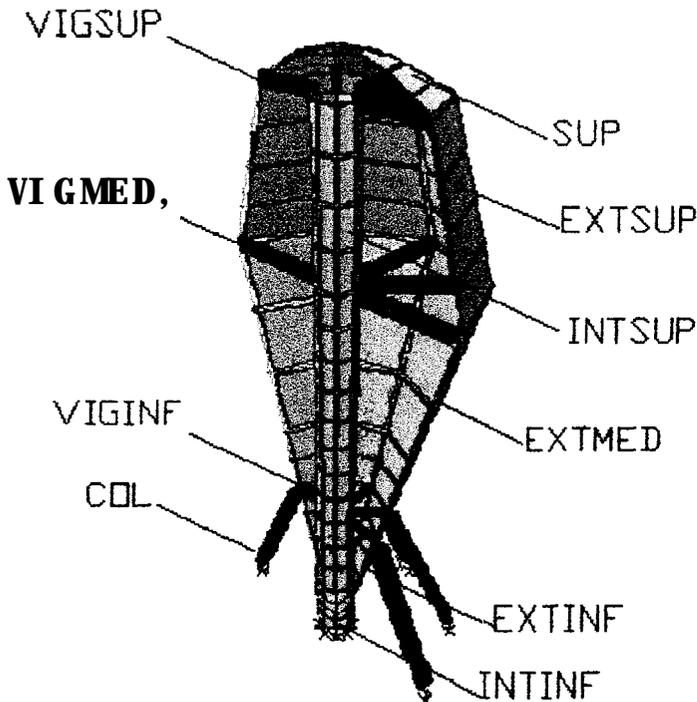


Figura 4.2 Designación de secciones

Después de realizar este cálculo, se ha tabulado las propiedades equivalentes, cuyo resultado se muestra a continuación

	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	E <sub>x</sub> (GPa)	E <sub>y</sub> (GPa)	E <sub>z</sub> (GPa)
INTINF	2360	29.7	29.7	29
INTSUP	2362	29.65	29.65	28.8
EXTINF	2348	29.4	29.4	28.8
EXTMED	2393	30.53	29.8	28.97
EXTSUP	2420	31	31	29
SUP	2400	30.5	30.5	30.2

Tabla II Propiedades de las secciones formadas

### Vigas y columnas:

En la siguiente figura, se muestra la sección transversal de una viga tipo y su equivalencia con una viga que solo tiene refuerzos en las esquinas

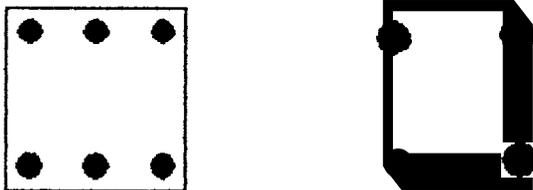


Figura 4.3 Sección transversal equivalente

El área de los refuerzos tiene que ser equivalente al área transversal de las varillas en la viga original. A continuación se muestran los refuerzos en las esquinas de las secciones de las vigas equivalentes

TIPO DE VIGA	Sección (m)	Recubrimiento (m)	Refuerzo equivalente (m <sup>2</sup> )
<b>VIGINF</b>	<b>0.30 x 0.30</b>	<b>0.04</b>	<b>3.8 E-4</b>
<b>VIGMED</b>	<b>0.40 x 0.50</b>	<b>0.05</b>	<b>7.9 E-4</b>
<b>VIGSUP</b>	<b>0.30 x 0.50</b>	<b>0.05</b>	<b>6.9 E-4</b>

**Tabla III** Propiedades de las vigas

Para las columnas se requiere el número de varillas en el ancho y en el espesor, así como el recubrimiento

COLUMNAS	Sección (m)	Recubrimiento (m)	# de varillas N x M	Area de una varilla (m <sup>2</sup> )
<b>COL</b>	<b>0.80 x 0.40</b>	<b>0.05</b>	<b>7 x 8</b>	<b>4.5 E-4</b>

**Tabla IV** Propiedades de las columnas

### 4.3 Interacción suelo-estructura.

Si la estructura es muy masiva y rígida, como en una represa, y el suelo es relativamente suave, el movimiento en la base puede ser significativamente diferente que el movimiento del suelo libre.

El suelo donde se asienta la estructura en análisis es rocoso, por lo que se considera que las aceleraciones del suelo con la estructura, son las mismas que sin ésta.

La amplificación no podría darse por ser el suelo muy rígido, y es por este motivo descartada.

#### 4.4 Dinámica del líquido en el tanque.

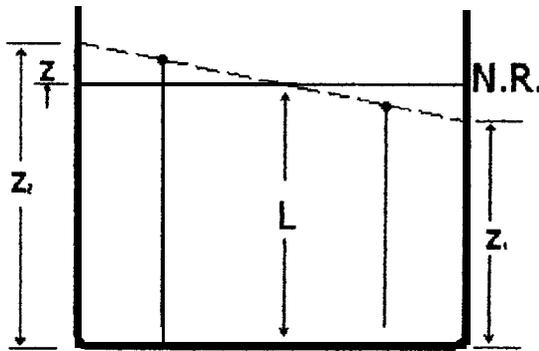


Figura 4.4 Dinámica del líquido en el tanque

Para determinar la frecuencia natural de vibración partimos de la ecuación de Euler en su forma no permanente:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} + v \frac{\partial v}{\partial s} + \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (4.1)$$

Integrando para un flujo incompresible se tiene:

$$\frac{P_2 - P_1}{\rho} + g(z_2 - z_1) + \frac{V_2^2 - V_1^2}{2} + \int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} ds = 0$$

$$P_1 = P_2, V_1 = V_2$$

$$g(z_2 - z_1) = -L \frac{\partial v}{\partial t}$$

$$2gz = -L\ddot{z}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{2g}{L}}$$

Para la altura de 25 m. del reservorio en consideración, se tiene que la frecuencia de excitación es de 0.14 Hertz, mientras que las frecuencias de excitación sísmica no bajan de 3 Hertz por lo que el agua no es excitada en un terremoto

# CAPÍTULO 5

## V. ANÁLISIS DINÁMICO DEL RESERVORIO DE AGUA.

### 5.4 Modelizado de la geometría.

El modelizado se lo realiza en AUTOCAD, dibujando los elementos que en SAP serán frames como líneas en una capa llamada **SAP\_FRAMES** y los elementos que en SAP serán shells como caras30 (3Dfaces) en una capa llamada **SAP\_SHELLS**.

Después de haber dibujado toda la estructura, esta debe ser guardada con extensión de intercambio gráfico (.DXF) y está lista para ser importada desde **SAP2000**.

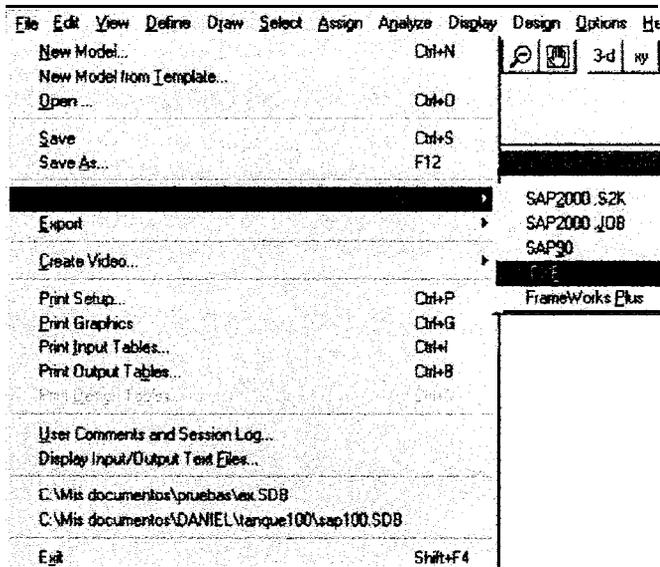


Figura 5.1 Importación de archivos

En la ventana de SAP2000 se debe pulsar la opción **import.DXF** ubicada en el menú **Fije**.

Seguidamente se muestra un cuadro de diálogo en el que se deben definir las unidades con que trabajará el programa, que para este caso son **Newtons** y metros, y la dirección del eje **z**. Aparece el modeio al cual se le deben asignar las propiedades que posee la estructura.

## 5.2 Definición de materiales y secciones.

Después de haber determinado las equivalencias en las secciones y las propiedades de los materiales compuestos se está listo para definir las en el **SAP200**.

En el menú Define, submenú Materials...se muestra un cuadro de diálogo en el que se debe escoger Add New Material.

Para definir los materiales del tipo shell en este trabajo se debe escoger la opción Orthotropic con lo que el cuadro de diálogo se modifica como está en la siguiente figura

**Material Property Data**

Material Name: EXTMED

Type of Material:  Isotropic  Orthotropic  Anisotropic

Type of Design: Design: Concrete

Analysis Property Data		Design Property Data	
Mass per unit Volume	2393.	Reinforcing yield stress, fy	4.110E+08
Weight per unit Volume	23451.	Concrete strength (Cylinder), fc	25000000
Modulus of Elasticity	Dir 1	3.053E+12	Shear steel yield stress, fys
	Dir 2	2.980E+11	Concrete shear strength, fcs
	Dir 3	2.897E+12	1.040E+08
Poisson's Ratio	Plane 12	0.2	
	Plane 13	0.2	
	Plane 23	0.2	
Coeff of Thermal Expan	Dir 1	0.0117	
	Dir 2	0.0117	
	Dir 3	0.0117	
Shear Moduli	Plane 12	1.140E+08	
	Plane 13	1.140E+08	
	Plane 23	1.140E+08	

Buttons: OK, Cancel

Figura 5.2 Definición de materiales ortotrónicos

Se debe definir además el material concreto, con propiedades isotrópicas para ser el material correspondiente a las columnas y vigas.

Una vez que se han definido los materiales, se deben definir los elementos shells y frames. Esto se hace en el menú Define.

Para definir la sección de los shells se debe escoger el submenú Shell sections en el menú Define. Después de seleccionar Add new section aparece el siguiente cuadro de diálogo

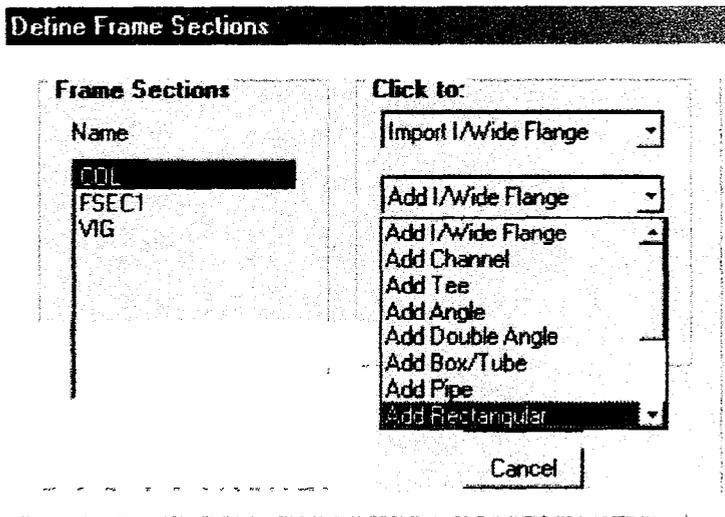
The image shows a dialog box titled "Shell Sections". It contains the following fields and options:

- Section Name:** A text input field containing "EXTMED".
- Material:**
  - Material Name:** A dropdown menu currently showing "EXTMED".
  - Material Angle:** A text input field containing "0".
- Thickness:**
  - Membrane:** A text input field containing ".28".
  - Bending:** A text input field containing ".28".
- Type:**
  - Radio buttons for "Shell", "Membrane", and "Plate". The "Shell" radio button is selected.
  - A checked checkbox for "Thick Plate".
- Buttons for "OK" and "Cancel" at the bottom.

**Figura 5.3** Definición de las secciones Shell

En este cuadro se le debe dar un nombre a la sección así como definir de que material está constituido. El ángulo del material se refiere a cuantos grados a partir de los ejes del elemento se aplican las propiedades

Para definir las secciones de los elementos frame se debe escoger el submenú frame sections... del menú Define. Se muestra el siguiente cuadro de diálogo:



**Figura 5.4** Definición de las secciones Frame

En este cuadro de diálogo se debe presionar sobre la lengüeta inferior y se despliegan ciertas opciones en la que se debe escoger Add Rectangular.

Se visualiza entonces el cuadro de diálogo en el que se ingresan las dimensiones de la sección. Una vez ingresados el ancho y el espesor se debe presionar el botón reinforcement para definir si el elemento es una viga o una columna.

Si se selecciona el tipo columna se deben definir el número de varillas en las dos direcciones y el área de una varilla. Si se selecciona tipo

viga aparece el cuadro de diálogo mostrado en la figura, en el se debe ingresar el recubrimiento y los refuerzos en las cuatro esquinas

**Reinforcement Data**

**Element Class**  
 Column     Beam

**Concrete Cover to Rebar Center**  
 Top                    .04  
 Bottom                .04

**Reinforcement Overrides for Ductile Beams**

	Left	Right
Top	3.8E-4	3.8E-4
Bottom	3.8E-4	3.8E-4

OK                    Cancel

Figura 5.5 Datos del refuerzo

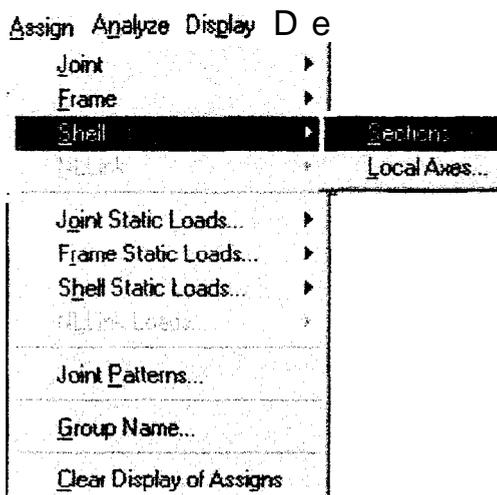
De esta manera se definen las secciones de las paredes y las vigas y columnas

### 5.3 Asignación de propiedades y cargas.

Para asignar cualquier estado de cargas, propiedades o restricciones en general se debe primeramente seleccionar los elementos o las juntas y estando de esta manera pulsar el menú Assign para escoger la propiedad que se requiera.

### Asignación de propiedades:

Para asignar las secciones a los diferentes shells, habiendo seleccionado los elementos se escoge el submenú shell section del menú **Asignar** como se muestra en la figura



**Figura 5.6** Asignación de secciones

Aparece un cuadro de diálogo en el que se escoge la sección requerida y se presiona el botón OK. Después de esto en los elementos en la pantalla se muestra una etiqueta con el tipo de sección que poseen. A los elementos que todavía no se les asigna una propiedad específica el programa por defecto les asigna la sección **SSEC 1** si es del tipo shell o **FSEC 1** si es una viga o columna.

Para asignar una propiedad o sección a los frames, el procedimiento es el mismo descrito anteriormente.

### **Asignación de cargas:**

La carga a la que está sometida la estructura en el momento del sismo, además del peso es la carga dinámica producida en las paredes por la aceleración del agua.

Existen muchas investigaciones para poder simular el efecto del agua confinada en un reservorio cuando este vibra; La mejor aproximación es tomar al fluido como masa puntual unida a las paredes por resortes que tienen una rigidez particular.

La teoría desarrollada al respecto consiste en determinar la rigidez de los resortes del modelo mecánico cuando el tanque es específicamente cilíndrico o rectangular.

Para el reservorio objeto de nuestro análisis es imposible usar esta teoría o alguna semejante debido a que en su interior existe una estructura tubular diseñada para dar rigidez al reservorio

Lo que se debe hacer en este caso es calcular las masas del agua actuante en cada nodo y asignarlas como masas concentradas a éstos para que al momento de existir una aceleración se genere la fuerza inercial,  $F = m \cdot a$ .

Los nodos que se toman en cuenta para asignar las masas son los correspondientes a las paredes exteriores. Esto, para considerar el caso mas crítico posible

Para un segmento modelo de la estructura, se determina el volúmen del líquido y se lo multiplica por la densidad como sigue:

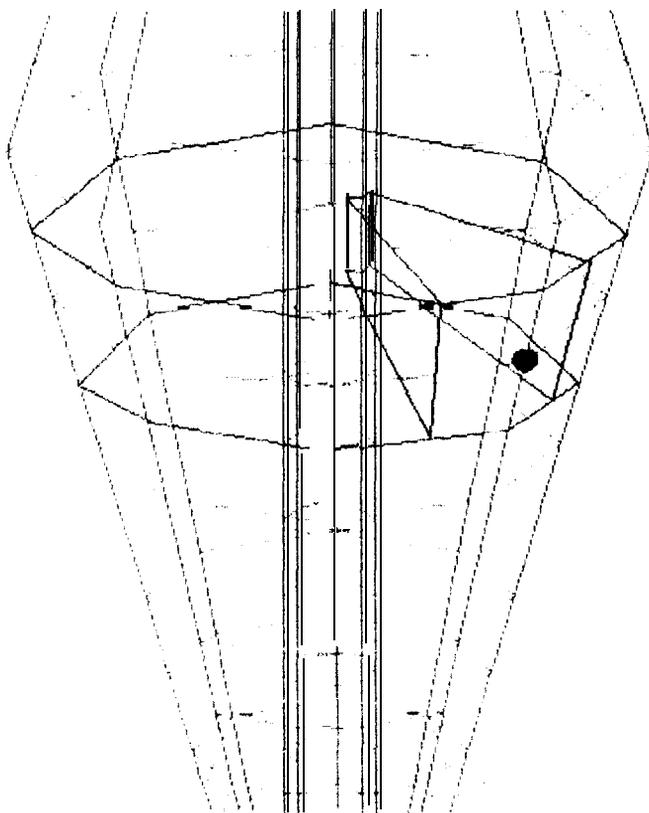


Figura 5.7 Asignación de masas a los nodos

Para el segmento escogido se tienen los siguientes datos:

**D:** Distancia desde el centro hasta el nodo de la pared exterior (diámetro mayor),  $D=5$ .

**d:** Distancia desde el centro hasta el nodo del tubo interno (diámetro menor),  $d=1$ .

**h:** Altura de la columna de agua que actúa sobre el nodo,  $h=3$ .

**$V_i$ :** Volúmen de agua actuante en el nodo que corresponde a la octava parte del volúmen total en el nivel elegido;

$$v_i = V_T / 8 \quad \text{Ec. 5.1}$$

Como el volúmen de un disco hueco es

$$V_i = \frac{\pi(D^2 - d^2)h}{4} \quad \text{Ec. 5.2}$$

El volúmen nodal es:

$$V_i = \frac{\pi(D^2 - d^2)h}{32} \quad \text{Ec. 5.3}$$

Entonces la masa nodal ( $m_i$ ) es :

$$m_i = \rho \cdot V_i \quad \text{Ec. 5.4}$$

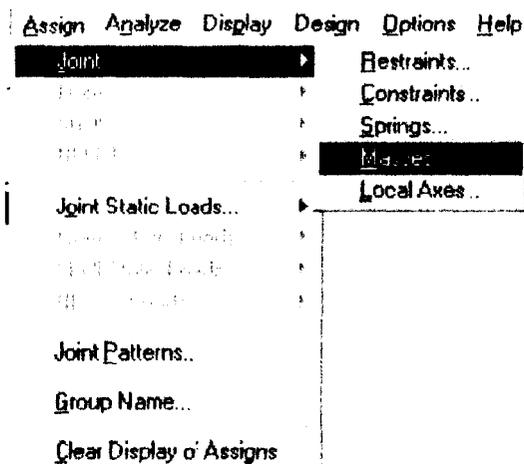
$$m_i = 1000 V_i$$

A continuación se muestran tabulados los datos y cálculos para todos los niveles.

<b>NIVEL</b>	<b>Diámetro</b>	<b>diámetro interior</b>	<b>Altura</b>	<b>Volumen nodal</b>	<b>masanodal</b>
1	1.4	1	1.5	0.14137182	141.37182
2	1.8	1	1.5	0.32986758	329.86758
3	2.2	1	1.5	0.56548728	565.48728
4	2.6	1	1.5	0.84823092	848.23092
5	3	1	1.5	1.1780985	1178.0985
6	3.4	1	2.25	2.33263503	2332.63503
7	4.2	1	3	4.90088976	4900.88976
8	5	1	3	7.068591	7068.591
9	5.8	1	2.375	7.61051631	7610.51631
10	5.4	1	1.75	4.83805784	4838.05784
11	4.9	1	1.75	3.953256779	3953.25678
12	4.5	1	1.75	3.307266102	3307.2661

Tabla 5.1 Masas concentradas en los nodos

Teniendo escogidas las juntas, para asignar las masas puntuales en el programa, se debe seleccionar de la barra principal el menú Assign; después la opción Masses del submenú Joint. Lo dicho anteriormente se muestra en la figura 5.8



**Figura 5.8** Asignación de masas puntuales

### **Asignación de restricciones:**

Hay dos tipos de restricciones; la que sirve para definir las condiciones de borde como tipos de apoyo y la restricción de desplazamiento que es la que restringe desplazamientos relativos

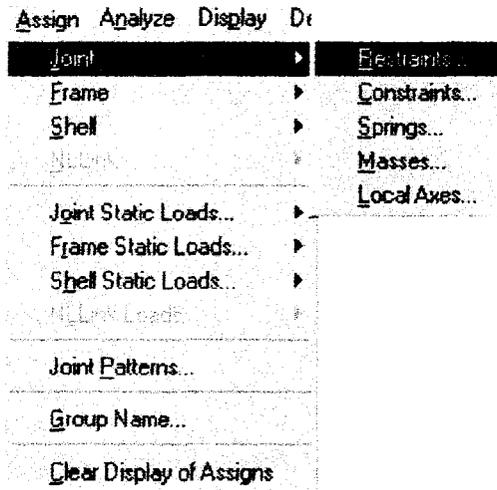


Figura 5.12 Asignación de restricciones

En la estructura en estudio las condiciones de borde son los apoyos empotrados. Para asignarlas se deben seleccionar los nodos de la base, entonces escoger restraints del submenú Joint, con lo que aparece el cuadro de diálogo de la siguiente figura

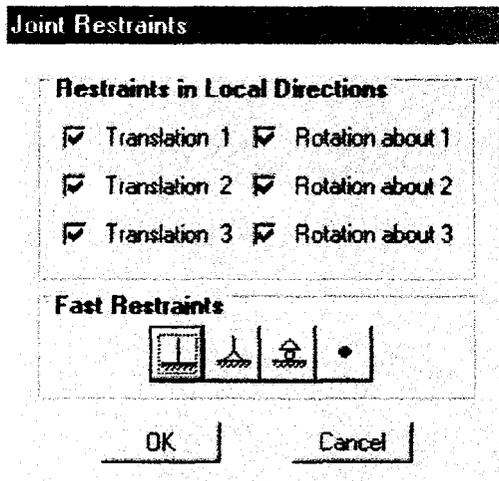


Figura 5.13 Selección de restricciones

En este cuadro uno puede limitar los desplazamientos y rotaciones pulsando en las marcas o seleccionando alguna de las fast restraints que están ubicadas en la parte inferior del cuadro.

En el sistema en estudio se debe asignar una restricción de desplazamiento en el extremo superior de la estructura por que está amarrado con una viga circular y además no está sometido a ninguna carga

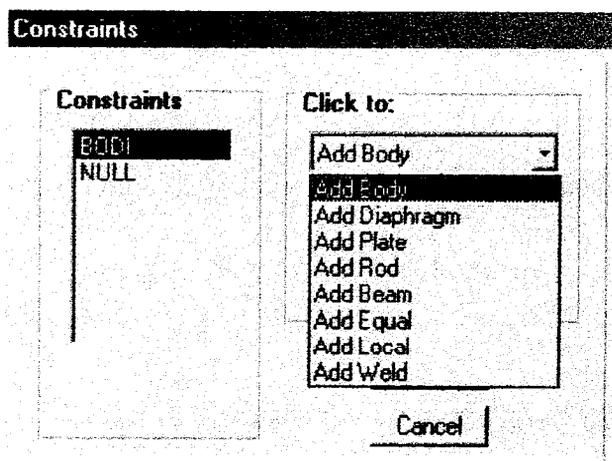


Figura 5.14 Asignación restricciones de desplazamiento

Después de haber seleccionado las juntas del nivel superior se debe pulsar en el botón Constraints del submenú Joints y se debe escoger la restricción que se requiera. Para la estructura se escoge Body Constraint que restringe los desplazamientos relativos entre sí.

#### 5.4 Definición del tipo de análisis.

El análisis propuesto es del tipo dinámico, en el que se tiene que definir la aceleración en la base de la estructura ya sea por medio de un espectro de respuesta determinado en algún código o por medio de un acelerograma de un terremoto que tiene características típicas.

En el análisis espectral se usará al **Código** Ecuatoriano de la Construcción (**CEC**), el cual tiene a la siguiente fórmula para describir el decaimiento de la respuesta del sistema a medida que aumenta el periodo de vibración:

$$C = 1.25S^S/T$$

y al coeficiente  $C_m$  como límite máximo de respuesta

La siguiente tabla muestra los coeficientes de acuerdo al tipo de suelo

<b>Perfil tipo</b>	<b>Descripción</b>	<b>S</b>	<b>C<sub>m</sub></b>
<b>S<sub>1</sub></b>	Roca o suelo firme	1.0	2.5
<b>S<sub>2</sub></b>	Suelos intermedios	1.2	3.0
<b>S<sub>3</sub></b>	Suelos blandos y estrato profundo	1.5	2.8
<b>S<sub>4</sub></b>	Condiciones especiales de suelo	2.0	2.5

Tabla V Coeficiente de suelo S y Coeficiente  $C_m$   
Tomado del **CEC**

El espectro de respuesta del CEC para suelo duro, después de reemplazar  $C_m = 2.5$  y  $S = 1$  se muestra en la siguiente figura

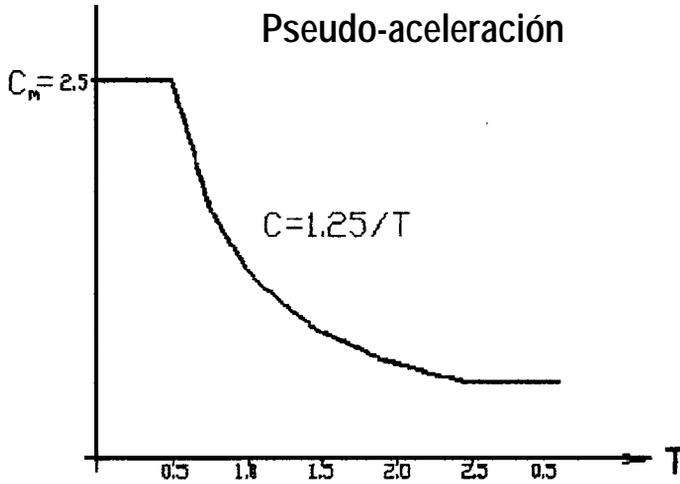


Figura 5.15 Espectro de Respuesta del CEC

El CEC establece que el factor de escala debe ser el **30%** de la gravedad para la aceleración en roca, **osea** 2.94

Asimismo, el **CEC** define a la relación de amortiguamiento como 0.05

Para el análisis en base Time History se utiliza el acelerograma de **Elcentro** cuya figura se muestra a continuación:

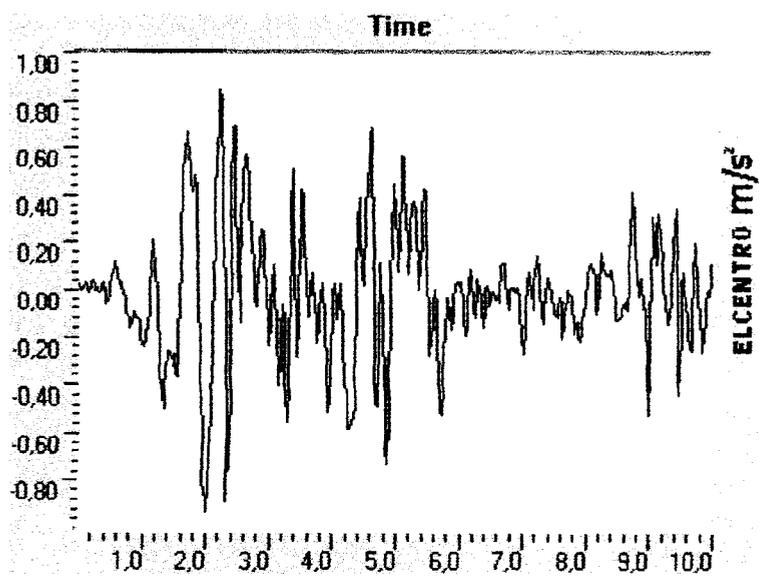


Figura 5.16 Acelerograma Elcentro

### 5.5 Análisis.

Para un estudio dinámico se tienen que setear ciertos parámetros del tipo de análisis modal que se realizará con el fin de determinar la frecuencia natural de vibración así como el desplazamiento modal que luego se necesitarán para encontrar la respuesta de la estructura ante un evento sísmico. Como ya hemos visto hay dos métodos para encontrar los modos; aquí se usará el Load Dependent Ritz (LDR).

El número de modos que se usarán es seis para incluir una buena participación de masa.

El vector de carga para el estudio será la aceleración en dirección X, debido a que la geometría es idéntica en todas direcciones.

Todo esto se puede apreciar en la figura 5.17

**Dynamic Analysis Parameters**

**Number of Modes**

**Type of Analysis**  
 Eigenvectors  Ritz Vectors

**EigenValue Parameters**  
 Frequency Shift (Cents)   
 Cutoff Frequency (Radians)   
 Relative Tolerance   
 Include Residual Mass Modes

**Starting Ritz Vectors**

List of Loads		Ritz Load Vectors
ACCELY	Add → ← Remove	ACCEL X
ACCEL Z		
LOAD1		

**Figura 5.17** Parámetros dinámicos

### **Análisis en base a la Seudo-aceleración Espectral:**

La definición del tipo de análisis en **SAP2000** en base a un espectro de respuesta se la realiza de la siguiente manera:

En el menú Define, escoger Response Spectrum Functions..., con lo que aparece el cuadro de diálogo de la figura

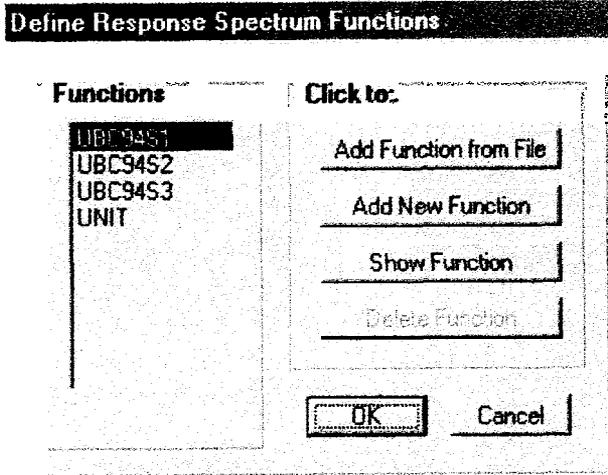


Figura 5.18 Funciones de espectros de respuesta

Como se puede apreciar en la figura, hay varios espectros de respuesta, estos pertenecen al Uniform **Building Code** 94 (**UBC94**), se usa uno u otro dependiendo del tipo de suelo.

Para ingresar el espectro del **CEC** se debe pulsar el botón **Add Function from File** si el espectro está en un archivo que puede ser Excel, o pulsar el botón **Add New Function** si se van a ingresar los valores manualmente como es nuestro caso.

Una vez que los pares aceleración-tiempo han sido ingresados se debe pulsar OK hasta salir al área viva.

Ahora se debe definir el caso de Espectro de Respuesta en el menú Define, submenú Response Spectrum Cases... , con lo que aparece un cuadro de diálogo en el que se debe hacer clic sobre el botón Add New Spectra.

Para visualizar de la mejor manera lo dicho se muestra a continuación la ventana Response Spectrum Case Data

**Response Spectrum Case Data**

**Spectrum Case Name**

**Excitation angle**

**Modal Combination**  
 CQC  SRSS  ABS  GMC  
**Damping**   
 F1  F2

**Directional Combination**  
 SRSS  ABS **Scale Factor**

**Input Response Spectra**

Direction	Function	Scale Factor
U1	CEC	2.94
U2		
U3		

**Figura 5.19** Definición del caso de análisis para el espectro

El ángulo de excitación se mide a partir del eje X en el plano XY

Se escoge el método de combinación modal Complete Quadratic Combination y un amortiguamiento modal de 5%

El factor de escala lo da el código y es de 30% de la gravedad para suelo duro, entonces con nuestras unidades este valor es 2.94

### **Análisis en base a una Historia de Tiempo:**

Para analizar en base a una historia de tiempo se debe seguir los siguientes pasos:

Escoger Time History Functions... del menú Define; aparece una ventana en la que se debe pulsar el botón Add Function from **File**. Se muestra el siguiente cuadro de diálogo:

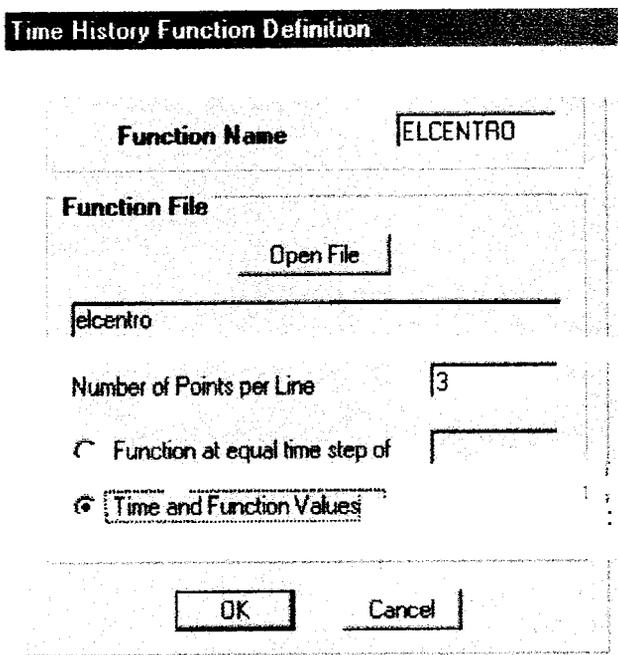


Figura 5.20 Definición de la función de historia de tiempo

El archivo en el cual está la historia de tiempo **Elcentro** debe estar contenido en la misma carpeta del análisis. El número de puntos por línea es tres por que en cada línea hay tres pares tiempo-pseudoaceleración; el archivo **elcentro** consta en los apéndices. Una vez que se han ingresado estos valores presionar el botón OK.

En el menú Define escoger el submenú Time History Cases...; se muestra la ventana Define Time History Cases en la cual se debe presionar el botón Add New History con lo que aparece el cuadro de diálogo Time History Case Data que se muestra en la figura 5.21 la cual **detalla** lo dicho anteriormente

**Time History Case Data**

**History Case Name** ELCENTRO

**Options**

Analysis Type: Linear  Advanced

Modal Damping:

Number of Output Time Steps: 500

Output Time Step Size: 0.02

Envelopes Start from Previous History:

**Load Assignments**

Load	Function	Scale Factor	Arrival Time	Angle
acc dir 1	ELCENTRO	2.94	0	0
acc dir 1	ELCENTRO	2.94	0	0

**Figura 5.21** Caso de análisis de historia de tiempo

Se debe asignar la dirección de la carga así como la función de tiempo requerida. El factor de escala es el valor de la gravedad en las unidades

seleccionadas

El amortiguamiento modal es definido en el código y tiene un valor de

**0.05**

Debido a que la duración del acelerograma Elcentro y los datos de este son de 10 segundos, la salida debe ser de 10 segundos;

entonces se escogen 500 datos de salida con un tiempo entre cada dato de 0.02 segundos

Cuando se hayan ingresados todos estos datos, se debe presionar el botón Add y luego pulsar OK

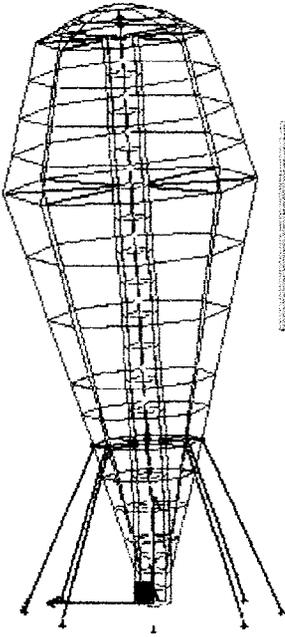
Una vez definido uno o los dos tipos de análisis, se debe ejecutar el comando RUN del menú Analyse.

Aparece una ventana en la cual se muestran el procesamiento de la información y alguna advertencia si se produce. Cuando ya se haya revisado esta ventana se debe presionar OK

## **5.6 Visualización de resultados.**

El periodo de vibración de la estructura y el desplazamiento modal se muestran en la siguiente figura

Mode 1 Period 0.4392 seconds



Joint Modal Correlation			
Joint ID 345	1	2	3
Trans	0.06811	-3.129E-04	-0.01163
Rot	-1.938E-06	0.00292	-2.284E-04

Figura 5.22 Periodo de la estructura

El cortante en la base para el análisis en base al espectro de respuesta se ve en la siguiente figura

GROUP JOINT FORCE SUMMATION				
Eje				
GROUP	LOAD	F-X	F-Y	F-Z
BASE (Sum at X=3,168095E-03 Y=-3,95517E-16 Z=-0,2496063)				
	ESPECTRO	1457,658	2,369E-03	2,181E-03
	COMB1 MAX	2248,035	-218,331	3457,568
	COMB1 MIN	-1833,407	-218,338	3457,561
	COMB2 MAX	1664,972	-204,764	3758,866
	COMB2 MIN	-1250,344	-204,769	3758,862

Figura 5.23 Cortante para el espectro

El cortante para el análisis de Time history se muestra en la siguiente figura

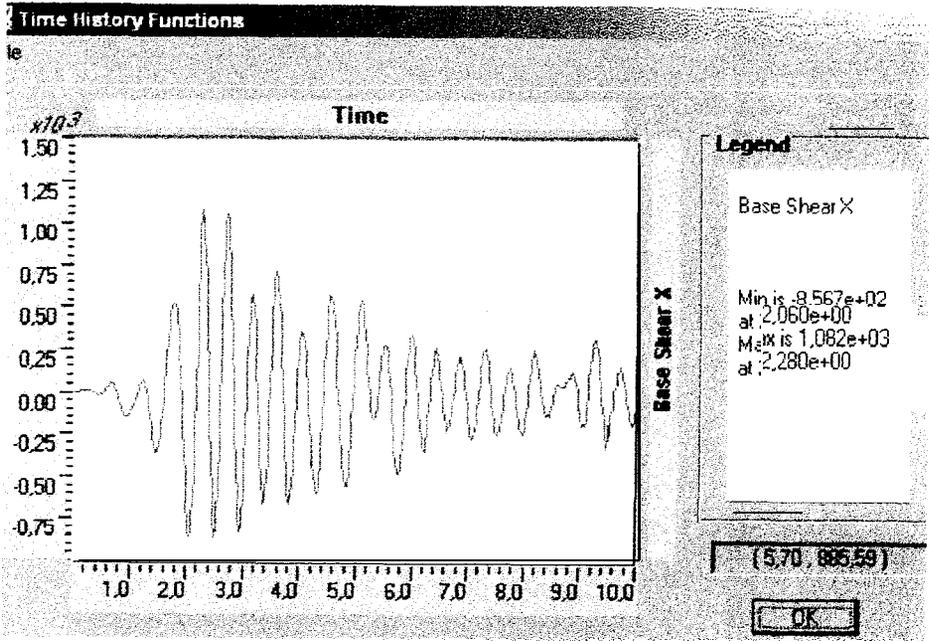


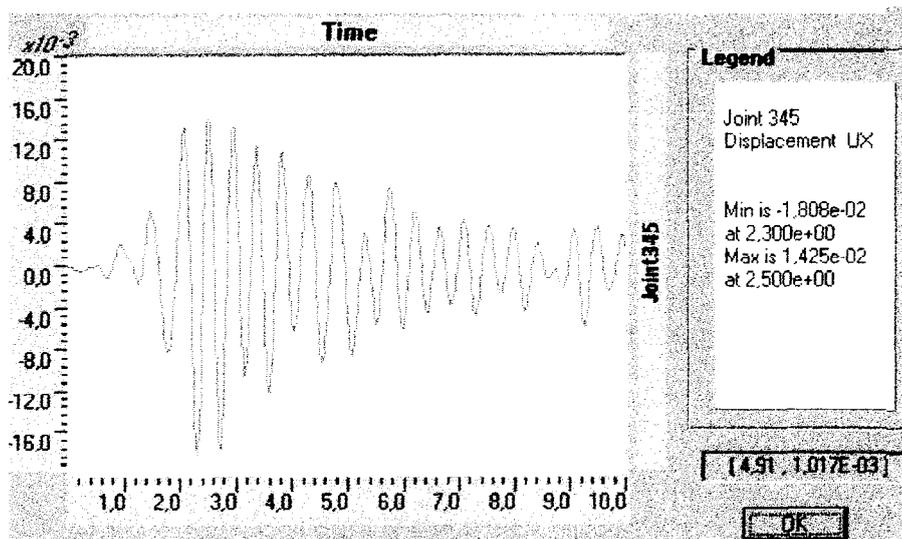
Figura 5.24 Cortante para la Historia de tiempo

El desplazamiento para la junta que mas se mueve en el análisis del espectro se aprecia en la siguiente figura

JOINT DISPLACEMENTS						
JOINT	LOAD	U1	U2	U3	R1	R2
345	ESPECTRO	0,0424	5,680E-04	7,252E-03	1,230E-06	1,820E-03

Figura 5.25 Desplazamiento máximo para el espectro

El desplazamiento de la misma junta en el análisis de Time History se muestra en la siguiente figura



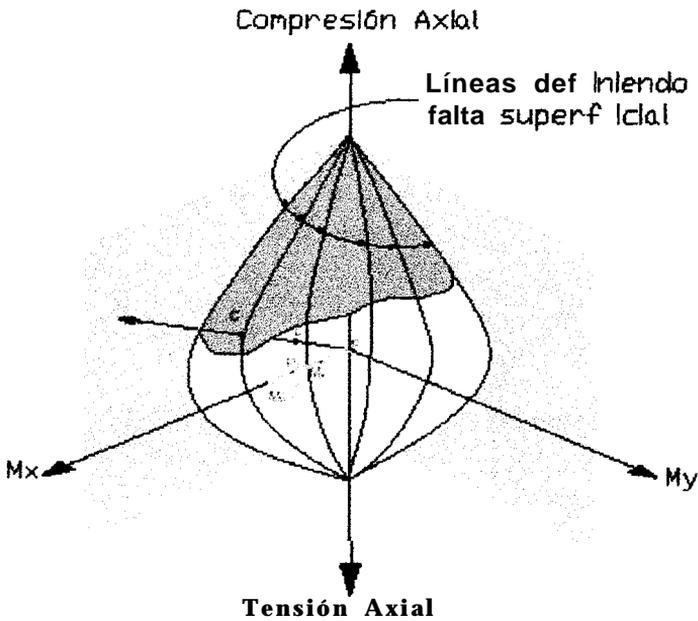
**Figura 5.26 Desplazamiento máximo para Time History**

## 5.7 Verificación del cumplimiento del código de construcción

Una vez que se ha analizado en base al espectro de respuesta dado por el CEC para las características del suelo de la estructura, se debe chequear si las columnas están dentro de los límites permitidos de esfuerzo.

Esto se calcula en base a la generación de las curvas de interacción para cada elemento.

Estas curvas tienen en un eje a la carga axial y en los otros dos a los momentos en los planos del elemento



**Figura 5.27** Curvas de Interacción

El esfuerzo al que está sometido el elemento es dado por :

$$Esfuerzo = \frac{P}{A} + \frac{My \cdot X}{Iy} + \frac{Mx \cdot Y}{Ix} \quad (5.1)$$

Se define como la relación de esfuerzo a la razón entre el esfuerzo sometido y el máximo que puede soportar el elemento. Para el límite, la relación de esfuerzo es la unidad.

En la figura 5.27, se muestra la relación de esfuerzo para las columnas

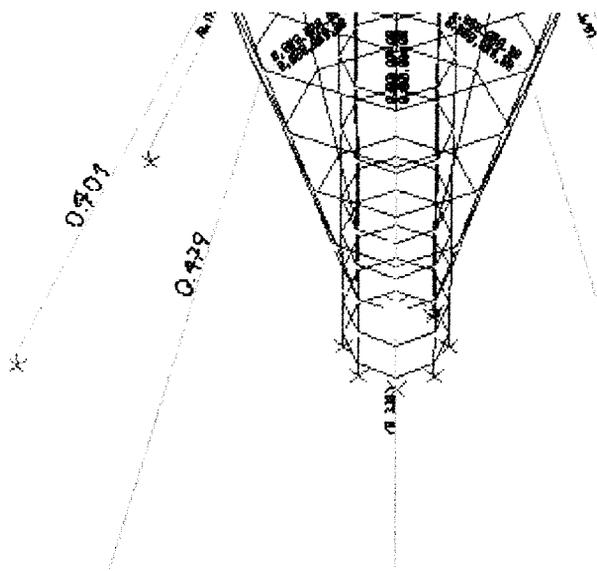


Figura 5.28 Relación de Esfuerzo en columnas

El esfuerzo al que están sometidas las paredes en su punto más crítico durante un sismo es 3.5 KPa, mientras que el esfuerzo límite permitido es 10.4 MPa. Esto se aprecia en la siguiente figura

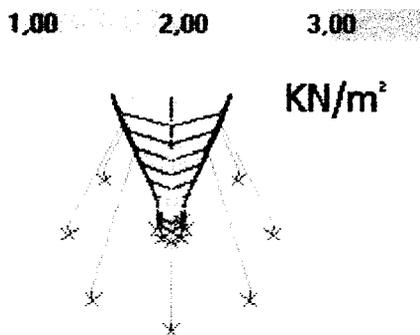


Figura 5.29 Esfuerzos en la Pared

Las vigas no soportan mas carga que su propio peso y la tensión producida por la presión en las paredes; pero esto no es significativo por lo que no se muestran **los** resultados

# CAPÍTULO 6

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

1.- El reservorio de agua cumple con el Código Ecuatoriano de la Construcción con un alto grado de seguridad tanto para las vigas como para las columnas y el esfuerzo en las paredes es muy inferior al límite

2.- La estructura responde muy bien ante el sismo de prueba Elcentro. En esta simulación, el cortante en la base, es comparable al cortante que da el espectro de respuesta de diseño, **asi** como también los esfuerzos

3.- El ser simétrica con respecto a un eje vertical hace que la estructura sea igual de robusta en todas direcciones por lo que los efectos direccionales son despreciados y nada mas se considera una dirección

4.- Se recomienda hacer de la materia Análisis de los Elementos Finitos una materia básica en el pensum de estudios de Ingeniería **Mecánica** debido a la tendencia actual de el uso de esta teoría para analizar toda clase de problemas de ingeniería por el avance vertiginoso en la disponibilidad de tecnología en computación a precios muy económicos

## APÉNDICES

## APÉNDICE A

### ARCHIVO DE DATOS DE TERREMOTO DE PRUEBA ELCENTRO

0.00000	.01080	.04200	.00100	.09700	.01590
.16100	-.00010	.22100	.01890	.26300	.00010
.29100	.00590	.33200	-.00120	.37400	.02000
.412900	-.02370	.471000	.00760	.58100	.04250
.62300	.00940	.66500	.01380	.72000	-.00880
.772010	-.02560	.78900	-.03870	.78910	-.05680
.87200	-.02320	.87210	-.03430	.94100	-.04020
.94110	-.06030	.99700	-.07890	1.06600	-.06660
1.06610	-.03810	1.09400	-.04290	1.16800	.08970
1.31500	-.16960	1.38400	-.08280	1.41200	-.08280
1.44000	-.09450	1.48100	-.08850	1.50900	-.10800
1.53700	-.12800	1.62800	.11440	1.70300	.23550
1.60000	.14280	1.85500	.17770	1.92400	-.26100
2.100700	-.31940	2.21500	.29520	2.27000	.26340
2.32000	-.29840	2.39500	.00540	2.45000	.28650
2.51900	-.04690	2.57500	.15160	2.65200	.20770
2.70800	.10870	2.76900	-.03250	2.89300	.10330
2.87600	-.08030	3.06800	.05200	3.12900	-.15470
3.21200	.00650	3.25300	-.20600	3.38600	.19270
3.461900	-.09370	3.53000	.17080	3.59900	-.03590
3.66800	.03650	3.73800	-.07360	3.83500	.03110
3.80400	-.18330	4.01400	.02270	4.05600	-.04350
4.10600	.02160	4.22200	-.19720	4.31400	-.17620
4.41800	.14600	4.47100	-.00470	4.61800	.25720
4.86500	-.20450	4.75600	.06080	4.83100	-.27330
4.97000	.17790	5.03900	.03010	5.10800	.21830
5.19900	.02670	5.23300	.12520	5.30200	.12900
5.33000	.10890	5.34300	-.02390	5.45400	.17230
5.51000	-.10210	5.60600	.01410	5.69000	-.19490
5.77300	-.02420	5.80000	-.00500	5.80900	-.02750
5.86900	-.05730	5.88300	-.03270	5.92500	.02160
5.98000	.01080	6.01300	.02350	6.08500	-.06650
6.13200	.00140	6.17400	.04930	6.18800	.01490
6.18810	-.02000	6.22900	-.03810	6.27900	.02070
6.32600	-.00580	6.36800	-.06030	6.38200	-.01620
6.40900	.02000	6.45900	-.01760	8.47800	-.00330
6.52000	.00430	6.53400	-.00400	6.56200	-.00990
6.57500	-.00170	6.60300	-.01700	6.64500	.03730
6.68600	.04570	6.71400	.03850	6.72800	.00090
6.76900	-.02880	6.76910	.00160	6.81100	.01130

6. 85200 .00220	6. 90800 .00920	6. 99100 -.09960
7. 07400 .03600	7. 12100 .00780	7. 14300 -.02770
7. 14900 .00260	7. 17100 .02720	7. 22600 .05760
7. 29500 -.04920	7. 37000 .02970	7. 40600 .01090
7. 42500 .01860	7. 46100 -.02530	7. 52500 -.03470
7. 57200 .00360	7. 60000 -.06280	7. 64100 -.02800
7. 66900 -.01960	7. 69100 .00680	7. 75200 -.00540
7. 79400 -.06030	7. 83500 -.03570	7. 87700 -.07160
7. 96000 -.01400	7. 98700 -.00560	8. 00100 .02220
8. 07000 .04680	8. 12600 .02600	8. 12610 -.03350
8. 19500 -.01280	8. 22300 .06610	8. 27800 .03050
8. 33400 .02460	8. 40300 .03470	8. 45800 -.03690
8. 53300 -.03440	8. 59600 -.01040	8. 63800 -.02600
8. 73500 .15340	8. 81800 -.00280	8. 86000 .02330
8. 88200 -.02610	8. 91500 -.00220	8. 95600 -.18490
9. 05300 .12600	9. 09500 .03200	9. 12300 .09550
9. 15000 .12460	9. 25300 -.03280	9. 28900 -.04510
9. 42700 .13010	9. 44100 -.16570	9. 51000 .04190
9. 63500 -.09360	9. 70400 .08160	9. 81500 -.08810
9. 89800 .00640	9. 93900 -.00060	9. 99500 .05860
10. 02200 -.07130	10. 05000 -.04480	10. 05010 -.02210
10. 10500 .00930	10. 20510 .00240	10. 18800 .05100
10. 27200 -.12430	10. 38200 .05870	10. 42400 .01330
10. 45200 .03860	10. 46500 .11640	10. 50700 -.03740
10. 53400 -.05720	10. 64500 .03080	10. 70100 .02230
10. 71400 .05150	10. 77000 .09030	10. 83900 -.01940
10. 92200 .04710	10. 92210 -.06770	10. 96400 -.07940
10. 99100 -.01200	11. 07400 .06080	11. 08800 -.02690
11. 11600 -.04160	11. 20700 .02930	11. 20710 .05520
11. 22700 .07560	11. 26800 .04310	11. 32400 .02080
11. 43400 .11800	11. 57300 -.09990	11. 65600 -.12470
11. 72500 -.20940	11. 72510 -.14180	11. 78000 -.11630
11. 80800 0. 00000	11. 87700 .07620	11. 91900 .05700
11. 98800 .13540	12. 04300 .06730	12. 11300 .08650

□

## APÉNDICE B

### SECCIONES PERTINENTES DEL CEC

#### 4.14 PROCEDIMIENTO DINÁMICO DE CALCULO DE FUERZAS.-

##### 4.14.1 Definición de la acción sísmica.-

4.14.1.1 Un aporte muy importante, y que guarda mucha relación con las recomendaciones del UBC-97, es la **adopción** de varias definiciones de la acción sísmica, con fines de análisis dinámico. Se establece la posibilidad de utilización de un espectro de diseño tipo **código**, establecido por la misma normativa, la utilización de un espectro establecido para un caso específico, o la utilización de una familia de acelerogramas reales o simulados artificialmente. Con ello se abre una puerta hacia el **diseño** de estructuras mediante la aplicación de conceptos de **Ingeniería Sísmica** mas actuales.

4.14.1.2 A diferencia del reglamento **CEC-77**, en el presente código se especifica claramente la forma del espectro de diseño elástico, que se puede utilizar indistintamente para el cálculo estático como para el dinámico. Para el establecimiento del espectro mencionado y de sus límites, se consideraron los siguientes criterios.

a) Estudio de las formas espectrales elásticas de los sismos ecuatorianos registrados en la Red Nacional de Acelerógrafos: A través de la recopilación de los registros de aceleración disponibles de sismos ecuatorianos, especialmente en roca y suelo firme, se estudiaron las formas espectrales de los mismos aplicando técnicas de promediado espectral.

b) Simulación estocástica de acelerogramas artificiales y estudio de formas espectrales: A partir de los registros de aceleración reales disponibles, y de la información sismológica del sismo real y del sismo mayor a simular (caída de esfuerzos, momento sísmico), se simularon registros artificiales mediante procesos estocásticos y funciones de Green. La simulación de varias familias de registros permitió estudiar la forma espectral de sismos mayores.

c) Estudio de las formas espectrales elásticas de las normativas del UBC 94 y 97, de Colombia 1998 y del Perú 1997: Se estudiaron las formas espectrales, las frecuencias de corte, la plataforma superior máxima, la ecuación de la curva de caída y los valores mínimos de las ordenadas espectrales, según el tipo de suelo. Se consideraron los nuevos criterios incorporados en la normativa del UBC-97, que establece la variabilidad de la plataforma máxima del espectro como dependiente, entre otros factores, del tipo de suelo y del valor de la aceleración máxima, así como la tendencia de los códigos a utilizar las curvas de caída del espectro con una **relación  $1/T$**  (T período de vibración), en lugar del  $\sqrt{T}$  del **CEC-77**.

d) Revisión de los estudios clásicos de Seed & Idris y de Seed, **Ugas y Lysmer**, que han servido para la **definición** de buena parte de los espectros de los **códigos** en el mundo, estudiándose las frecuencias de corte del espectro y los valores máximos de la meseta dependiendo del tipo de suelo.

A partir de toda esta información, se estableció la forma espectral. El término  **$S^S$** , aunque no ha sido utilizado por código alguno anteriormente sino únicamente por este, se estableció a partir del ajuste matemático a la envolvente de todos los criterios analizados en **los** literales anteriores. Tanto S como su exponente tienen el mismo valor. Por otro lado el valor de los límites superior  $C_m$  e inferior se establecieron de similar manera, considerando los valores respectivos del UBC-97 para todos los tipos de suelo similares a los del presente código, y para aceleraciones en roca o suelo firme de entre **0.3g** y **0.4g**. Igualmente, debido a la imposibilidad de utilizar la ductilidad para disminuir la ordenada espectral elástica para períodos cortos con fines de diseño, y por criterios de practicidad, se eliminó el ramal izquierdo de ascenso de los espectros elásticos de respuesta típicos y se estableció que la meseta máxima llegue hasta valores de **períodos** de vibración cercanos a cero.

#### 4.14.2 Descripción de los Procedimientos de Análisis.-

Puesto que existe la posibilidad de utilizar diferentes definiciones de la acción sísmica de diseño, desde espectros hasta registros de aceleración reales o simulados artificialmente, se incrementan las posibilidades de **métodos** de análisis dinámico, sean estos espectrales o paso a paso en el tiempo, y dentro de los rangos elástico o inelástico. Para regular la utilización de estos métodos, se ha adoptado las recomendaciones del UBC-97.

### 4.15 OTRAS ESTRUCTURAS DIFERENTES A LAS DE EDIFICACIÓN

4.151 Es la intención del presente código proporcionar algunos requisitos mínimos que deben aplicarse para el cálculo sísmico de estructuras diferentes a las de edificación. A más de estos requisitos mínimos, deben considerarse aquellos estipulados por códigos y normativas especiales de reconocimiento internacional, aplicables al tipo de estructura en cuestión.

4.152 Período: Puesto que el comportamiento sísmico de estas estructuras puede ser diferente al de las estructuras de edificación, se requiere utilizar métodos apropiados de la dinámica de estructuras para la estimación del período fundamental de vibración. El método 1 del numeral 6.2.4.1 no es aplicable, debido a que ha sido establecido únicamente para estructuras de edificación. No así el método 2 del numeral 6.2.4.2, el cual considera la **distribución** de rigideces en la altura de la edificación al ser necesario establecer las deformaciones laterales debidas a la aplicación de las fuerzas laterales de diseño.

#### 6.11 PROCEDIMIENTO DINAMICO DE CALCULO DE FUERZAS.

6.11 .1 Generalidades: Cuando se utilicen procedimientos de **cálculo** dinámico, éstos deberán cumplir **con** los criterios establecidos en este código. La base del análisis constituirá una representación apropiada de la acción sísmica, de conformidad **con** los principios de la dinámica estructural, tal **como** se describe en el presente código.

6.11.2 La acción sísmica utilizada debe representar, **como** mínimo, a un sismo **con** una probabilidad de excedencia del 10% en 50 años, sin la aplicación del factor de reducción de respuesta R, y puede ser una de las siguientes:

6.11.2.1 El espectro de respuesta elástico normalizado proporcionado en la Figura 4, consistente **con** el tipo de suelo del sitio de emplazamiento de la estructura y considerando los valores de la tabla 3.

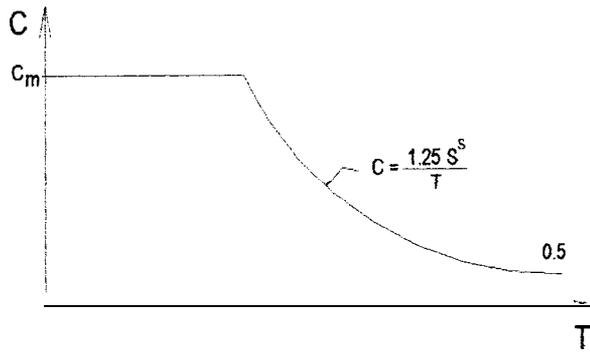
6.11.2.2 Un espectro de respuesta elástico obtenido para un sitio específico, basado en la geología, tectónica, sismología y características del suelo local. El espectro debe desarrollarse para una fracción del amortiguamiento respecto al crítico de **0,05**, e menos que la utilización de otros valores sea consistente con el comportamiento estructural previsto y **con** la intensidad del sismo establecida para el sitio.

6.11.2.3 Acelerogramas desarrollados para el sitio específico que sean representativos de los terremotos reales esperados en la zona. Los espectros de respuesta de **tales** acelerogramas, tanto individualmente como su **combinación**, deben aproximarse al espectro de respuesta descrito en el numeral **6.11.2.1**.

Para estructuras localizadas en el perfil de suelo tipo S4, se debe tomar en cuenta la posible amplificación de la respuesta de la estructura, debido a los efectos de interacción suelo-estructura.

La componente vertical del sismo puede definirse mediante el escalamiento de la componente horizontal de la aceleración por un **factor** de **2/3**.

**Figura 4. Espectro sísmico elástico del presente reglamento, que representa el sismo de diseño.**



611.3 Modelo Matemático: El modelo matemático de la estructura incluirá todos los elementos que conforman el sistema estructural resistente, así como también la distribución espacial de las masas y rigideces en la estructura, con una aproximación tal que sea capaz de capturar las características más significativas del comportamiento dinámico. Para el análisis dinámico de estructuras irregulares se utilizará un modelo tridimensional. Para el caso de estructuras de hormigón armado y de mampostería, en el cálculo de la rigidez se deberán utilizar los valores de las inercias agrietadas  $I_{cr}$  de los elementos estructurales, de similar forma a la descrita para el procedimiento de cálculo estático de fuerzas sísmicas.

#### 6.11.4 Descripción de los Procedimientos de Análisis.

6.11.4.1 Análisis dinámico espectral: Constituye un análisis dinámico elástico de la estructura, que utiliza la máxima respuesta de todos los modos de vibración que contribuyan significativamente a la respuesta total de la estructura. Las respuestas modales máximas son calculadas utilizando las ordenadas de un espectro de respuesta apropiado, que corresponden a los períodos de los modos de vibración. Las contribuciones modales máximas son combinadas de una forma estadística para obtener una aproximación de la respuesta estructural total.

6.11.4.2 Análisis paso a paso en el tiempo: Constituye un análisis de la respuesta dinámica de la estructura en cada incremento de tiempo, cuando la base de la misma está sujeta a un acelerograma específico.

#### 6.11.5 Análisis dinámico espectral.

6.11.5.1 Representación del espectro de respuesta e interpretación de resultados: Los parámetros de respuesta, incluyendo fuerzas, momentos y desplazamientos, obtenidos mediante la utilización de un espectro de respuesta elástico que cumple con los requisitos descritos en el numeral correspondiente a la definición de la acción sísmica, se describirán como parámetros de respuesta elástica. Los parámetros de respuesta elástica pueden ser reducidos de acuerdo con 6.11.5.4.

6.11.5.2 Número de modos: El requerimiento de que se utilicen en el análisis todos los modos de vibración que contribuyan significativamente a la respuesta total de la estructura, puede satisfacerse al utilizar todos los modos que involucren la participación de una masa modal acumulada de al menos el 96% de la masa total de la estructura, en cada una de las direcciones horizontales principales consideradas.

6.11.5.3 Combinación de modos: Las fuerzas máximas en elementos, los desplazamientos, cortantes de piso, fuerzas cortantes y reacciones máximas para cada modo, se combinarán utilizando métodos reconocidos por la dinámica estructural. Cuando se utilicen modelos tri-

dimensionales, los efectos de interacción modal deben ser considerados cuando se combinen los valores modales máximos.

**6.11.5.4 Reducción de los parámetros de respuesta elástica para diseño:** Los parámetros de respuesta elástica pueden ser reducidos para propósitos de diseño, con el limitante de que en ningún caso podrán reducirse los parámetros de respuesta elástica a valores tales que el cortante basal de diseño correspondiente sea menor que el cortante basal de respuesta elástica dividido por R. El valor de R debe obtenerse de la Tabla 7 y podrá ser aplicado en el cálculo del cortante basal, siempre y cuando la estructura sea diseñada cumpliendo con todos los requisitos de diseño sismorresistente acordes con la filosofía de diseño del presente código.

**6.11.5.5 Efectos direccionales:** Los efectos direccionales de las componentes horizontales de los sismos se deben tomar en cuenta de igual forma a la descrita para el método estático. Cuando existe la presencia de voladizos horizontales, los efectos de la componente vertical de los sismos deben considerarse de similar manera a la descrita en el método estático. Alternativamente, la respuesta dinámica vertical puede calcularse utilizando métodos dinámicos; sin embargo, en ningún caso la respuesta utilizada para diseño será menor que la obtenida aplicando el método estático.

**6.11.5.6 Torsión:** El análisis deberá considerar los efectos torsionales, incluyendo los efectos debidos a la torsión accidental especificados para el caso del análisis estático. Cuando se utilizan modelos tridimensionales en el análisis, los efectos de la torsión accidental deben considerarse, mediante una apropiada re-localización de las masas, o mediante la aplicación de los procedimientos estáticos equivalentes descritos en la sección correspondiente al análisis estático de este código.

**6.11.6 Análisis paso a paso en el tiempo.**

**6.11.6.1. Registros de aceleración:** Los análisis paso a paso en el tiempo deben realizarse utilizando las dos componentes horizontales de registros de acelerogramas apropiadamente seleccionados y escalados a partir de los registros de no menos de 3 eventos sísmicos. Estos acelerogramas deben poseer las características de magnitud, distancia a la falla, mecanismos de falla y efectos del suelo, consistentes con aquellos parámetros que controlen el sismo de diseño. Cuando no se disponga de al menos 3 eventos sísmicos, pueden utilizarse acelerogramas apropiadamente simulados para generar el número de registros y de componentes requeridos. Para cada par de componentes horizontales de los acelerogramas, debe construirse la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los espectros característicos del sitio, para una fracción del amortiguamiento respecto al crítico de 0,05. Los acelerogramas deben ser escalados de tal forma que el valor promedio de los espectros provenientes de la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de los espectros de los registros no se encuentre por debajo del espectro amortiguado al 5% del sismo de diseño para períodos entre  $0,2 T$  y  $1,5 T$ , siendo T el período fundamental de la estructura, medido en segundos. Ambas componentes de los acelerogramas deben aplicarse simultáneamente al modelo, a fin de considerar efectos torsionales.

Los parámetros de interés deben calcularse para cada paso de tiempo del registro dato. Si se realizan los análisis para los 3 pares de registros, se tomarán para el diseño la respuesta máxima de los parámetros de interés. Si se realizan 7 o más análisis paso a paso en el tiempo, se utilizará para el diseño el valor promedio de los parámetros de respuesta de interés.

**6.11.6.2 Análisis elásticos paso a paso en el tiempo:** Los análisis elásticos paso a paso en el tiempo deben cumplir con los requisitos especificados en este código para realizar análisis dinámicos, construir modelos matemáticos de las estructuras, definir la acción sísmica, el número de modos, la reducción de los parámetros elásticos de respuesta a efectos de diseño, los efectos direccionales, de torsión y de registros de aceleración. Los parámetros de respuesta obtenidos a partir de análisis elásticos paso a paso se denominarán parámetros de respuesta elástica, y pueden reducirse de conformidad con lo dispuesto en este código para el caso de análisis dinámicos.

**6.11.6.3 Análisis no-lineales paso a paso en el tiempo:** Los análisis no-lineales paso a paso en el tiempo deberán cumplir con los principios establecidos por la dinámica estructural, y los

acelerogramas a utilizar **deberán** cumplir con los mismos requisitos especificados en 6.11.6.1. Las capacidades y las características de los elementos estructurales no-lineales **deberán** modelarse de manera consistente con datos experimentales **o** mediante análisis adecuadamente **sustentados**. La respuesta máxima **inelástica** en desplazamientos no **deberá** ser reducida y cumplirá con los límites establecidos anteriormente en este código.

6.11.6.4 Revisión del diseño cuando se utilice análisis no-lineal paso a paso en el tiempo: Si se realiza un análisis no lineal paso a paso con el fin de justificar un diseño estructural, se **deberá** efectuar una revisión del **diseño** de la estructura por parte de un equipo independiente de ingenieros que incluyan 8 personas ampliamente reconocidas y experimentadas en métodos de análisis sísmicos. La revisión del **diseño** de la estructura **deberá** incluir, pero no limitarse a lo siguiente:

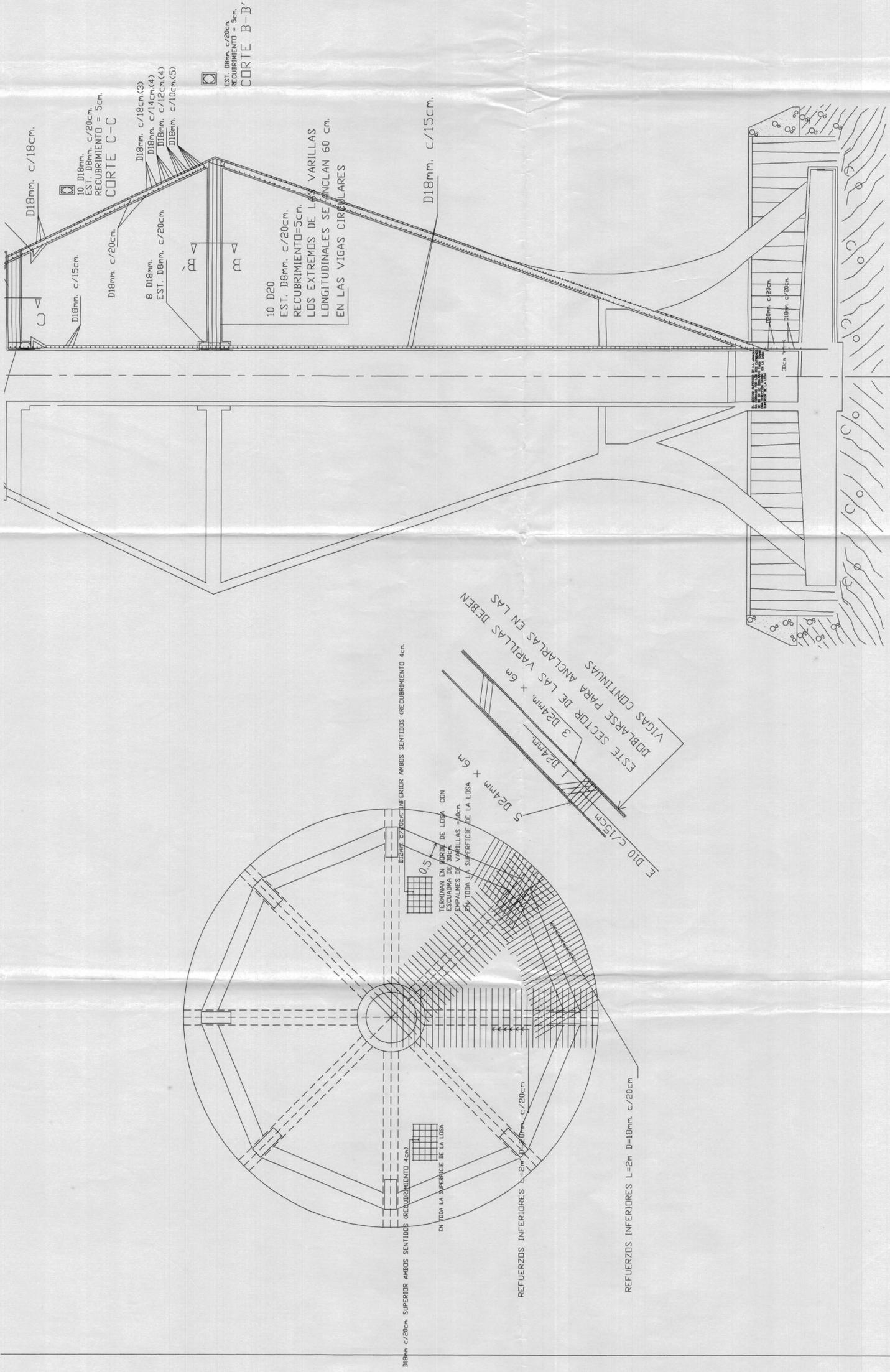
- Revisión de los criterios aplicados **par8** la obtención de un espectro **par8** el sitio de emplazamiento **y/o** para la generación de acelerogramas.
- Revisión del **diseño** preliminar de la estructura (previo a la aplicación del análisis no-lineal)
- Revisión del **diseño** final de la estructura y de todos los criterios de análisis **empleados**.

La memoria de cálculo incluirá, a más de los cálculos y los planos de detalle, un escrito firmado por todos los miembros del equipo independiente de ingenieros que reelizó la revisión, en el que se certifique que todas las revisiones descritas se han realizado.

## BIBLIOGRAFÍA

- 1 EDWARD L. WILSON, Three Dimensional Static and Dynamic Analysis of Structures, Computers and Structures, **Inc**, Third Edition, 1999
- 2 THOMSON WILLIAM T., Theory of **Vibration** with Applications, Prentice Hall, Second Edition, 1981
- 3 BERKELEY, California, **SAP2000, Basic Analysis Reference**, Computers and Structures, Versión 7, 1998
- 4 FREDERICK S. MERRITT, Manual Integral para Diseño y Construcción, **MacGraw Hill**, Tomo 1, Cuarta Edición
- 5 **INEN** 2000, Código Ecuatoriano de la Construcción, Peligro sísmico, Espectros de **Diseño** y Requisitos Mínimos de Cálculo para Diseño **Sismo-Resistente**.

6. THORNTON PETER A, **Engineering Materials**, Prentice Hall, Second Edition, 1990
  
7. STREETER, Mecánica de Fluidos, **MacGraw Hill**, Octava Edición
  
8. CONSTANTINE C. SPYRAKOS, Fínite Element Modeling in Engineering Practice,



FECHA	NOMBRE	DIBUJO N°
DIBUJO 02/03/01	D. Z. M.	General
DISEÑO 02/03/01	D. Z. M.	
REVISO 02/03/01	Ing. Orces	
ESCALA	RESERVORIO DE AGUA DE LA ESPOL Plano estructural	
1:125	SISTEMA	
PESO		

# ESPOL