DISEÑO ESTRUCTURAL DE UN EDIFICIO DE 15 PISOS DE ESTRUCTURAS METÁLICAS CON APLICACIÓN DEL PROGRAMA SAP 2000 APLICANDO EL MÉTODO LRFD.

Miguel Angel Tisalema Sisa[1], José Mancero Gando[2].

[1] Egresado de Ingeniería Civil.
[2] Director de Tesis. Ing. Civil. Titulado en la ESPOL, Profesor de la ESPOL.

ABSTRACT.-

Fundamental aspects of the calculation of the seismic forces are presented according to CEC 2000 for a building of metallic structure of 15 floors. In the first place it is carried out a static analysis, then a spectral modal analysis, and finally the analysis time history with the acelerograma the Center. they are compared and conclusions are obtained. Complementarily it is carried out the control of the drift and of the effect p-delta.
After carrying out the structural analysis you proceeded to design the connections. In this case the connections are welds. Finally it was carried out the analysis iteration soil-structure for the foundation. The foundation to be analyzed is a foundation mat on piles that they work to friction and point. All the carried out analyses were made with the program SAP 2000 Nonlinear Version 7.21. it Programs that it was facilitated by the Engineer Pablo Caiza Sánchez Investigating Professor of the Center of Scientific Investigations "CEINCI" of the Polytechnic Superior School of the Army

RESUMEN.-

Se presentan aspectos fundamentales del cálculo de las fuerzas sísmicas según CEC 2000 para un edificio de estructura metálica de 15 pisos. En primer lugar se realiza un análisis estático, luego un análisis modal espectral, y finalmente el análisis tiempo historia con el acelerograma el Centro. Se comparán y se obtienen conclusiones. Complementariamente se realiza el control de la deriva y del efecto p-delta.
Después de realizar el análisis estructural se procedió a diseñar las conexiones. En este caso las conexiones son soldadas. Finalmente se realizó el análisis iteración suelo-estructura para la cimentación. La cimentación a ser analizada es una losa de cimentación sobre pilotes que trabajan a fricción y a punta. Todos los análisis realizados se hicieron con el programa SAP 2000 Nonlinear Versión 7.21. Programa que fue facilitado por el Ing. Pablo Caiza Sánchez Profesor Investigador del Centro de Investigaciones Científicas "CEINCI" de la Escuela Superior Politécnica del Ejército

INTRODUCCIÓN.-

En la actualidad existe mucha preocupación por el uso adecuado de la normativa sísmica del CEC 2000 pues si bien ésta se considera de avanzada, algunos puntos de su aplicación resultan obscuros. Con el fin de aclararlos se presenta el cálculo de las fuerzas sísmicas para un edificio de estructura metálica de 15 pisos.
El diseño sismo-resistente es un tema tan amplio e inexplorado que existen grandes dificultades en decidir que criterio de diseño y que métodos analíticos deben aplicarse a determinado proyecto. En estos tipos de edificaciones se debe diseñar bien la unión

viga-columna, esto es llevar a cabo un buen análisis de la conexión y ver cual es el comportamiento de los esfuerzos producidos en los cordones de la soldadura. Este tipo de análisis se deberá hacer para carga cíclica.
En calidad de estudiante de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Me sentí en la necesidad de desarrollar hojas electrónicas aplicadas al diseño de conexiones soldadas en uniones viga-columna. El análisis sísmico del edificio fue realizado con asesoramiento del Ing. Pablo Caiza Sánchez de la Escuela Superior Politécnica del Ejército.

CONTENIDO.-

El análisis se ha dividido en los siguientes aspectos:

1. Determinación de fuerzas sísmicas estáticas:
- Cálculo del corte basal. Se hace hincapié en los factores de forma tanto en planta como en elevación.
- Cálculo de las masas y sus puntos de aplicación.
- Distribución de las cargas sísmicas en altura incluyendo momentos torsores accidentales.
2. Determinación de fuerzas sísmicas usando el análisis modal espectral:
- Cálculo del espectro de diseño y aplicación.
- Cómo incluir los efectos de los momentos torsores accidentales.
3. Comparación de resultados.
4. Evaluación de la deriva y del efecto p-delta.

En el caso del análisis estático, los momentos torsores accidentales se aplicaron junto a las cargas sísmicas de piso, en los centros de masa correspondientes, sin cambiarlos a éstos últimos de posición. Sin embargo para el análisis modal espectral, al no poder incluir directamente estos momentos torsores, sí se cambió la posición de los centros de masa. Pero adicionalmente se evaluaron varias alternativas de ubicación. El parámetro usado fue el control de la deriva sobre ejes en las esquinas de la planta del edificio.

Cálculo del corte basal

El CEC 2000 usa la siguiente ecuación para determinar el corte basal:

$$V_{basal} = \frac{ZIC}{R\phi_P \phi_E} W$$

En el caso del edificio que se estudia, varios de los parámetros indicados tienen los siguientes valores:

Tabla I: Parámetros para el cálculo del corte basal

Parámetro	Identificación	Valor	Explicación
Z	Factor de zona sísmica	0.3	La estructura se encuentra en Guayaquil, en la zona sísmica 3
I	Tipo de uso, destino e importancia de la estructura	1	Estructura que no es esencial y/o peligrosa, ni tampoco de ocupación especial
R	Factor de reducción de respuesta estructural	10	Sistema de pórticos espaciales sismo-resistentes, de acero laminado en caliente

El parámetro C, representa la forma del espectro de respuesta elástico y está definido por la siguiente ecuación:

$$0.5 \leq C = \frac{1.25 S^{S}}{T} \leq Cm$$

donde S y Cm son parámetros que dependen del tipo de suelo y T el periodo fundamental de la estructura. Para éste último el CEC 2000 tiene dos métodos para calcularlo, el primero de ellos es adecuado para estructuras de edificación que, con los parámetros para estructuras metálicas es el siguiente:

$$T = 0.09(hn)^{3/4}$$

Donde h_n es la altura máxima de la edificación, medida desde su base. Como h_n=52.5 m, T=1.755 s.
Para la determinación de C en el ejemplo se considera adicionalmente como dato un suelo blando tipo S3, por tanto S=1.5, Cm=2.8 y C=1.31.

Coeficientes de configuración
Para determinar el coeficiente de configuración en planta ϕ_P se usará la siguiente expresión:

$$\phi_P = \phi_{PA} x \phi_{PB}$$

donde ϕ_{PA} es el menor valor hecho de un examen piso por piso de las irregularidades en planta tipo 1, 2 y/o 3, ϕ_{PB} de manera semejante pero considerando las irregularidades en planta tipo 4 y/o 5.
Similarmente para determinar el coeficiente de configuración en elevación ϕ_E se usa la siguiente expresión:

$$\phi_E = \phi_{EA} x \phi_{EB} x \phi_{EC}$$

Donde ϕ_{EA} es el menor valor hecho un examen piso por piso de las irregularidades en elevación tipo 1 y/o 5, ϕ_{EB} de manera semejante pero con las irregularidades tipo 2 y/o 3, ϕ_{EC} en cambio con la irregularidad tipo 4.
Para la estructura analizada se obtuvieron los siguientes valores:

Cálculo del coeficiente de configuración en planta.
Tipo 1: Irregularidad torsional

Tabla II: Cálculo de la irregularidad torsional

Piso	Irregularidad torsional en X				
	Δ1 (cm)	Δ2 (cm)	$1.2\frac{(\Delta 1 + \Delta 2)}{2}$	Δmayor (cm)	Hay irregularidad
15	4.266	5.163	5.6574	5.163	No

En este ejemplo se obtuvo $\phi_{P1} = 1$.
Tipo2 : Entrantes excesivos en las esquinas
Esta estructura no tiene entrantes por lo que $\phi_{P2} = 1$

Tipo 3: Discontinuidad en el sistema de piso

Tabla III Cálculo de la discontinuidad en el sistema de piso

Piso	Área total (m^2)	Área de vacíos (m2)					0.5Área total	Hay irregularidad
		Escalera	Ascensor 1	Ascensor 2	Traga luz	Total		
15	720	8.7	7.7	2.8	38.8	58.0	360	No

En esta estructura se determinó que $\phi_{P3} = 1$.

Tipo 4: Desplazamiento del plano de acción de elementos verticales
En esta estructura, por la presencia de diferentes vacíos esta irregularidad sí existía, por tanto $\phi_{P4} = 0.8$.

Tipo 5: Ejes estructurales no paralelos
En los planos arquitectónicos se tienen todos los ejes paralelos tanto en sentido X como en sentido Y. Esta irregularidad no existe y por tanto $\phi_{P5} = 1$.
De acuerdo a lo anterior se tiene que el factor de irregularidad por configuración en planta se calcula así:

$$\phi_{PA} = 1$$

$$\phi_{PB} = 0.8$$

$$\phi_{P} = 1 * 0.8 = 0.8$$

Cálculo del coeficiente de configuración en elevación.
Tipo 1: Piso blando (irregularidad en rigidez)

Tabla IV a: Cálculo de la rigidez lateral de piso

Piso	Inercias											
	Columnas A				Columnas B				Columnas C			
	$I_x(in^4)$	$I_y(in^4)$	N_x	N_y	$I_x(in^4)$	$I_y(in^4)$	N_x	N_y	$I_x(in^4)$	$I_y(in^4)$	N_x	N_y
S	5440	1990	3	1	10800	3680	10	6	14300	4720	16	0
M	5440	1990	3	1	10800	3680	10	6	14300	4720	16	0

Donde S es el sótano y M el mezanine, Ix es la inercia respecto al eje mayor, Iy es la inercia respecto al eje menor, Nx es el número de columnas con inercia respecto a su eje mayor y Ny es el número de columnas con inercia respecto a su eje menor.
Obsérvese que se usan como unidades las pulgadas, pues al tratarse de una estructura metálica se requieren tablas como las del AISC y no se desea cambiar las unidades en que vienen hechas.

Tabla IV b: Cálculo de la rigidez lateral de piso (Continuación)

Piso	Altura (in)	E (ksi)	$\sum \frac{12EI_x}{L^3}$ (A)	$\sum \frac{12EI_y}{L^3}$ (B)	Rigidez lateral de piso (A)+(B)
S	137.795	29000	9342.51	15733.6	25076.1
M	118.11	29000	14835.6	24989.3	39819.9

Se observa que la rigidez lateral del sótano, 25076.1 es menor al 70% de la rigidez lateral del mezanine igual a .7*39819.9=27873.93. Por lo tanto se usará $\phi_{E1} = 0.9$.
Tipo2: Irregularidad en la distribución de las masas

Tabla V: Cálculo de las masas en pisos en donde cambia el tamaño de las vigas

Piso	**Peso (Ton)**	**Masa (Ton-masa)**	**1.5 Masa**	**$M_i>1.5M_{i+1}$**
11	533	54.33	81.50	No
10	535.455	54.58	81.87	
6	535.455	54.58	81.87	No
5	600.614	61.22	91.84	
Mezanine	655.816	66.85	100.28	No
Sótano	710.558	72.43	108.65	

En este edificio no existe esta irregularidad. Por tanto $\phi_{E2} = 1$.
Tipo 3: Irregularidad geométrica
En este edificio se encuentra que los primeros pisos tienen un largo de 29.05 metros y que, los pisos superiores en cambio 25.7 metros. La diferencia entre estos dos valores es del 13%, inferior al 30%. Por tanto $\phi_{E3} = 1$.
Tipo 4: Desalineamiento de ejes verticales
Las columnas de esta estructura siguen todas ejes verticales continuos. Por tanto no existe esta irregularidad y $\phi_{E4} = 1$.
Tipo 5: Piso débil – Discontinuidad en la resistencia

Tabla VI a: Cálculo de la resistencia de piso (en sentido X)

Piso	Módulo de sección											
	Col. Esquinera				Col. Perimetral				Col. Interior			
	Sx(in^3)	Sy(in^3)	N_x	N_y	Sx(in^3)	Sy(in^3)	N_x	N_y	Sx(in^3)	Sy(in^3)	N_x	N_y
S	607	241	3	1	1040	423	10	6	1280	527	16	0
M	607	241	3	1	1040	423	10	6	1280	527	16	0

Tabla VI b: Cálculo de la resistencia de piso (en sentido X) (Continuación)

Piso	Fy (ksi)	$\Sigma(S_x$*Fy) (A)	Σ (S_y*Fy) (B)	Resistencia (A)+(B)
S	36	1177236	100044	1277280
M	36	1177236	100044	1277280

En donde S es el sótano y M el mezanine, Sx es el módulo de la sección respecto a su eje local mayor y Sy lo mismo pero respecto al eje menor, Nx es el número de columnas con módulos iguales a Sx y Ny el número de columnas con módulos iguales a Sy, Fy es el esfuerzo de fluencia. En la tabla se han usado unidades inglesas por no cambiar los valores de las tablas del AISC.

Se observa que no hay variación de resistencia entre los dos pisos. Por tanto $\phi_{E5} = 1$.
El factor de configuración en elevación está dado por la siguiente expresión:

$\phi_{EA} = 0.9$

$\phi_{EB} = 1.0$

$\phi_{EC} = 1.0$

$\phi_{E} = 0.9 * 1.0 * 1.0 = 0.9$

Por último se determinó W como el peso total en la estructura por cargas permanentes. No se incluyó cargas temporales siguiendo las recomendaciones del CEC 2000 para este tipo de edificación.

El cortante basal calculado es el siguiente:

$$V_{basal} = \frac{0.3 * 1 * 1.31}{10 * 0.8 * 0.9} W$$

$$V_{basal} = 0.055W = 0.055 * 10000Ton = 545Ton$$

Este cortante se distribuye en cada piso de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$F_i = \frac{W_i h_i}{\sum W_i h_i} \left(V_{basal} - F_t \right)$$

$$F_t = 0.07 * V_{basal}$$

donde W_i es el peso por carga permanente en el pìso i, h_i es la altura del piso i respecto a la base del edificio y F_t es una fuerza en el tope del edificio debido a que el periodo fundamental T de la estructura es mayor a 0.7 seg.

Los cálculos se ordenan en una tabla como la siguiente:

Tabla VII: Cálculo de las fuerzas sísmicas en cada piso

Nivel x	h_x	W_x	$W_x.h_x$	$\frac{W_x.h_x}{\sum W_x.h_x}$	F_x
15	45,5	533	24251,5	0,121	112,7
14	42,5	533	22652,5	0,113	52,0
13	39,5	533	21053,5	0,105	48,3
12	36,5	533	19454,5	0,097	44,7
11	33,5	533	17855,5	0,089	41,0
10	30,5	535,455	16331,3775	0,082	37,5
9	27,5	535,455	14725,0125	0,074	33,8
8	24,5	535,455	13118,6475	0,066	30,1
7	21,5	535,455	11512,2825	0,058	26,4
6	18,5	535,455	9905,9175	0,049	22,7
5	15,5	600,614	9309,517	0,047	21,4
4	12,5	600,614	7507,675	0,038	17,2
3	9,5	600,614	5705,833	0,029	13,1
2	6,5	655,816	4262,804	0,021	9,8
1	3,5	710,558	2486,953	0,012	5,7
		∑= 8510,491	200133,5195		516,5

Debe indicarse que adicionalmente es necesario incluir un momento accidental por piso. Estos momentos son debidos a cambios accidentales que podrían darse en la distribución de las masas en un piso. El CEC 2000 establece que debe ser igual a la fuerza sísmica por un brazo de palanca igual al 5% de la mayor dimensión en planta del edificio perpendicular al sismo de análisis.

Para combinaciones de carga se consideraron las ya conocidas:
0.7 Sx + 0.3Sy
0.3Sx + 0.7 Sy
Adicionalmente se incluyó la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados (SRSS):
$$\sqrt{S_X^2 + S_Y^2}$$

Cálculo del espectro de diseño y aplicación.
El espectro de diseño se calcula con el CEC 2000. En la figura 1 se tiene el espectro de diseño usado para el análisis modal espectral

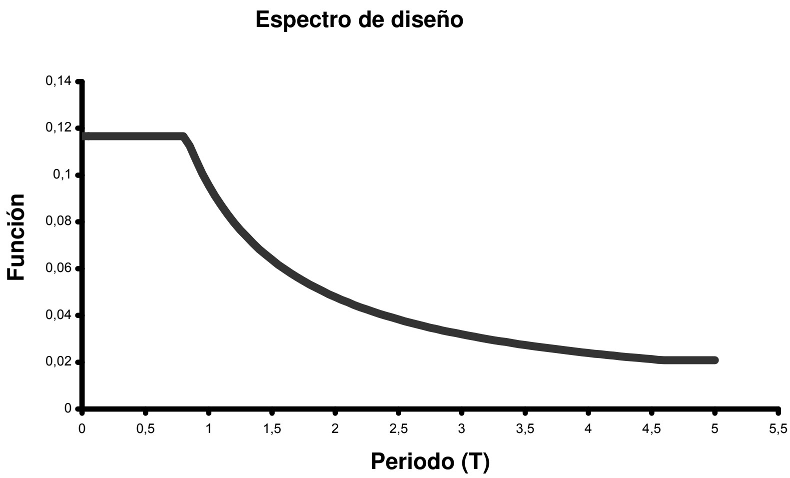

Figura 1. Espectro de diseño usado para el análisis modal espectral.

En la figura 2 se tiene el espectro escalado que se utilizara para el análisis Tiempo-Historia

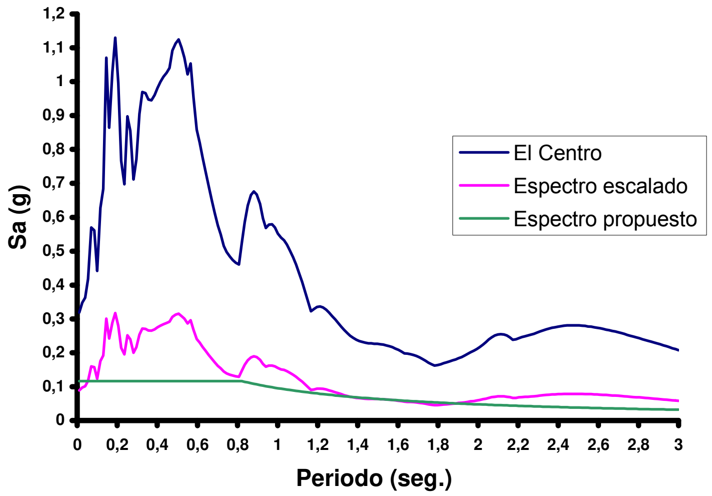

Figura 2. Espectro de respuesta El Centro escalado con respecto al espectro de diseño.

La estructura a ser analizado es el que se muestra en la figura 3.

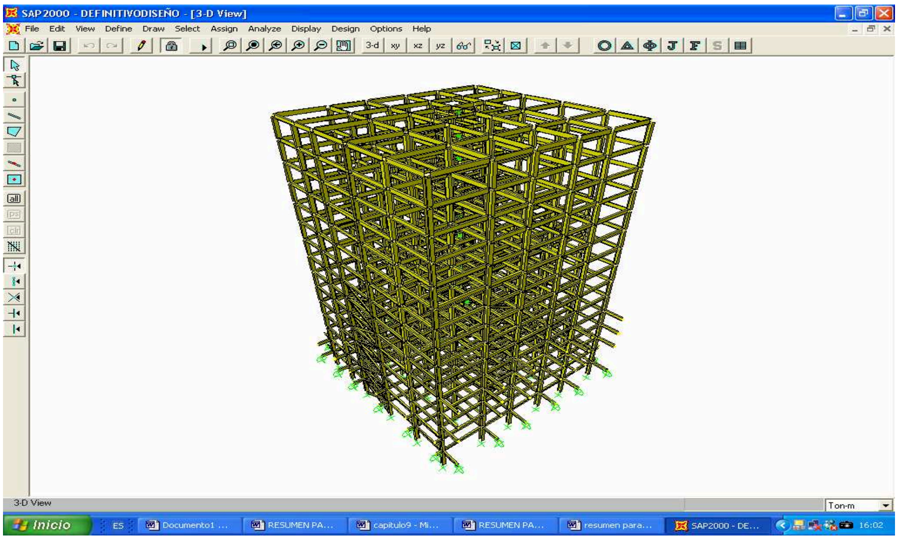

Figura 3.- Modelo tridimensional del edificio.

Comparación de resultados.

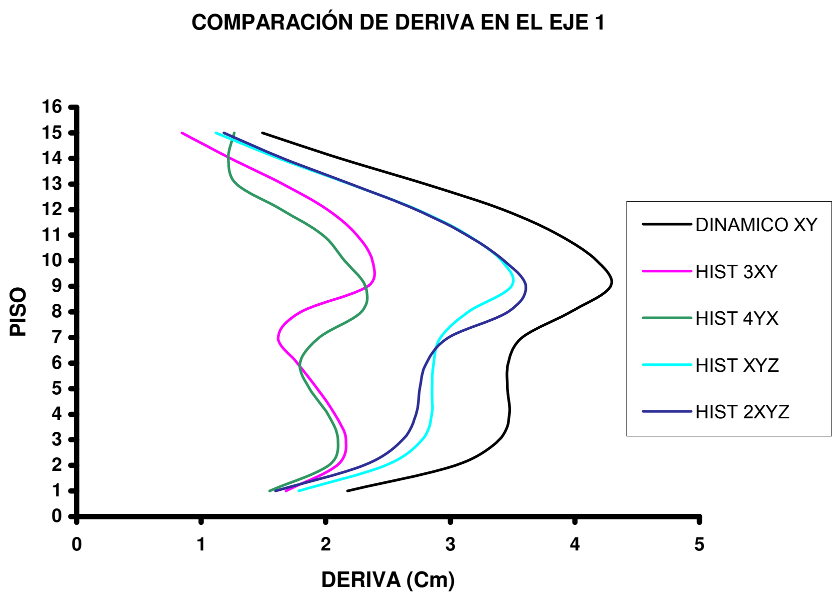

Figura 4.- Comparación de deriva en el eje 1.

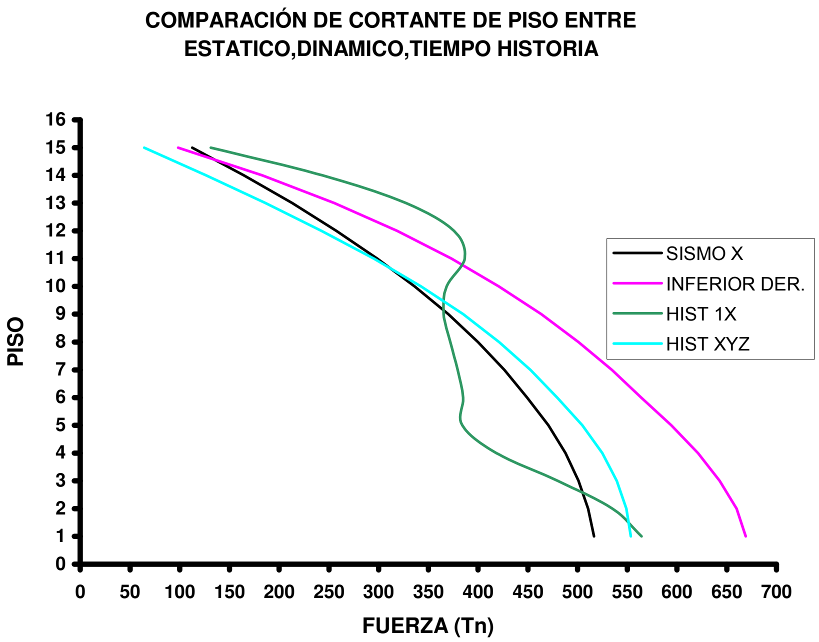

Figura 4.- Comparación de cortante entre los diferentes tipos de análisis.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones:

Se han presentado diferentes alternativas de predimensionamiento de edificios respecto a sus elementos fundamentales vigas, columnas, losas y diagonales, posteriormente se analizaron las ventajas y desventajas de diferentes modelos de análisis: como pórticos resistente a momento, pórtico con diagonales en X, optando por este ultimo para nuestro análisis. Finalmente se enfrento el comportamiento lineal de este tipo de edificio mediante diferentes métodos tales como el análisis sísmico estático, análisis modal espectral e historia en el tiempo, y el efecto P-delta. El estado de carga para comparar resultados fue el sísmico. Este estudio sirvió de ayuda para decidir los métodos de análisis a emplearse en el cálculo de edificio. Del análisis realizado se obtienen las siguientes conclusiones:

- El análisis modal espectral es el que predomina para el análisis sísmico.
- En el análisis modal espectral combinado, las derivas son mayores cuando los momentos torsores accidentales se desplazan de su centro de masa a una distancia igual al 5% de la dimensión en planta del edificio perpendicular al sismo.
- Para definir el espectro de respuesta el Centro se hace uso del programa Degtra, que luego es intercalado con el espectro de diseño que se calcula con el CEC 2000, para que este factor de escalamiento sea utilizado en el análisis tiempo historia y de esta forma poder ver el comportamiento de la estructura con respecto al tiempo.

Recomendaciones:

- Para realizar un análisis tiempo historia se deben tener acelerogramas del sitio, para de esta forma saber cual va a ser el comportamiento real de la estructura debido a un sismo.
- Obtener parámetros dinámicos del suelo para saber con certeza el incremento de esfuerzo de corte y el desplazamiento de la masa del suelo que puede afectar a la cimentación.
- Conocer el periodo de resonancia del suelo. Y verificar que el periodo de la estructura nunca sea igual al periodo de resonancia del suelo, para que no se amplifiquen los efectos del sismo.

REFERENCIAS.-

1. **W.A.Thornton. DESIGN OF SMALL BASE PLATES FOR WIDE FLANGE COLUMNS.**
2. **Abolhassan Astaneh-Asl.W.A. SEISMIC BEHAVIOR AND DESIGN OF GUSSET PLATES.**
3. **Alan Williams. SEISMIC DESIGN OF BUILDING AND BRIDGES.**
4. **D.J. Dowrick. DISEÑO DE ESTRUCTURAS RESISTENTES A SISMOS.**
5. **Minoru Wakabayashi. DISEÑO DE ESTRUCTURAS SISMORRESISTENTES.**
6. **Theodore V. Galambos. Diseño DE ESTRUCTURAS DE ACERO CON LRFD.**
7. **McCormac. DISEÑO DE ESTRUCTURAS METALICAS METODO LRFD.**
8. **John E. Lothers. DESIGN IN STRUCTURAL STEEL.**
9. **Arthur H. Nilson. DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE CONCRETO.**
10. **CEC 2000. CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN.**
11. **CSI, 1997**
    SAP2000 Analysis Reference, Vols. I and II, Computers and Structures, Inc., Berkeley, California, 1997.
12. **ACI, 1999**
    Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary
13. **PCA, 1996**
    Notes on ACI 318-99, Building Code Requirements for Reinforced Concrete, with Design Applications, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, 1996.