

TÍTULO

"ANÁLISIS SISMO RESISTENTE DE UN EDIFICIO DE 15 PISOS Y DISEÑO POR CAPACIDAD"

AUTORES

GUILLERMO CARPIO FREIRE¹

MANUEL GÓMEZ DE LA TORRE GÓMEZ²

EDUARDO INTRIAGO DUEÑAS³

JOSÉ MANCERO GANDO⁴

EDWIN LEUSCHNER CEVALLOS⁵

1 Ingeniero Civil en Estructuras 2000

2 Ingeniero Civil en Estructuras 2000

3 Ingeniero Civil en Estructuras 2000

4 Director de Tópico, Ingeniero Civil, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 1963, Postgrado en Estructuras, Universidad de Lima-Perú, 1974. Profesor de la Espol desde 1983. Profesor de la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil desde 1975. Profesor de la Universidad Politécnica Nacional desde 1974 hasta 1975.

5 Profesor de Tópico, Ingeniero Civil, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 1974, Magister Scientiarum en Ingeniería Sismo Resistente, Universidad Central de Venezuela, Caracas 1976.

Introducción.-

Las etapas del prediseño y diseño de una edificación es de gran interés para los estudiantes de ingeniería civil, mas aún si se supone efectos adicionales a los de cargas verticales como son los efectos sísmicos. Nuestro trabajo presenta un estudio ilustrativo de los procesos de cálculo y diseño de una edificación específica (Pórtico rígido) que puede ser utilizada en cualquier otro tipo de estructura.

Como parte del Trabajo se detalla el prediseño, análisis y diseño de un edificio sismorresistente de 15 pisos de geometría regular. Mostrándose en éste la innovación en la ingeniería sísmica de permitir que

los materiales lleguen a su estado de cedencia ante un evento catastrófico sin que se dé la inestabilidad y colapso de la estructura; esto se logra realizando el diseño por capacidad de los elementos estructurales.

Para el análisis se usó uno de los programas más modernos y útiles en la actualidad, que es el SAP 90.

Con la seguridad que este trabajo servirá como inicio para posteriores estudios en otros tipos de sistemas estructurales que puedan construirse en nuestro país, invitamos al lector a seguir revisando este Tópico.

RESUMEN

Para poder comenzar nuestro análisis se necesita la geometría de la edificación. En esta etapa debe tomarse en cuenta la distribución y disponibilidad de espacios, funcionabilidad y sencillez para el mismo. Generalmente se asigna para esta etapa a un arquitecto, y en algunas ocasiones el mismo propietario se hace carga de esto.

Luego de esto procedemos a realizar el análisis estático y dinámico de la estructura. El análisis estático se hizo mediante el uso de métodos simplificados de cálculo de resultantes y mediante el uso de los códigos correspondientes. El análisis dinámico se hizo mediante el uso del programa Sap90. Con los resultados de estos dos análisis procedimos al dimensionamiento y refuerzo de los elementos estructurales, superponiendo en ambos casos cargas verticales con efectos sísmicos.

Adicionalmente a esto se supuso articulaciones plásticas en los extremos de las vigas y columnas mediante lo cual se diseño los estribos de estos elementos para contrarrestar el cortante generado en un sismo de gran magnitud; esto se denomina diseño por capacidad.

Finalmente presentamos una propuesta para el tipo de cimentación que requiere el edificio en una zona céntrica de Guayaquil. Esto puede servir para un estudio posterior en el cual se incluya el efecto sísmico en el armado de los pilotes. Dicho efecto se puede modelar en el Sap90.

CONTENIDO

1.-Evolución estructural y diferentes tipos de edificios altos:

No hay duda que los Romanos fueron los más grandes constructores de la antigüedad. Y en las ciudades de Roma no era raro encontrar edificios de pesada mampostería de 10 pisos de altura.

En los siglos posteriores se usaron como materiales de construcción la madera y la mampostería. Con ninguno de ellos, y tampoco con su combinación podía alcanzarse más allá de unos cuantos pisos altos.

Dos nuevos materiales surgen en el panorama mundial de la construcción:

*La obtención del acero a partir de la aleación del hierro y el carbono a mediados del siglo XVIII permitió el auge de la metalurgia. Es con este material que se construyeron las obras monumentales más famosas del siglo: Puentes, edificios, hoteles, estaciones de ferrocarril.

*La invención del concreto reforzado, que está acreditada a Joseph Monier, un jardinero de París el que construyó tanques de concreto con refuerzo de alambre en espiral en 1861. Y en 1861 también, Coignet anunció sus principios para reforzar elementos de concreto, y propuso la construcción con este material de vigas, arcos, tubos, etc.

En 1850 se desarrolla la industria y producción del acero en el Norte-Este de Estados Unidos y se comienza a construir edificios de mayor altura con el uso del acero.

En los años 1890, el concreto se estableció como un material común de construcción en Europa. Auguste Perret fue el primero en usar una estructura de concreto reforzado en el edificio de apartamentos FRANKLIN de París 1903.

Uno de los más ilustres representantes de los edificios altos es el Empire State que durante 4 décadas fue el edificio más alto con sus 102 pisos con Pórticos de acero con luces relativamente pequeñas rigidizadas con paredes de mampostería que fue terminado el 1 de mayo de 1931.

Sin duda, los años 50 y 60 atestiguaron un desarrollo sin precedentes en la construcción de edificios altos de concreto reforzado.

2.- PREDISEÑO DE UN EDIFICIO SISMORRESISTENTE.-

Para realizar el diseño definitivo de un edificio de altura primero hay que definir algunas variables como son el sistema constructivo, las alturas de entrepiso, la luz de los paneles, etc. Un cálculo aproximado y sencillo se logra mediante un prediseño.

Prediseño:

Es la etapa más importante en el proyecto de cualquier edificio, y debe caracterizarse por su sencillez y rapidez.

Se comparan sistemas constructivos, por ejemplo losa plana o losa reticulada y mediante cálculos sencillos se define el diseño óptimo tomando en consideración también limitaciones de tipo arquitectónico, necesidad de espacio para diferentes instalaciones, uso del edificio y limitantes del tipo económico.

Principales sistemas estructurales para cargas:

a-) Verticales

Losa, Vigas, muros , columnas y cimientos

b-) Horizontales

Pórticos rígidos, paredes de cortante, sistemas de tubos y sistemas diagonales.

3.- PORTICO RIGIDO:

3.1.- RANGO DE APLICACION

El pórtico rígido tiene ventajas y desventajas para cargas sísmicas.

Sus ventajas son:

- a) Ductilidad: capacidad de deformación.
- b) Con poco dinero se puede incrementar su resistencia para edificios de hasta 50 pisos.

Sus desventajas son:

- a) Congestión de armaduras.
- b) Flexibilidad mas ductilidad del pórtico provoca daños no estructurales (paredes) y daños estructurales (columnas cortas).

Este sistema estructural se ha considerado adecuado hasta 20 pisos para edificios de concreto y hasta 30 pisos para edificios en acero.

4.- SELECCIÓN DEL SISTEMA DE PISO

La selección del sistema de piso afecta significativamente el costo de la estructura, y también el desempeño de su sistema de soporte de las cargas horizontales.

Comúnmente, las estructuras se analizan para cargas laterales suponiendo que el sistema de piso actúa como un diafragma infinitamente rígido en su propio plano, que distribuye las fuerzas horizontales a los elementos resistentes a las cargas laterales. Esta suposición no es válida para todas las configuraciones y geometría de los sistemas de piso. Los análisis que toman en cuenta la flexibilidad en su plano de los sistemas de piso, pueden dar por resultado una distribución muy diferente de las fuerzas horizontales entre los diversos elementos elásticos lateralmente resistentes, respecto de la que se obtendría con un modelo estructural que supusiese pisos rígidos.

5.-PREDISEÑO DE VIGAS:

Para el análisis de predimensionamiento de vigas se debe de considerar identificar las cargas muertas y vivas. Luego de haber obtenido estas cargas y con los ayuda de los coeficientes del ACI para pórticos simétricos y de iguales longitudes, procedemos a calcular los momentos tanto positivos como negativos en cada una de las vigas.

Después considerando la siguiente fórmula:

$$d = \sqrt{\frac{Mu}{Ku * b}} \quad \text{donde } Ku=40.54(\text{para un hormigón de } 280 \text{ Kg/cm}^2)$$

Con esta expresión se procede realizar los respectivos tanteos con anchos y peraltes de vigas; y así finalmente se determinan la dimensiones de las vigas.

6.-PREDISEÑO DE COLUMNAS:

Se debe realizar un adecuado predimensionamiento de columnas en el cual la carga vertical aproximada que actúa sobre las columnas es función del área tributaria de las losas en cada uno de los pisos.

Se debe de incrementar a la carga unitaria W(peso de área tributaria) el peso propio tanto de vigas como de columnas que puede estimarse en 200 kg/ m².

$$W_c = W + 200$$

La carga vertical en cada columna puede ser expresada por:

$$P_c = \sum_{i=1}^n W_c * At_i$$

El nivel de daño sísmico en las columnas es dependiente de los esfuerzos axiales permanentes presentes:

$f_c < 0.3 f'_c$ (Poco o ningún daño)

$f_c > 0.3 f'_c$ (Daños graves)

En que: El esfuerzo axial permanente promedio(f_c) está definido por:

$$f_c = \frac{P_c}{A_c}$$

Area de columnas:

1. Esquineras $A_c = \frac{P_c}{0.18 * f'_c}$

2. De borde $A_c = \frac{P_c}{0.20 * f'_c}$

3. Centrales $A_c = \frac{P_c}{0.25 * f'_c}$.

Es de considerar que estos criterios toman en cuenta el mayor efecto de acción sísmica tanto en columnas esquineras como de borde.

7.- ESFUERZOS POR CARGAS LATERALES: METODOS SIMPLIFICADOS.-

Para un sistema de cargas laterales resulta difícil establecer una opinión real de lo que ocurre estructuralmente.

Sin embargo, para sistemas estructurales como pórticos existen una serie de métodos aproximados realmente buenos , sobretodo para edificios de altura moderada.

Existen 2 métodos aproximados más aplicables en nuestro medio y éstos son:

- Método del Portal.
- Método del Voladizo.

8.-VERIFICACION DE DESPLAZAMIENTOS RELATIVOS HORIZONTALES: METODO SIMPLIFICADO USANDO EL CONCEPTO DE " RIGIDEZ DE ENTREPISO"

Una vez realizado el predimensionamiento, resulta necesario verificar los desplazamientos relativos horizontales. Si es que no se cumplen las limitaciones del código, se debe modificar dimensiones.

El desplazamiento lateral de entrepiso puede ser obtenido para cada piso empleando el concepto de "rigidez de entrepiso".

$$S_T = \frac{12E}{h^3} \sum_1^m \left(\frac{I_c}{1+U\rho} \right) - \frac{\sum P}{h}$$

Donde :

ST : Rigidez de entrepiso

E : Módulo de elasticidad

Ic : Momento de inercia en columnas

h : Altura de piso

$$\rho = \frac{I_c / h}{\sum I_G / L_G} \quad \text{En el nudo}$$

$\sum P$: Carga de gravedad total en el piso

U : Relación entre el momento de restricción de vigas respecto al de columna

PISO	U
INFERIOR CON BASE ARTICULADA	3/2
INTERMEDIO	2
SUPERIOR	1

Considerando que la relación (P / h) no es relevante, entonces se la puede despreciar. Así se tiene :

$$U \frac{I_c/h}{\sum I_G/L_G} = k$$

$$S_T = \frac{12 E}{h^3} \sum_1^m \left(\frac{I_c}{1+k} \right)$$

$$\frac{h^3}{12 E} \sum_1^m \left(\frac{1+k}{I_c} \right) = \frac{1}{S_T}$$

$$\frac{1}{S_T} = \frac{h^3}{12 E \sum_1^m I_c} + \frac{h^3}{12 E} \sum_1^m \frac{k}{I_c}$$

La contribución de rigidez a las columnas está dado por :

$$S_c = \frac{12 E \sum_1^m I_c}{h^3}$$

$$S_G = \frac{12 E}{h^3} \sum_1^m \frac{I_c}{k} = \frac{12 E}{h^3} \sum_1^m \frac{I_c}{U \frac{I_c/h}{\sum I_G/L_G}}$$

Entonces la contribución de las vigas a la rigidez sería :

$$S_G = \frac{12 E}{h^2} \frac{\sum I_G / L_G}{U}$$

1. Para primer entrepiso: $U = 2/3$

Base articulada

$$S_G = \frac{8 E}{h^2} \sum I_G / L_G$$

2. Para piso intermedio : $U=2$

$$S_G = \frac{6 E}{h^2} \sum I_G / L_G$$

3. Para piso superior : $U = 1$

$$S_G = \frac{12 E}{h^2} \sum I_G / L_G$$

$\sum I_G / L_G$: Sumatoria de rigidez de vigas en cada nudo del piso
 2 vigas para nudos interiores
 1 viga nudos exteriores

DESPLAZAMIENTO LATERAL : Δ

$$\Delta = \frac{H}{S_T} = \frac{H}{S_C} + \frac{H}{S_G}$$

Donde :

H : Carga lateral total

9.- REGLAMENTOS SISMORRESISTENTES: DISEÑO INELASTICO

Los Reglamentos Sismorresistentes suponen comportamientos inelásticos, es decir, desarrollo de ductilidad y resistencia.

La filosofía de diseño de los Códigos sismorresistentes modernos adoptada en la mayoría de las edificaciones y obras de ingeniería existentes en áreas urbanas, frecuentemente se resume de la siguiente forma: se espera que las edificaciones diseñadas de acuerdo a las presentes normas cumplan las siguientes pautas:

- No sufran daños bajo la acción de sismos menores.
- Resistan sismos moderados, con algunos daños económicamente reparables en elementos estructurales.
- Resistan sismos intensos sin colapsar, aunque con daños estructurales importantes.

10.- ANALISIS TRIDIMENSIONAL ELASTICO: PROGRAMA SAP90

a.- APLICACIÓN DEL REGLAMENTO UBC-91

El Sap90 es un programa de análisis estático y/o dinámico de estructuras planas o espaciales.

En nuestro trabajo hemos empleado este programa para hallar:

- **Período de vibración de la estructura.**
- **Momentos máximos.**
- **Cortantes máximos.**
- **Modos de vibración.**
- **Desplazamientos de entrepisos (Drift).**

El programa requiere la modelación de la estructura y la generación de un archivo de datos con las características de esta.

11.- Diseño de Vigas.-

Un elemento sujeto a una fuerza axial menor o igual de $0.1 * f'c * A_g$, donde A_g es el área bruta de la sección, entonces se puede tratar como una viga.

11.1.- Diseño a flexión.-

Una vez definida como viga el elemento estructural procedemos a calcular el acero a flexión requerido con el momento obtenido con el uso del Sap 90.

11.2.- Diseño por capacidad.-

Obtenidos los aceros de flexión (**As**) en los nudos o articulaciones plásticas, se procede a verificar las capacidades a flexión de las articulaciones plásticas con los momentos producidos por el sismo en el un sentido y luego los momentos producidos por el sismo en el otro Sentido

12.- Diseño de Columnas.-

12.1.-Diseño por flexión:

Con los momentos y fuerzas axiales que soportan las columnas obtenidos mediante el uso del programa SAP90, procedemos a realizar el cálculo del acero de refuerzo por flexión que requieren las columnas.

12.2.-) Diseño por capacidad:

Al igual que en el diseño para cortantes de las vigas, la fuerza cortante de diseño V_u para una columna se deberá tomar como el cortante sostenido por la columna cuando se presenta articulaciones plásticas en la columna o en las vigas adyacentes.

13.- DISEÑO DE CIMENTACION.-

Al diseñar las cimentaciones para la estructura de un edificio, el proyectista primero debe determinar las características del suelo en el sitio de la construcción. Los sondeos de perforación y las pruebas de penetración son las dos pruebas estándares en el sitio.

La utilización de cimentaciones profundas en el Ecuador data del siglo pasado y de manera fundamental en la Ciudad de Guayaquil, cuyo subsuelo está formado por arcillas limosas blandas de origen marino, sobreyacente a un estrato de arena densa o de arcilla dura fuertemente sobreconsolidada y con un nivel freático casi superficial.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.-

1. G. Carpio, M. Gómez de la Torre, E. Intriago, " Análisis Sismorresistente de Sistemas Estructurales y Diseño por capacidad"
2. Código ACI 318-89
3. ACI Committee 318,1983a,1983b
4. Manual de diseño del Código ACI, Método de Resistencia. ACI 3-18 publicación 5p17.
5. Minoru Wakabayashi - Enrique Martínez Romero, "Diseño de estructuras sismorresistentes" (México, D.F,1988).
6. Arthur H. Nilson y George Winter, "Diseño de Estructuras de Concreto" (11ª.Edición, 1994).
7. Emilio Rosenblueth, "Design of Eartquake Resistant Structures" (México).
8. José Graces Galofre, "Concreto Armado en Zonas Sísmicas" (Caracas, 1987).
9. Jorge A. Nuques, "Práctica de diseño de cimentaciones profundas en el Ecuador" (Enero 18 de 1989).
10. "Canadian Foundation Engineering Manual" (Part. 3 Deep Foundations,1978).
11. MS.Ing.Edwin Leuschner , "Folleto de Edificios Altos: Evolución Estructural".
12. "Uniform Building Code" (Código UBC-91).
13. Manual del SAP90.
14. "Diseño Estructural" (México City Building Code,México D.F, 1977).
15. Barrera, J., Ottati, M., Proaño, L., "Concordancia en la obtención de Períodos de vibración Analíticos y Experimentales" (Tesis de Grado,Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil,1994).
16. Dr. Edward G. Nawy , "Concreto Reforzado" (P.E, México,1988).
17. "Respuestas de los Edificios de Concreto a las fuerzas laterales horizontales", ACI-ASCE 442.
18. "Simplified Design.Reinforced Concrete Buildings of Moderate size and height" (Segunda edición, Portland Cement Associaton,1993).
19. Paulay & Priestley , "Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings", (págs. 162-164).

Conclusiones y Recomendaciones.-

En cada parte de nuestro trabajo sacamos conclusiones puntuales, importantes y muy específicas. Como conclusiones generales podemos resaltar las siguientes:

- El efecto sísmico disminuye con la altura. Es decir que a medida que subimos de piso, los momentos en los elementos estructurales debido a la excitación sísmica son menores.
- Los momentos sísmicos por lo general no son máximos en el primer piso. En nuestro caso los momentos máximos se dieron en las vigas del segundo piso.
- En nuestro diseño los elementos estructurales llegan al estado de cedencia, por lo que los esfuerzos no pueden ser calculados con las inercias de las secciones no agrietadas. Los factores que afectan esta inercia son:
 1. La magnitud y signo de los momentos.
 2. La cantidad de esfuerzo de flexión.
 3. La carga axial.
 4. Las propiedades geométricas de la sección.
 5. Los efectos de carga y descarga.
 6. La armadura.
- En cuanto al diseño sismorresistente de estructuras debe de ponerse mayor interés en la selección del sistema estructural y en el detallamiento de los elementos estructurales.
- Uno de los lugares más afectados por un sismo son las uniones viga-columna, por lo que hay que tener especial cuidado en el detallamiento del refuerzo transversal para contrarrestar los grandes esfuerzos cortantes a los que están sometidos.

- Se recomienda el estudio y análisis de los efectos sísmicos en los pilotes de la cimentación.
- El período de la estructura aumenta con el tiempo.
- El amortiguamiento aumenta con el tiempo.