

# "ANÁLISIS DE UN EDIFICIO DE FERROCEMENTO CONSIDERANDO LOS CRITERIOS PARA MINIMIZAR LOS EFECTOS DE UN TERREMOTO"

Autor: **Prof.Dr.Ing.Carlos Llanes Burón**

del Centro de Estudio de Construcción y Arquitectura Tropical, CECAT  
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, **ISPJAE**  
Ciudad de la Habana, Cuba, 1995

## **Resumen:**

En el presente trabajo se presentan los conceptos básicos que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar un edificio bajo sismorresistente, que cumpla con los requisitos necesarios para no ser vulnerable a la amenaza de un sismo moderado.

Como parte de las investigaciones que se vienen desarrollando en el Centro Regional para el Desarrollo del Ferrocemento, **CREDEF**, se abordó el cálculo de un edificio, el cual sería diseñado básicamente considerando los elementos estructurales de ferrocemento como material predominante.

## **Antecedentes generales**

En Cuba, al igual que en muchos otros países, el déficit de viviendas se plantea como un problema de primer orden. Pese a todos los esfuerzos desarrollados para disminuirlo, en las actuales condiciones económicas de un plan de hasta 100 000 viviendas por año, este se ha visto reducido a menos de 20 000 de las cuales prácticamente un 80 por ciento se están construyendo utilizando los llamados materiales de "bajo costo", de ahí que el déficit estimado al inicio del quinquenio se haya incrementado considerablemente.

<sup>1</sup> En este contexto se ha estimado de vital importancia que las universidades con sus centros de estudios se sumen al esfuerzo de la comunidad, aportando su potencialidad técnica y científica en la búsqueda de soluciones apropiadas para atacar el problema habitacional que enfrentamos

En esta búsqueda uno de los primeros aspectos que han sido precisados lo constituye el hecho de que todos los materiales pueden ser a su vez de bajo y elevado costo, de ahí que se deba hablar de tecnologías apropiadas y no de materiales de bajo costo

De aquí que sin dudas el ferrocemento se pueda considerar como un material cuya tecnología<sup>2</sup> se adapta de una forma muy clara por su versatilidad a las llamadas tecnologías apropiadas.

Desde hace varios años<sup>3</sup> se vienen dando pasos en diferentes países entre ellos, Cuba en la búsqueda de crear sistemas constructivos a base de elementos diseñados haciendo uso del ferrocemento.

Uno de los parámetros que se ha estado estudiando ha sido el lograr incrementar el número de niveles en las edificaciones construidas con dichos sistemas.

Hasta ahora la mayoría de los edificios construidos haciendo uso del ferrocemento se limitan a dos niveles, con algunas excepciones en proyectos de tres a cinco plantas, pero aún sin haberse construido, de ahí que en la búsqueda de soluciones y aplicaciones del ferrocemento como tecnología apropiada, nos hayamos dado a la tarea de estudiar el comportamiento de un edificio bajo de cinco plantas a ser construido en una zona sísmica .

### **Elementos básicos de Ingeniería Sismo-Resistente**

En nuestra época han ocurrido muchos terremotos catastróficos en diferentes partes del mundo que conllevan a pérdidas de vidas y bienes materiales, como los ocurridos en este año 95 recientemente en Kobe, Japón y en Sajalin, en Rusia, de aquí la importancia de su conocimiento y aplicación en el campo de la construcción.

No entraremos en detalles acerca del origen de los terremotos puesto que existe numerosa bibliografía<sup>5</sup> al respecto y este aspecto incluso ha sido tratado con frecuencia por los medios de comunicación masiva como la televisión y la prensa.

Centraremos la atención en el mecanismo de los terremotos.

#### **Mecanismo**

Si bien el origen ha sido ampliamente estudiado, su mecanismo no ha podido ser estudiado lo suficiente para poder expresarlo con una fórmula matemática exacta capaz de ser interpretada físicamente

Se admite la existencia de un foco en el interior de la tierra, donde se engendran una serie de ondas elásticas que se propagan hasta alcanzar la superficie, donde provocan movimientos. El centro del foco se llama *hipocentro* y el punto teórico de la superficie, determinado por su radio terrestre que pasa por el hipocentro , constituye el *epicentro*, figura 1.

Esta imagen puntual del foco, constituye una aproximación necesaria para poder localizar el origen de las ondas sísmicas, pero el foco puede ocupar una zona muy extensa.

La intensidad del terremoto es mayor en la proximidad del foco y se reduce paulatinamente con la distancia.

#### **Ondas sísmicas**

La brusca caída de esfuerzos que acompañan el deslizamiento de las placas genera ondas sísmicas debidas a las deformaciones longitudinales (de compresión) o transversales (de cortante) de la roca. Estas ondas viajan alejándose de la falla y su amplitud se va atenuando poco a poco. Las ondas longitudinales (llamadas *ondas P* primarias o principales) viajan a mayor velocidad y tienen frecuencias más altas y amplitudes menores que las ondas de cortante (*ondas S* o secundarias). A medida que se alejan de la falla, las ondas mencionadas se reflejan en las capas superficiales y producen otro tipo de ondas (de superficie) que tienen velocidades menores que las dos anteriores.

Características de las ondas longitudinales es provocar deformaciones volumétricas variables y sucesivas en los cuerpos por los que se propagan, que pueden ser sólidos y gaseosos.

En cambio, las ondas transversales por torsión de cizalla o esfuerzo cortante sólo afecta a la forma de los elementos considerados, pero no a sus volúmenes y no pueden propagarse en los medios líquidos o gaseosos.

### **Efectos del suelo local**

La naturaleza particular del suelo sobre el cual esta cimentado la estructura modifica la respuesta sísmica de la misma debido a causas diferentes

-La amplificación local, que consiste en la modificación de las ondas sísmicas al transmitirse de la roca subyacente a los estratos del suelo que se encuentran entre esta y la cimentación.

-Alteración del movimiento del terreno por la presencia de la estructura considerada esta como un cuerpo rígido, figura 2.

-Interacción suelo-estructura, que ocasiona que una fracción significativa de la energía cinética introducida por el sismo se vuelva a transferir al suelo y se disipe por el amortiguamiento proporcionado por este.

La amplitud de los movimientos del suelo abajo de la estructura es menor que la que se tiene fuera de esta.

El período de vibración del suelo depende de la conformación de este, ya que en los suelos firmes y duros los períodos son bajos y en los blandos ocurre lo contrario.

La resonancia no esta exenta de ocurrir cuando se genera un fenómeno telúrico y es cuando mayores daños se producen, este fenómeno ocurre cuando el período natural de vibración de la estructura es igual al del sismo.

De ahí que se recomienda que las estructuras rígidas se proyecten en suelos blandos y estructuras flexibles en terrenos duros, ya que las ondas sísmicas se transmiten a la estructura a través de las cimentaciones, figura 3.

### **Criterios de diseño**

En vista de que las solicitaciones que un sismo severo impone a las estructuras son muy severas y de carácter muy aleatorio, no es económicamente factible diseñar para que las construcciones resistan sin daño alguno un sismo con un período de recurrencia grande. En este sentido el diseño sismorresistente difiere del que se realiza para las otras acciones.

El nivel de la seguridad que se debe adoptar depende del costo de los daños esperados, relativo al que implica incrementar la seguridad de la estructura.

En diseño sismorresistente debe aceptarse una probabilidad mayor de que ocurran daños que ante las acciones convencionales, si se quiere evitar una inversión excesiva en la estructura .

Por esas razones los criterios de diseño sismorresistente especificados en las normas modernas reconocen, implícita o explícitamente, que el objetivo de sus procedimientos es limitar la probabilidad de un colapso ante sismos intensos, aún a costa de daños severos y sólo para sismos moderados, se pretende que la estructura permanezca intacta.

Una definición muy acertada de la esencia y los objetivos del diseño sismorresistente ha sido dada por Esteva en su libro "*Design of Earthquake Resistant Structures*",

*"El arte del diseño contra los sismos no consiste en producir estructuras capaces de soportar conjuntos dados de fuerzas laterales, aunque esta capacidad es parte de un diseño sano. Implica producir sistemas que se caractericen por una óptima combinación de propiedades tales como resistencia, rigidez y capacidad de disipar energía y para deformarse dúctilmente.*

*Estas propiedades les permitirán responder a sismos frecuentes y moderados sin sufrir daños significativos y a sismos excepcionales y muy severos sin poner en peligro su propia estabilidad, su contenido y la seguridad de sus ocupantes. El logro de estos objetivos implica mucho más que la aplicación de requisitos reglamentarios; exige la comprensión de los factores básicos que determinan la respuesta sísmica de las estructuras, así como el ingenio necesario para producir sistemas que tengan las características adecuadas."*

### **Ventajas y desventajas del ferrocemento en edificios bajo acción sísmica**

Si se analizan las ventajas y desventajas del hormigón armado ante acciones sísmicas podemos observar que varias de ellas se pueden extrapolar directamente al ferrocemento, pero algunas caen en un campo que requieren el desarrollo de futuras investigaciones y comprobaciones prácticas.

#### ***Ventajas***

- Estructuras con elevado amortiguamiento interno;
- Adecuado control de deformaciones horizontales;
- Estructuras con una gran reserva de energía que permiten su recuperación estructural aún después de estar sometidas a acciones severas. Además muy fácil de reparar con frecuencia;
- Estructuras en general de períodos bajos con poca influencia de los efectos secundarios **P - D**;
- Su bajo período de vibración permite estructuras con buen comportamiento emocional de las personas.

#### ***Desventajas***

- El gran peso por metro cuadrado, si bien el peso específico del ferrocemento es similar al del hormigón, deja de ser crítico con un adecuado dimensionamiento de sus elementos cuyos espesores son pequeños;
- Baja resistencia a la tracción, pero en ocasiones es superior a la del hormigón armado;
- Concentración de armaduras en las uniones con tendencias a baja resistencia del mortero;
- Se obtienen estructuras difíciles de lograr en ellas, niveles altos de ductilidad;
- Modelación matemática poco confiable para un análisis sísmico elasto-plástico de un edificio real;
- Necesidad de disponer de cinturones sismorresistentes a nivel de los pisos, para proporcionar una resistencia y rigidez adecuada a los entrepisos y cubiertas de los edificios;
- Se requiere la colocación de pernos entre paneles, para garantizar de una forma mecánica, el trabajo en conjunto de los paneles, que forman los tímpanos verticales de las edificaciones sometidas a acciones laterales de consideración, fundamentalmente cuando la obra tiene más de dos niveles.

### **Recomendaciones sobre la estructuración**

A pesar de que la estructura analizada en este trabajo no presenta las características ideales de sencillez, uniformidad y simetría, debido a que de partida se utilizó un proyecto arquitectónico en el cual estaba definida una configuración vertical y en planta no uniforme, no deja de ser importante que se mencionen algunas recomendaciones generales que ayuden a lograr un buen equilibrio y estabilidad de una estructura ante cargas laterales, lo cual además de lugar a una estructura económica.

-La sencillez de la estructura permite entender claramente la forma en la que esta resiste las cargas laterales y en la que puede disipar la energía producida por el sismo;

-La existencia de sistemas estructurales que proporcionen a la estructura rigidez y resistencia en direcciones ortogonales es un requisito obvio en vista de que el movimiento del terreno induce fuerzas en cualquier dirección;

-La distribución simétrica en planta de los elementos estructurales evita que se presenten torsiones importantes en la respuesta estructural que den lugar a solicitaciones muy altas y de cuantificación poco confiable en elementos estructurales;

-Debe tenderse a una forma regular en planta. Son poco convenientes las formas excesivamente alargadas debido a que se tiende a perder la rigidez del entrepiso en su plano para trabajar como diafragma y se aumentan las posibilidades de excentricidad en la distribución de rigideces. Igualmente poco deseable son las formas en L y T, así como aquellas que tengan fuertes entrantes, debido esencialmente a los problemas de torsión que provocan, figuras 4 y 5;

-Debe buscarse una forma regular de la construcción en elevación. Las fuertes reducciones del tamaño de la planta después de cierto número de pisos provocan amplificaciones locales del movimiento que no están cubiertas por los procedimientos de diseño usuales recomendados en los códigos;

-La uniformidad de resistencia y rigidez de las diferentes partes de la estructura es un punto esencial;

-La cimentación debe ser tal que pueda transmitir a la estructura los movimientos del suelo de manera que ésta actúe como una unidad monolítica y que no haya deformaciones relativas importantes entre suelo y estructura

### **Clasificación sismo-resistente de los edificios**

Desde el punto de vista de la estructuración <sup>7</sup> sismorresistente los edificios pueden clasificarse en:

*Tipo I:* En base a marcos o pórticos rígidos, figura 6.1

*Tipo II:* En base de muros de rigidez simple

*Tipo III:* En base a muros de rigidez acoplados, figura 6.2

*Tipo IV:* En base de marcos rígidos y muros de rigidez simples o acoplados

*Tipo V:* Edificios tipo tubo; tubo simple, tubo en tubo o tubo múltiple

El edificio que nos ocupa se puede enmarcar dentro del *tipo III* cuyas ventajas y desventajas son las siguientes:

#### *Ventajas*

-Las deformaciones horizontales relativas entre pisos son fácilmente controlables;

-Se logran estructuras altas entre 30 y 35 pisos en hormigón armado;

-Se logra gran resistencia dentro del rango elástico;

-Se obtienen amortiguamientos internos entre un 1 y 10 % ;

-Debido a la gran rigidez la deformación total por cortante y flexión es baja;

-Período de vibración bajo, hace que su respuesta sísmica sea menor cuando están fundados en suelos blandos (períodos largos);

-Permiten disponer de una estructura con reserva de energía;

- En estos edificios el comportamiento emocional de las personas no se ve alterado;
- Se logra disipar energía a través del acople de las vigas dúctiles, lo cual impide que los muros alcancen la etapa inelástica;
- Los muros no pueden recibir daños estructurales permanentes y esto lo evitan las vigas.

#### *Desventajas*

- En planta muchas veces no se logra simetría entre los muros, lo cual hace que se creen grandes excentricidades que no se pueden controlar;
- Su respuesta sísmica en suelos duros es alta;
- No permiten alcanzar gran ductilidad, por lo que sus elementos deben ser diseñados con resistencia en el rango elástico;
- Para sismos intensos existen pérdidas de ductilidad, por lo que sus elementos deben ser diseñados con resistencia en el rango elástico;
- Modelación matemática poco confiable para un análisis sísmico elasto-plástico;
- Por los valores altos de las cargas sísmicas es necesario disponer de diafragmas rígidos horizontales de gran resistencia y rigidez;
- En vigas y dinteles cortos con fuertes cortantes no se logra disponer de una armadura que permita deformaciones plásticas asociadas a ductilidades globales mayores de 4 para toda la estructura;
- Bajo sismos severos fallan antes de lograr la resistencia máxima de los muros acoplados.

### **EDIFICIO PROPUESTO**

La edificación que nos ocupa será mixta o sea tendrá partes "in situ" de hormigón armado y partes prefabricadas de ferrocemento, siendo este último el material predominante.

Dentro de las partes "in situ" se encuentra todo el sistema de cimentación formado por un conjunto de vigas zapatas longitudinales y transversales, que le suministran a la estructura una rigidez necesaria, dado el considerable número de paneles de ferrocemento prefabricados que componen las fachadas y tabiques integrantes de la edificación.

Este tipo de cimentación permite una adecuada interacción suelo-estructura, transmitiendo a la estructura los movimientos del suelo sin que se produzcan deformaciones relativas de consideración entre el suelo y la estructura, tan perjudiciales para esta última.

También se confeccionarán en el lugar varias vigas de cerramiento, fundamentalmente las perimetrales y las de las cajas de escaleras. Esto se hace para ir creando anillos rigidizadores que hagan que los entrepisos formados por losas tipo canal se comporten de una forma que se acerque a los diafragmas, que se suelen lograr con las losas planas de hormigón armado de una alta rigidez en su plano.

Se diseñaron dos variantes de escaleras la primera de hormigón armado y la segunda de ferrocemento .

La primera variante es más monolítica y dúctil, pero genera cargas superiores en la estructura por su peso La segunda es más ligera, pero frágil ante un sismo severo.

Las partes prefabricadas de la edificación serán, los paneles de fachadas y divisorios, además las losas de cubierta y entepiso, paneles de cumbrera y caballetes.

Son utilizadas también vigas de cerramiento interiores de ferrocemento, pero estas deben emplearse siempre y cuando las celdas creadas garanticen una rigidez adecuada al entrepiso.

El edificio ocupará un área de aproximadamente  $400 \text{ m}^2$ , con cinco plantas, siendo las dos primeras iguales y las restantes diferentes, figura 7.

No se hizo ninguna junta antisísmica puesto que sus coordenadas torsionales son casi simétricas a pesar de que sus valores varían de un piso a otro.

El soporte de la edificación será asumido por todos los muros conformados por los paneles de ferrocemento de 30 y 40 cm de ancho. Estos a su vez harán el papel de tímpanos, interconectados entre sí por medio de pernos de 6 y 10 mm

El mayor módulo del edificio es de  $3,6 \times 3,6 \text{ m}$  y el menor de  $1,8 \times 2,0 \text{ m}$ .

La solución de cubierta es a dos aguas cuyas piezas prefabricadas de ferrocemento serán montadas dobles (traslapadas) del tipo lima tesa, el espacio libre entre ellas servirá de ventilación para dicha cubierta. La cubierta no lleva ningún tipo de impermeabilización, siendo esta una de las grandes ventajas del ferrocemento.

El hormigonado de las vigas de cerramiento y zapata será en dos partes para lograr el embebido de los paneles y las losas de entrepiso en dichas vigas, esto garantizaría un mayor monolítismo en las juntas de dichos elementos prefabricados.

### **Cálculo de las cargas sísmicas**

Las cargas sísmicas se determinan de acuerdo con el período y al modo o grado de vibración libre del edificio, el peso del mismo y el grado sísmico que le corresponda por la microlocalización

La expresión matemática utilizada para el cálculo del cortante basal, es la propuesta para la nueva norma sismorresistente<sup>9</sup> en estudio en la actualidad y que esta acorde con la mayoría de los países con más tradición en el estudio de las cargas sísmicas.

$$V = \frac{A \cdot I \cdot C \cdot W}{R_d}$$

donde

**A** : aceleración horizontal máxima del terreno expresada como la fracción de la gravedad correspondiente a la zona sísmica;

**I** : coeficiente que toma en cuenta el riesgo sísmico en función de la importancia de la obra;

**C** : coeficiente sísmico espectral determinado por las siguientes fórmulas;

$$C = 1 + (F_s - 1) \frac{T}{T_1} \quad 0 \leq T \leq T_1$$

$$C = F_s$$

$$T_1 \leq T \leq T_2$$

$$C = F_s \left( \frac{T_2}{T} \right)^p$$

$$T > T_2$$

$F_s$  : coeficiente de amplificación que depende del perfil del suelo;

$T_1, T_2$  : períodos de esquina del espectro correspondiente;

$T$  : período fundamental de vibración de la obra en la dirección analizada;

$R_s$  : coeficiente de reducción por ductilidad que depende del sistema estructural utilizado y el nivel de diseño;

$W$  : peso de la edificación.

### Conclusiones y recomendaciones

Calculado el cortante basal y con este las respectivas fuerzas sísmicas, se distribuyen según la rigidez de los tímpanos prefabricados que integran la estructura.

Luego de diseñar todos los elementos integrantes del sistema, se arriba a la conclusión de que con una adecuada estructuración, es posible el diseño y cálculo de edificios sismorresistentes a base de elementos prefabricados de ferrocemento.

En el edificio analizado su variación vertical en forma casi simétrica y con tendencia piramidal, redundó en una disminución de los efectos de torsión y del valor de las fuerzas sísmicas por la disminución paulatina del peso de la estructura en altura.

En la etapa actual de esta investigación quedan algunos aspectos a estudiar en el futuro, como es el comportamiento de las juntas tanto verticales entre paneles, como horizontales a nivel de los cerramientos y zapatas, puesto que existen diversos criterios alrededor de estos tipos de juntas y su comportamiento ante cargas laterales variables en el tiempo, como las generadas por los sismos.

Para definir la vulnerabilidad de las viviendas de bajo consumo energético, es necesario cuantificar la demanda y la capacidad sísmica de las estructuras, para determinar por comparación el nivel de daño esperado, lo que pudiera plantearse en términos probabilísticos.

En nuestro caso es posible cuantificar la demanda sísmica, utilizando simplemente nuestras normas o propuestas de "Cálculo Sismorresistente", sin embargo en la determinación de la capacidad de las estructuras, tenemos mucha incertidumbre, ya que para un gran número de ellas, no conocemos las propiedades de los materiales a cargas estáticas, mucho menos a efectos dinámicos, como en el caso del ferrocemento. De ahí que esta es una investigación cuyos resultados están lejos aún de ser definitivos, como se apuntó anteriormente y se requiera seguir estudiando esta tecnología, tanto desde el punto de vista de cálculo, como los constructivos.

La revisión de los sistemas estructurales considerando las nuevas propuestas de códigos de la construcción para el diseño contra las fuerzas generadas por los terremotos es sin dudas una de las principales medidas de mitigación<sup>10</sup> de desastres, a ser tomadas en cuenta por los expertos que se ocupan de asegurar que las estructuras diseñadas con dichas normas brinden una adecuada protección a un costo mínimo.

## **Bibliografía**

- 1-Llanes,C.: "Ferrocemento un material con presente y futuro", Video, ISPJAE, 30 min., 1991.
- 2-Wainstok,H.: "Guía para el diseño y construcción de elementos de ferrocemento", CECAT, ISPJAE, 1991.
- 3-Llanes,C.;Calcaño,R.;F.: "Sistema Baragua", IV Simposio Internacional de Ferrocemento, La Habana, 1991.
- 4-García,E.;Llanes,C.: "Análisis de edificio de ferrocemento antisísmico", Trabajo de Diploma, ISPJAE, La Habana, 1993.
- 5- Barbat,A.: "Cálculo sísmico de las estructuras", Edt.Tec.Asoc.S.A, Barcelona, España, 1986.
- 6-Llanes,C.;Sentmanat,A.;Vértiz,P.: "Análisis de un edificio sismorresistente", Trabajo de Diploma, ISPJAE, La Habana, 1993.
- 7-Llanes,C.;Malta,L.M.: "Diseño sismorresistente de un edificio socio-administrativo", de Diploma, ISPJAE, La Habana, 1991. Trabajo
- 8-Llanes,C.;Quintana,J.: "Diseño y revisión de elementos para viviendas biplantas", de Curso, Fac.Ingeniería Civil, ISPJAE, 1993. Proyecto
- 9-CONCE: "Anteproyecto de norma cubana sismo-resistente", 1993.
- 10-Coburn, A.W.: " Vulnerabilidad y evaluación de riesgo", Cambridge Architectural Research Limited, UNDRO, PNUD, Cambridge, U.K., 1991.

# Figuras

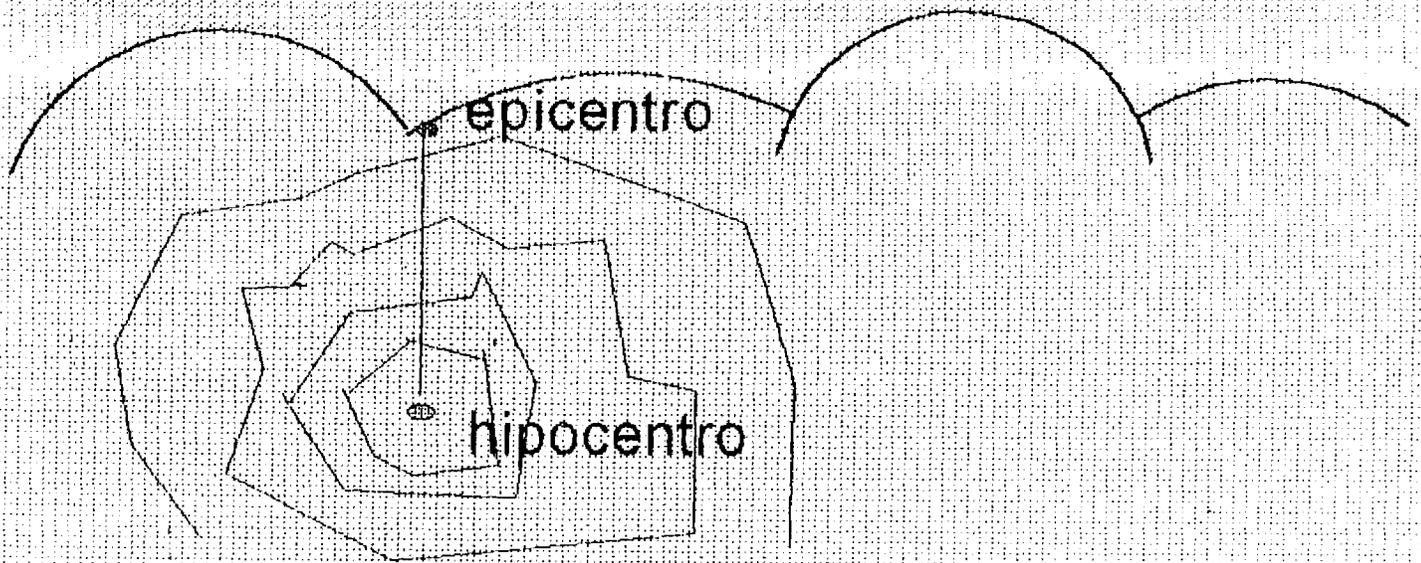
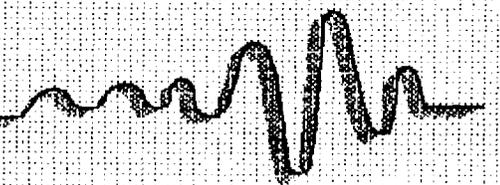
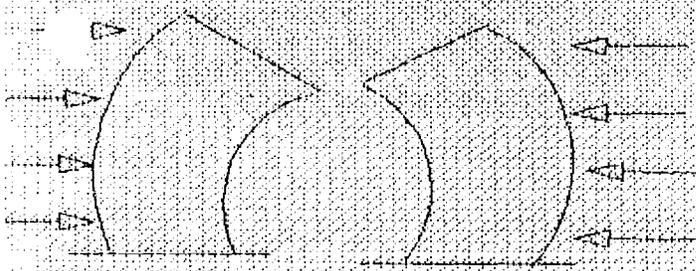


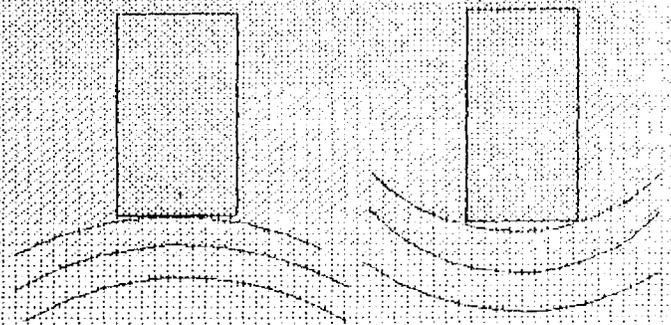
Figura 1



# Efectos del suelo local



Componentes horizontales del movimiento del terreno



Componentes verticales de movimientos

El edificio resiste el movimiento creando fuerzas inerciales en sentido contrario al desplazamiento del terreno, el cual presenta fundamentalmente componentes horizontales y verticales.

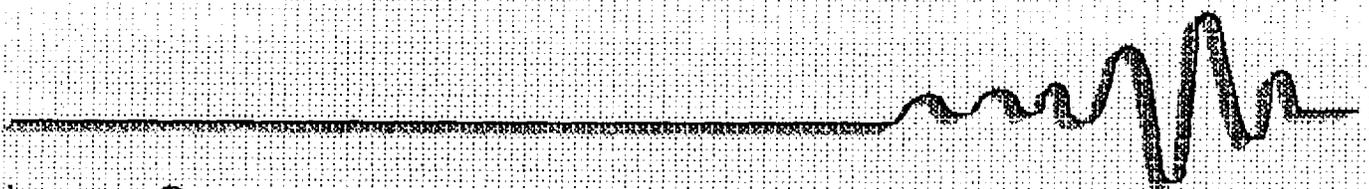


Figura 2