universidad católica del perú
departamento de ingeniería

generalidades y conceptos básicos de la construcción ANTISISMICA

julio vargas neumann

2a Edición

"Si un ingeniero civil debe adquirir experiencia en un breve lapso, expónganlo ante los conceptos de la Ingeniería Antisísmica, aún cuando posteriormente no vaya a trabajar en un país sísmico"

(N.M. Newmark, E. Rosenblueth).

universidad católica del perú
departamento de ingeniería

generalidades y conceptos básicos de la construcción ANTISISMICA

julio vargas neumann

Vaceamiento de tabique no estructural, por falta de una viga solera de amarre en el borde superior, que lo sujete a la estructura. Chimbote, Sismo 1970.

PRESENTACION

El interés que suscitó la primera edición de esta publicación nos revela que llenó parte del vacío bibliográfico existente.

Unificando esfuerzos, el Colegio de Arquitectos del Perú, el Colegio de Ingenieros del Perú (Capítulo de Ingenieros Civiles) y la Pontificia Universidad Católica del Perú, presentan esta nueva edición, creyendo contribuir así al logro del imperioso objetivo de consolidar una conciencia sísmica en el país.

Arq. Carlos De Martis Bazo
Colegio de Arquitectos
del Perú

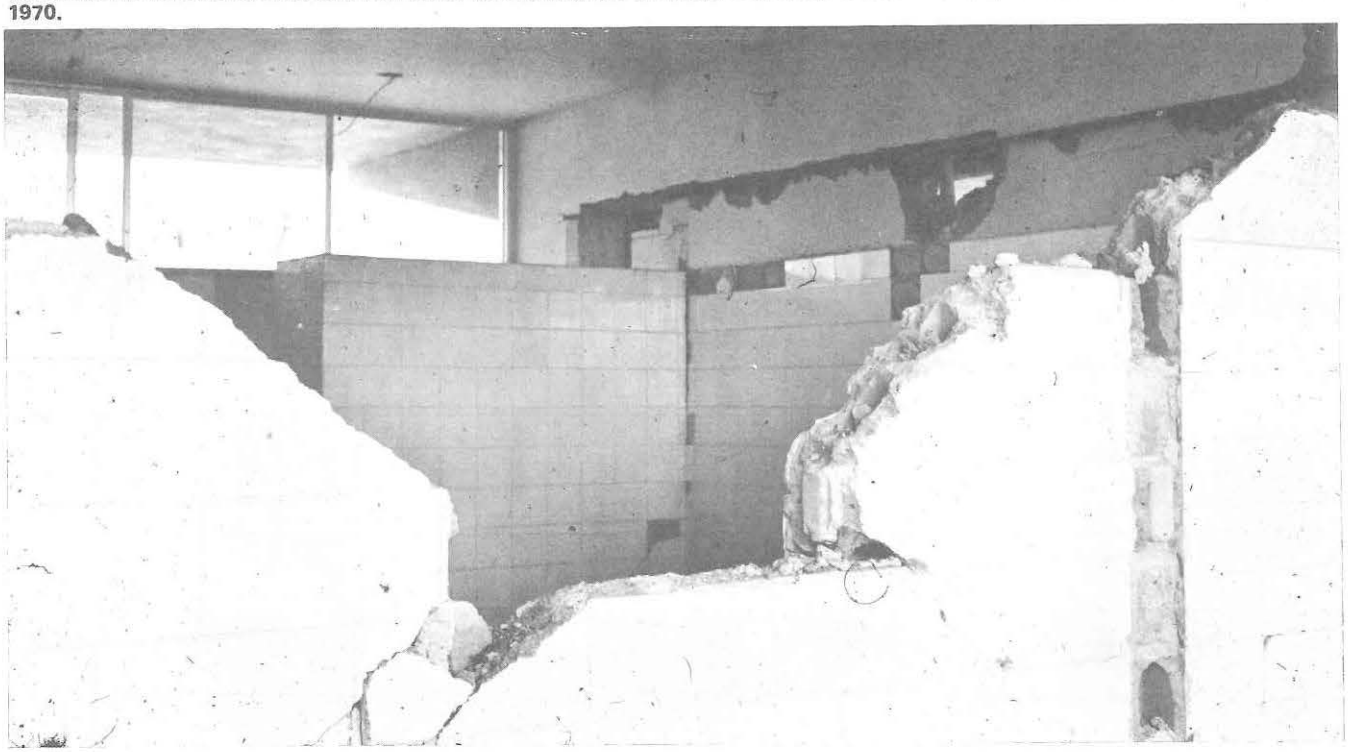
Ing. Abel Fernández de Loayza
Capítulo de Ingenieros
Civiles
Colegio de Ingenieros
del Perú

Ing. Luis Guzmán Barrón Sobrevilla
Departamento de Ingeniería
Pontificia Universidad Católica
del Perú.

Lima, Febrero de 1975

Unión viga-columna, destrozada por falta de refuerzo transversal (estribos). Debe evitarse este tipo de columna "corta" creada por la colocación de tabiques con ventana alta, a los lados de la columna. Su enorme rigidez atrae sobre sí grandes fuerzas de corte.

Elementos no estructurales unidos a los marcos del edificio, que no fueron capaces de tolerar las deformaciones de éstos. Chimbote, Sismo 1970.



GENERALIDADES Y CONCEPTOS BASICOS DE LA CONSTRUCCION ANTISISMICA

Es bien conocido el hecho de que en los últimos años el "ritmo de vida", si cabe el término, viene acelerándose progresivamente. Esto parece estar provocado por un incremento en la velocidad de desarrollo de las técnicas y ciencias, que terminan influyendo hasta en detalles del quehacer cotidiano. Cada día somos más concientes de la transitoriedad de actos, objetos y conocimientos, como consecuencia del fenómeno mencionado.

A nivel profesional también existen serias repercusiones que es necesario destacar. Los conocimientos adquiridos en la Universidad y fundamentalmente los más especializados, quedan en muy poco tiempo obsoletos. Se produce una seria incomunicación, aún entre profesionales de una misma especialidad y escuela, egresados en una misma década. Incomunicación basada no sólo en la fuerte diferencia de información y la falta de reconocimiento de este hecho, sino en el peso que en las decisiones del profesional más experimentado, tiene la tradición de los procedimientos y prácticas establecidos que han dado resultados bastante satisfactorios o por lo menos aceptados como tales.

Mucho más acentuado es el problema entre profesionales de disciplinas solamente afines, pero que deben desarrollar proyectos integrales, en equipo, como son las obras civiles.

Este artículo cumpliría su fin, si despertara tanto en los ingenieros constructores como en los arquitectos del medio, el suficiente interés como para mostrarse más receptivos frente a las nuevas consideraciones que el ingeniero calculista intenta implantar. Más que pretender ser un trabajo original o especializado, éste es un ensayo de divulgación a nivel del profesional en actividad, que constituye el factor más eficiente dentro del proceso de desarrollo de las técnicas de la construcción antisísmica.

Se hará referencia a las generalidades y conceptos básicos de esta construcción antisísmica, que como ha ocurrido en otras partes del mundo, son adquiridos primero por los ingenieros calculistas quienes no encuentran la manera fácil de transmitir, no los conocimientos mismos, sino principalmente la importancia del cumplimiento de determinadas "reglas de juego" novedosas, que se derivan de dichos conocimientos.

Parte sustancial de la información es recogida de apuntes tomados al Dr. Patricio Ruiz Tirado (Profesor de la Universidad Católica de Chile).

***

I. INTRODUCCION

Como se sabe, nuestro país se asienta sobre un territorio donde la frecuencia de ocurrencia de sismos de fuerte intensidad es importante. El Perú se encuentra ubicado dentro de lo que se denomina el cinturón circunpacífico (circunferencia sobre el globo terrestre) donde se desarrolla la mayor actividad sísmica del mundo con no menos del 80 % de los terremotos detectados. Las pérdidas humanas y daños materiales ocasionados en los últimos años, no deberían ser sólo un índice de lo que hubiéramos podido evitar, sino un despertador de conciencias respecto al ineludible deber de minimizar los efectos de movimientos telúricos futuros que, dentro del margen que proporcionan los fenómenos aleatorios, pudieran en cualquier momento sorprendernos con mayores intensidades. Se puede citar como desgraciado ejemplo lo ocurrido el año 1967 en Caracas, desacostumbrada por largo tiempo a este tipo de terremotos. Como estos desastres no son consuetudinarios, entre un terremoto y el siguiente se tiende a olvidar gradualmente sus efectos, dentro de lo que es natural frente a las cosas desagradables. Esta actitud ayuda a restablecer el estado de ánimo pero conlleva al grave riesgo del descuido de las precauciones que nos prometemos tener en cuenta en los días siguientes a la ocurrencia del sismo.

Las obras civiles en general y las casas o edificios en particular, que serán el punto central de nuestro tema, han sido y en gran parte siguen siendo construídos con criterios de estabilidad frente a solicitaciones únicamente estáticas. Es decir, se piensa en estructuras inmóviles que tienen que soportar un determinado sistema de cargas.

Desde ese punto de vista la experiencia es amplia y se podría afirmar que nuestras realizaciones son en general buenas.

Ocurre sin embargo, que estas obras "estáticas" vibran de vez en cuando debido a los temblores, situación para la cual no fueron concebidas. Este ocasional comportamiento "dinámico", origina una nueva manera de enfocar la estabilidad de las construcciones y es base de la Ingeniería Antisísmica, que complementa los conocimientos que tradicionalmente se desarrollaron entre nosotros.

Formar esta nueva tradición dinámica o antisísmica es tarea del presente y futuro inmediato.

La falla parcial o total de una construcción a consecuencia de un sismo, no solo se origina por el diseño insuficiente de algunos de sus elementos, sino también por error en las consideraciones propias a la estructuración general (asimetrías, falta de rigidez lateral o torsional, incompatibilidad de deformaciones entre las partes, concentraciones de esfuerzos en puntos específicos, etc.). Es por eso que los distintos profesionales que integran el equipo realizador deben conocer estos nuevos aspectos, que intervienen desde el nacimiento del proyecto. Así, el arquitecto tendrá en cuenta criterios que le permitan concebir formas o estructuras de buen comportamiento dinámico, desde el planteamiento de la planta de conjunto o la integración de los diferentes volúmenes que él idee, hasta la versatilidad que debe ofrecer primero al calculista y luego al constructor, para emplear las técnicas más adecuadas. El calculista, sin ánimo de propiciar un movimiento arquitectónico estructura-

lista, deberá maniobrar entre la sugerencia y aceptación de formas plásticas en la medida en que de entre estas formas, las esenciales correspondan a las necesidades dinámicas de la obra.

Por último el constructor deberá implementar en la práctica las hipótesis y formas que la simbiosis arquitecto-calculista haya generado, sin dejar de lado los aspectos prácticos de una realización. Su permanente inspección como corolario de su participación desde las etapas iniciales del proyecto, es muy saludable.

II. EFECTOS SISMICOS SOBRE LAS EDIFICACIONES

1. La Solicitación

Cuando ocurre un terremoto, se disipa una energía al interior de la tierra (energía almacenada por la paulatina deformación de las rocas hasta el momento de una fractura, caso de los terremotos tectónicos que son los más frecuentes) que se transmite en forma de ondas hasta la superficie. El suelo de la superficie transmite a su vez el movimiento a las construcciones. La inercia propia de las masas de las edificaciones se opone al movimiento impuesto en sus bases, generando las fuerzas de inercia o fuerzas sísmicas. En la mayoría de los casos sólo se considera las fuerzas de inercia horizontales, debido a que las verticales pueden ser consideradas dentro del coeficiente de seguridad de las fuerzas gravitacionales ya estimadas en el cálculo estático. Por tanto, deberá proveerse a las estructuras de la resistencia necesaria para soportar estas fuerzas laterales. (Fig. 1).

Esta solicitación (fuerzas de origen sísmico) es dinámica, es decir varía rápidamente de intensidad en el transcurso del tiempo y es aleatoria; por tanto no se podrá conocer con exactitud sus características en un momento dado. Nos interesará estimar sus valores máximos, teniendo en cuenta las diferentes combinaciones de aceleraciones (de las masas de la estructura) que se puedan presentar.

2. La respuesta de la estructura a la solicitación sísmica

El grado de flexibilidad o deformabilidad de una estructura hará que ésta vibre con características distintas a las del suelo mismo. Las fuerzas de inercia que aparecen dependerán por tanto no sólo del movimiento del suelo sino también de cómo responda la estructura según sus características particulares. (Fig. 2).

La vibración de una estructura es un movimiento complejo. Sin embargo idealizando la estructura podemos considerarlo como un movimiento compuesto por un modo o forma fundamental de vibrar más la contribución de otros modos generalmente de menor importancia (edificios no muy altos). (Fig. 3).

A cada modo de vibrar le corresponde un determinado período de vibración, entonces existirá un período (el relacionado con el modo fundamental) que será una característica muy representativa de la respuesta dinámica de la estructura. Es relativamente fácil obtener un valor suficientemente aproximado de este período fundamental de cada edificio, basándose en modelos semejantes a los utilizados en el cálculo estático.

Por otro lado, se comprueba que la intensidad de la respuesta dinámica de las estructuras reales es menor que la obtenida del cálculo analítico, debido a la capacidad que éstas tienen de disipar la energía de la solicitación dinámica aún a niveles muy bajos de deformación. Esta disminución se tiene en cuenta considerando en el modelo idealizado algún tipo de amortiguamiento en su movimiento. (Generalmente se supone un amortiguamiento viscoso).

3. Incidencia del subsuelo en el problema sísmico

De la misma manera que consideramos el comportamiento dinámico estructural de un edificio dependiente de la vibración que recibe del subsuelo, debemos considerar el comportamiento del subsuelo respecto a la roca base que es la que le transmite el movimiento vibratorio.

La constitución del subsuelo definirá una serie de propiedades y características del movimiento sísmico en la superficie de la tierra, cuando ocurre una vibración de la roca base. Esta modificación de las características vibratorias se aprecia en términos de intensidad de los terremotos y de períodos predominantes durante los mismos. Por otro lado el subsuelo actúa en forma análoga a la de un filtro de ondas vibratorias de manera tal que amplifica las aceleraciones y desplazamientos ligadas a determinadas frecuencias, más que las ligadas a otras.

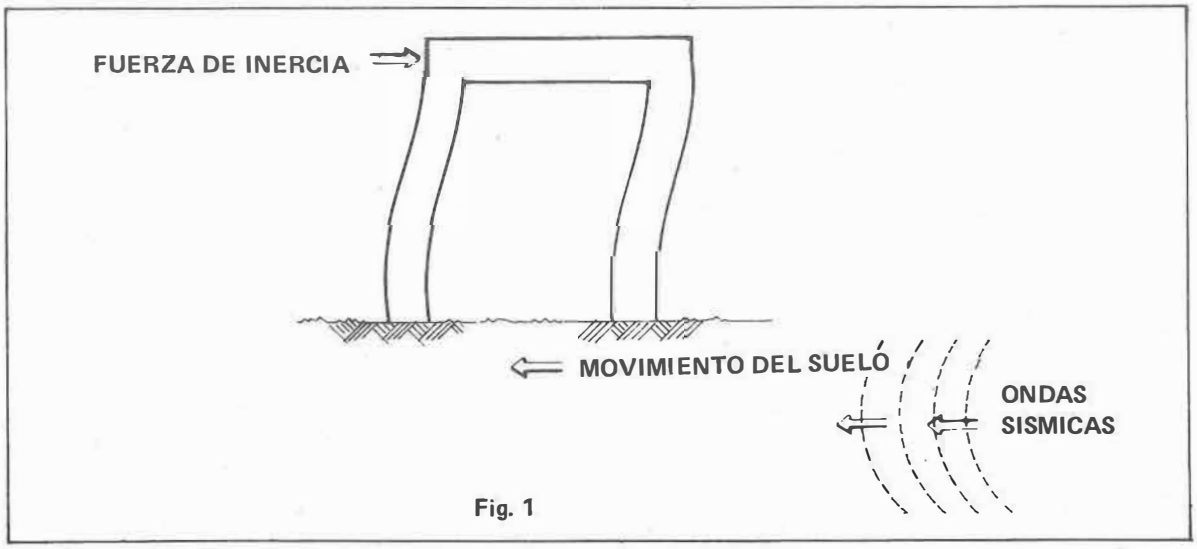
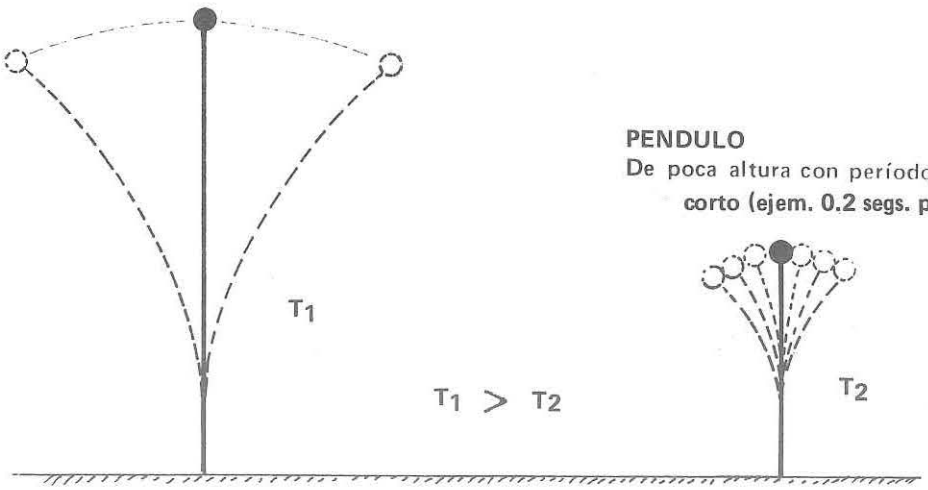


Fig. 1

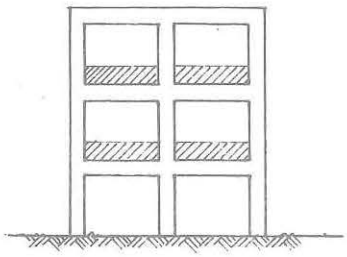
PENDULO (Modelo dinámico).
De gran altura con período de vibración
largo (ejem. 5 segs. por ciclo)

PENDULO
De poca altura con período de vibración
corto (ejem. 0.2 segs. por ciclo)

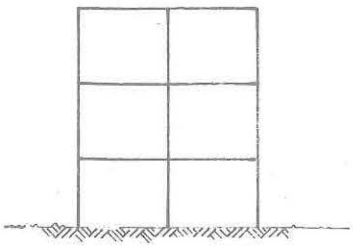


Vibración del suelo
Período To.

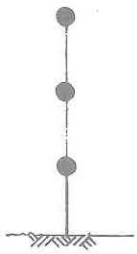
Fig. 2



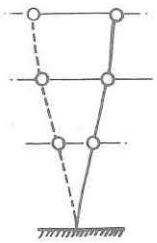
Edificio



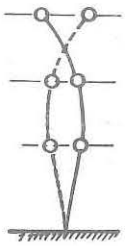
Esquema idealizado
de la Estructura

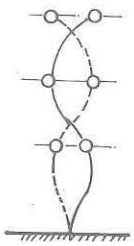


Modelo
Dinámico Simplificado
de Péndulo invertido



MODO FUNDAMENTAL DE VIBRAR
Período de vibración T_1 (Período fundamental)





MODOS SECUNDARIOS DE VIBRAR
Períodos de vibración T_2 y T_3
$T_1 > T_2 > T_3$

Fig. 3

Entonces podemos comprender la importante relación que guardan el período fundamental de una estructura y los períodos que en un suelo dado corresponden a las mayores amplificaciones. De esta manera en terrenos blandos, que amplifican por ejemplo las aceleraciones para períodos altos, ocurre que las estructuras rígidas (o sea de períodos propios bajos) tendrán solicitaciones menores que las estructuras más flexibles. Así mismo, en terrenos duros o firmes, convendrá la construcción más bien de edificios flexibles.

De lo expuesto, se puede deducir una conclusión importante: al inicio del proyecto y luego de un análisis conjunto de la estructura con el suelo, se optará por una estructura más o menos flexible. Si se escoge una estructura rígida se ubicará cuidadosamente los muros o placas para su mejor aprovechamiento. Si se elige una estructura flexible, se definirá en lo posible un esquema aporticado (columnas y vigas) donde si es necesario, se desligarán los muros y tabiques de la estructura misma.

III. FILOSOFIA DEL DISEÑO ANTISISMICO

Es importante indicar cuáles son los alcances de un diseño antisísmico, es decir, definir hacia dónde va orientado, qué logros espera obtener y por lo tanto, qué características especiales ha de tener.

Debemos empezar por aceptar que el propósito básico de un diseño antisísmico es el de construir edificaciones capaces de evitar pérdidas de vida y daños materiales al ocurrir un terremoto. Dentro de esta idea tendrán un tratamiento especial las construcciones en las que operan los servicios públicos vitales. Considerando por un lado el aspecto económico y por otro la incertidumbre de ocurrencia de fuertes terremotos, (altamente destructivos) no puede pretenderse una preservación total de las construcciones. En estos casos que son los más remotos, lo que interesa es evitar las fallas que ocasionen pérdidas humanas, aún cuando se produzcan daños importantes, incluso irreparables, en las edificaciones. Esto significa aceptar que la estructura incursione en regímenes anelásticos cercanos a la rotura (basándose en el carácter instantáneo de la solicitación).

Más bien en terremotos de mediana intensidad debemos aceptar solamente algunos daños reparables, en especial los ocasionados a elementos no estructurales.

Por último, se espera que no ocurra daño alguno durante temblores leves que son los más frecuentes. Esto viene a significar que en estos casos, la respuesta de la estructura se mantendrá dentro del régimen elástico.

El diseño antisísmico prescribe una resistencia de la estructura capaz de soportar, dentro de las limitaciones que luego enunciaremos, determinado tipo de terremotos; las características de éstos serán función de la historia sísmica de la zona, de la frecuencia de ocurrencia, de las características del suelo, de la densidad poblacional de la zona, etc. Por tanto, se entiende que un diseño antisísmico no define solicitaciones (estados de carga), sino más bien prescribe una resistencia que deben tener las estructuras.

Aclarando más este punto, conviene destacar que una estructura que resiste bien los terremotos, no es necesariamente la que soporta mayores cargas horizontales, sino la que en base a ductilidad e hiperestaticidad disipa más energía. Al respecto se reproduce un texto de G. V. Berg y S. S. Thomaide, presentado con ocasión de la II Conferencia Mundial de Ingeniería Antisísmica: "Hace tiempo que los ingenieros han reconocido que la disipación de energía es el factor clave para explicar el comportamiento que observan las estructuras durante los grandes terremotos. El terremoto entrega energía a la estructura y, para sobrevivir sin excesivo daño la estructura debe consumir toda la energía que se le ha entregado. Parte de esa energía es almacenada momentáneamente en ella en forma de energía elástica y cinética, pero en definitiva toda la energía debe ser disipada por fricción interna y deformación plástica, tanto en la parte estructural del edificio como en la parte no estructural".

En base a lo anterior, se podría obtener las características de una construcción antisísmica, tendiendo al cumplimiento de los objetivos siguientes:

a) Seguridad frente a sismos severos.

La seguridad al colapso o falla de una estructura se funda primordialmente en dotarla de la ductilidad necesaria para absorber la energía sísmica. La ductilidad, que para efectos de este trabajo podría definirse como la capacidad para deformarse plásticamente (lo cual implica gran consumo de energía de deformación, a diferencia de la deformación elástica que sólo almacena energía mecánica), se alcanza por un lado con la utilización de materiales adecuados, pero principalmente con una concepción estructural de conjunto. Por este motivo las estructuras aporticadas (constituídas por vigas y columnas) serán preferibles a las basadas en muros o placas de corte.

La hiperestaticidad de la estructura es otro factor muy importante durante la acción de un sismo severo. Si hemos aceptado en estos casos un comportamiento anelástico por tratarse de situaciones instantáneas, concluiremos en que una estructura mientras más hiperestática sea, tiene posibilidades de formar un mayor número de rótulas plásticas* (que como se sabe absorben mucha energía) antes de "colapsar" o fallar al convertirse en un mecanismo inestable. (Fig. 4).

Como aclaración diremos que colapso puede entenderse como el estado de un edificio en el que los ocupantes no pueden ponerse a salvo debido a la falla violenta de la estructura portante o primaria.

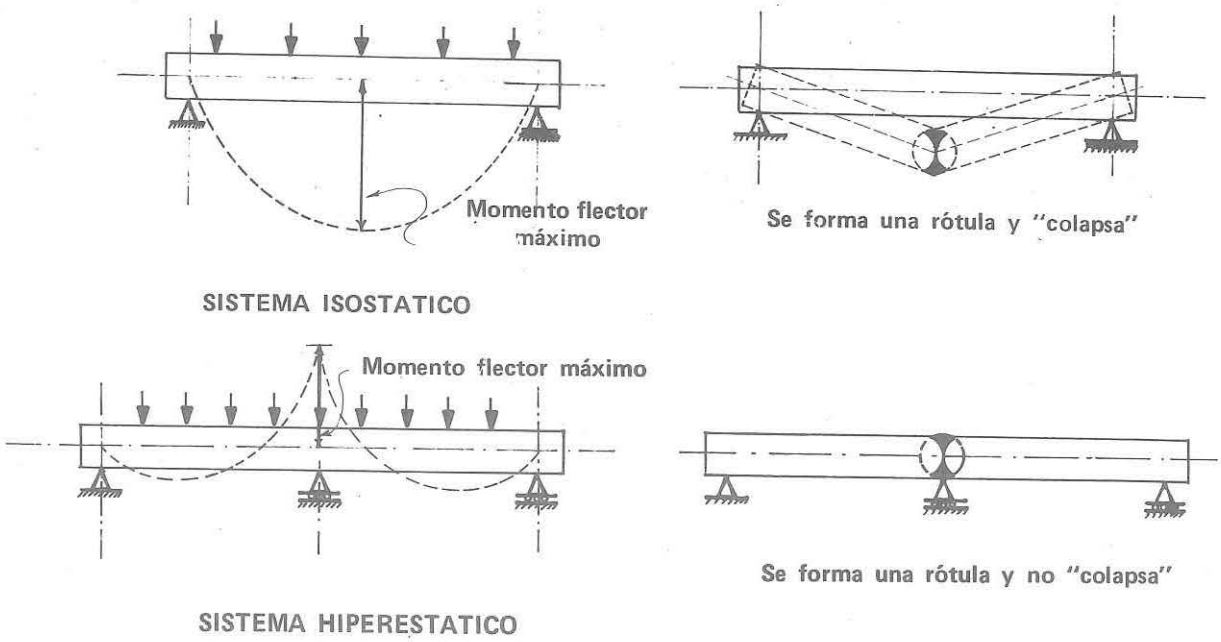
b) Protección contra daños personales y materiales.

En las construcciones, aparte de la estructura portante, existen una serie de otros elementos que si bien no intervienen directamente en velar por la estabilidad de la edificación, deben conservarse razonablemente bien durante un sismo. Puede aceptarse daños de éstos en terremotos severos, pero no en caso de temblores moderados.

***Rótula Plástica.— Una forma sencilla de definir este concepto podría ser la siguiente: Zona de una viga o columna, que debido a la fluencia del material, se comporta como una articulación, cuando actúa el momento flector límite.**

Es frecuente que se haya observado la fluencia en cierta zona de una varilla solicitada por una fuerza de tracción límite. Comprendido este fenómeno es fácil imaginar la fluencia en una viga o columna solicitada por un momento flector límite, donde la deformación se manifiesta mediante un giro de la sección.

Mientras el acero es un material dúctil, el concreto no lo es y por tanto requiere para mejorar su comportamiento frente a acciones externas, que se aumente su capacidad de deformación (sin falla), lo que se logra disponiendo armaduras de acero en cantidad y ubicación adecuadas. Así por ejemplo, las concentraciones de estribos en los extremos de vigas y columnas (Fig. 5), logran, al confinar el concreto, aumentar la ductilidad del elemento permitiendo fuertes deformaciones en fluencia plástica (formación de rótulas plásticas).

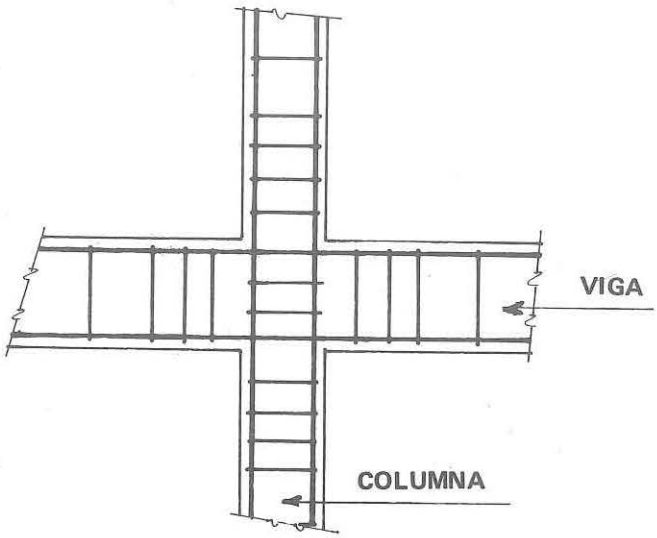


Las estructuras hiperestáticas tienen la posibilidad de formar un mayor número de rótulas antes de "colapsar".
Fig. 4

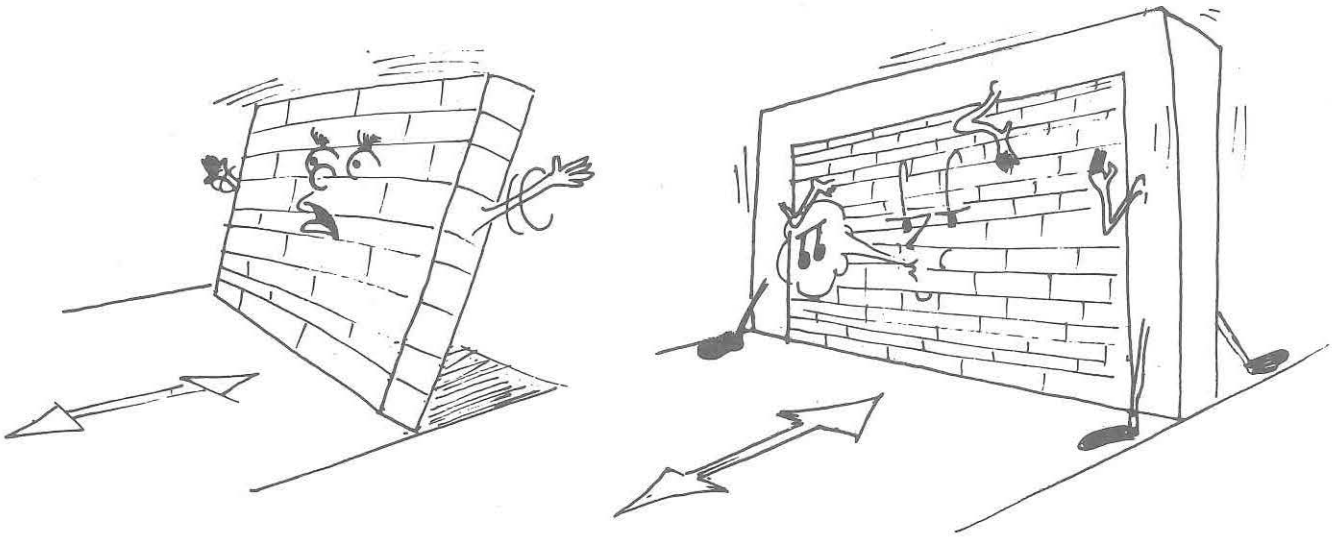
Por otro lado es importante recordar que el diseño debe tender a impedir el daño de las personas dentro y fuera del edificio, ocasionado por desprendimientos o vaciamiento de las partes no estructurales. (Fig. 6). Nos referimos a particiones, ventanas, cornisas, revestimientos, etc.

Lo corriente es que los elementos no estructurales carezcan de estabilidad propia y por lo tanto el problema se reduce a especificar adecuadamente los detalles de éstos, para que sustentándose en la estructura puedan además seguirla en sus movimientos sin coaccionar su libre vibración y sin destruirse ellos mismos.

La observación y estudio de las construcciones destruídas en terremotos pasados, revelan numerosos casos de colapso ocasionados por efecto de la interferencia de elementos no estructurales en la estructura primaria. Un caso bastante común es el de tabiques que no habiendo sido considerados en el cálculo salvo como cargas gravitacionales, han desvirtuado las hipótesis de diseño cumpliendo un rol estructural para el cual no sólo no estaban preparados, sino que además (y esto es lo más importante) variaron la rigidez y comportamiento general esperado de la estructura, tal como había sido concebida y diseñada originalmente.



Nudo ductilizado de concreto armado en base a una concentración de estribos
Fig. 5



El diseño debe impedir el daño ocasionado por los desprendimientos o vaciamientos.
Fig. 6

Un error muy frecuente es construir tabiquería secundaria de ladrillo (material frágil) en edificios aporticados flexibles, sin que exista un estudio especial de su participación en el comportamiento general del edificio. Debe definirse previamente si se desea que estos tabiques sean o no estructurales. En caso de serlos, habrá que considerarlos en el cálculo, a sabiendas de que tenderán a rigidizar el edificio; caso contrario independizarlos de tal forma que queden flotantes, sin impedir las deformaciones de la estructura. Habrá que diseñar para esto los anclajes adecuados a la solución elegida. (Fig. 7). Los anclajes de tabiques flotantes son por lo general costosos pero este mayor costo puede verse compensado con la economía que representa un edificio flexible frente a uno rígido.

c) Control de la excesiva deformabilidad en las construcciones.

Cuando se trate de diseñar edificaciones, especialmente si han de albergar un número elevado de personas, conviene tomar previsiones para evitar que durante la ocurrencia de un sismo se alcancen fuertes deformaciones, ya que éstas con frecuencia producen reacciones de pánico cuyos resultados pueden ser nefastos. Estas observaciones se recogen de las experiencias acumuladas de terremotos anteriores. (Fig. 8).

La tranquilidad de los ocupantes se puede lograr limitando la deformabilidad de las estructuras en base a un aumento de rigidez lateral (fuerza necesaria para producir una deformación unitaria de las mismas). Este será entonces otro factor a tener en cuenta al momento de enfrentar la alternativa de usar una estructura rígida o flexible. Siendo inconveniente definir recomendaciones concretas, es pertinente limitarse solo a fijar criterios que puedan orientar a los proyectistas.

Por el motivo expuesto y también para evitar daños en los elementos secundarios de relleno, ventanas y otros, ocasionados por las deformaciones que les impone la estructura, es conveniente limitar el desplazamiento relativo entre pisos consecutivos a un determinado porcentaje de la altura de entrepiso.

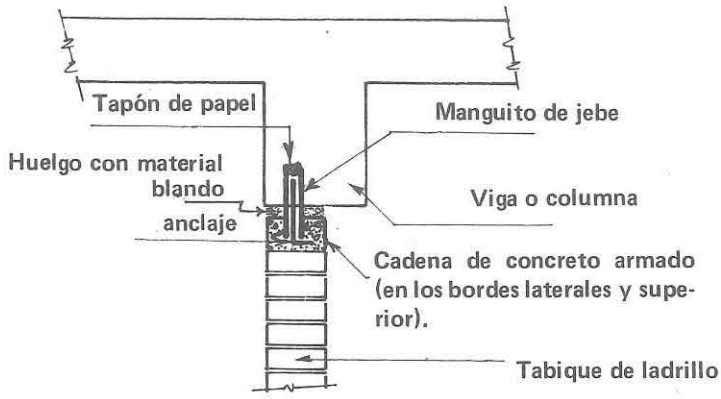
d) Interferencia entre edificaciones vecinas.

El máximo aprovechamiento del área del terreno sobre el que se construye un edificio, por un lado, y la normal descoordinación cronológica, estructural e incluso de materiales utilizados, por otro lado, derivan en construcciones vecinas que teniendo períodos y formas de vibrar diferentes puedan chocar durante un terremoto. (Fig. 9).

La manera de evitar este problema es estudiar la separación que deben tener dos edificaciones vecinas en base a sus comportamientos dinámicos. Esta junta de separación deberá contemplar la suma de las deformaciones posibles de las estructuras contiguas bajo efectos sísmicos, teniendo en cuenta además la posibilidad de giros de las fundaciones.

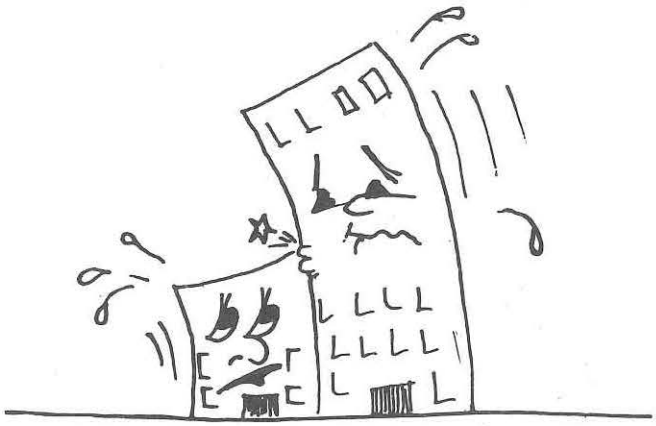
En edificaciones de poca altura, caso común de las viviendas unifamiliares donde existen razones para construirlas una al lado de la otra, y sabiendo que las deformaciones son de menor importancia, pues incluso normalmente se trata de estructuras rígidas, se puede pensar en la utilización de algún material que minimice el efecto de choque, actuando como amortiguador del mismo (madera, productos sintéticos, etc.).

Nuestro reglamento general de construcciones estipula la separación mínima que deben conservar dos edificaciones adyacentes. Sin embargo, la inobservancia de la norma en este punto es alarmante, como es sencillo comprobar en las construcciones existentes. Cada edificación debiera mantener la separación mencionada respecto a su límite de propiedad, independientemente de si hay o no construcciones vecinas.



Ejemplo de Anclaje en Tabiques no Estructurales (flotantes)
Fig. 7

Debe controlarse la excesiva deformabilidad por razones de pánico.
Fig. 8



Interferencia entre Edificaciones vecinas
Fig. 9

IV. GUIAS DE DISEÑO

—Ductilidad e Hiperestaticidad.

En el capítulo anterior se mencionó la importancia de que las edificaciones posean características de buena ductilidad e hiperestaticidad. Respecto a la ductilidad solo cabría añadir que ésta se puede lograr con diversos materiales, siempre y cuando se observen determinadas recomendaciones que esbozaremos a grandes rasgos.

Construcciones metálicas: diseño especial de nudos, de manera tal de permitir la formación de rótulas plásticas que logren rotaciones con gran disipación de energía.

Construcciones de concreto armado: diseño de uniones donde el concreto se confine en base a la colocación de buen número de estribos, de modo de lograr junto con el acero longitudinal dispuesto en cantidad adecuada, un comportamiento plástico con fuertes deformaciones (ductilidad). (Ver Fig. 5).

Construcciones de albañilería: siendo el ladrillo un material frágil es necesario confinarlo con la ayuda de elementos dúctiles de concreto armado o de asentarlo armado con varillas de acero. Se ha comprobado que el comportamiento de la albañilería confinada o reforzada es bastante satisfactorio por la ductilidad que adquiere el conjunto. Un estudio experimental ejecutado por Luis Jorquera (Instituto de Investigaciones y Ensayos de Materiales-Chile) demuestra que la energía necesaria para originar el colapso de un muro es veinte veces mayor para las albañilerías reforzadas, que para las simples.

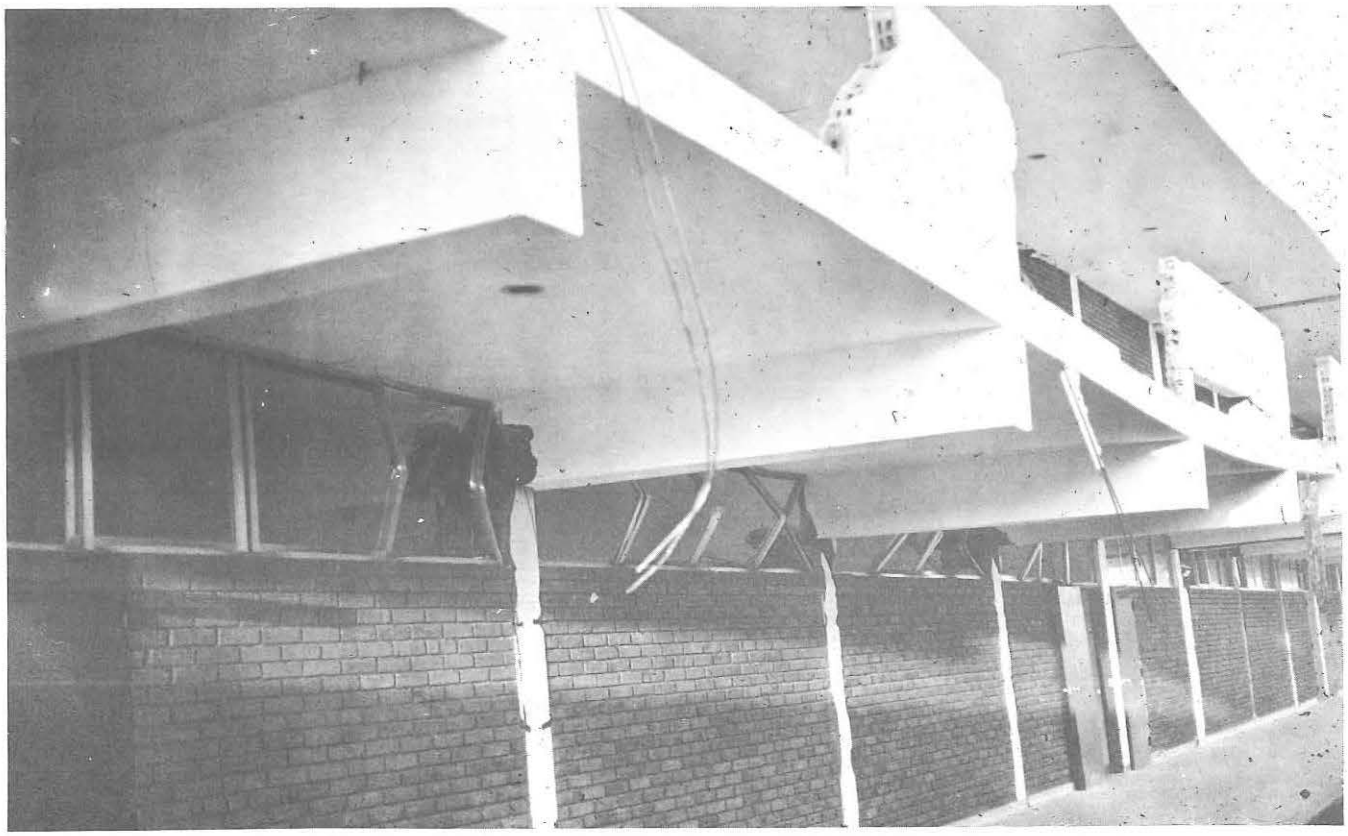
Independientemente de las consideraciones expuestas y, como las fuerzas de inercia son proporcionales a las masas o pesos que conforman un edificio, obviamente trataremos de que éstos sean mínimos. Para eso habrá que optar por formas estructurales más esbeltas y materiales más ligeros.

—Estructura uniforme y simétrica.

Resulta primordial que el estudio arquitectónico-estructural de un edificio derive en esquemas de uniformidad y simetría. Tanto mayor es esta exigencia conforme se trate de edificios más altos.

La forma más sencilla de lograr la

Otro caso de columna "corta", empeorado por la acción destructora propia de la libre vibración del voladizo. Nótese además los parapetos del 2o. piso, construidos en ladrillo sin contar con refuerzo alguno. Chimbote, Sismo 1970.



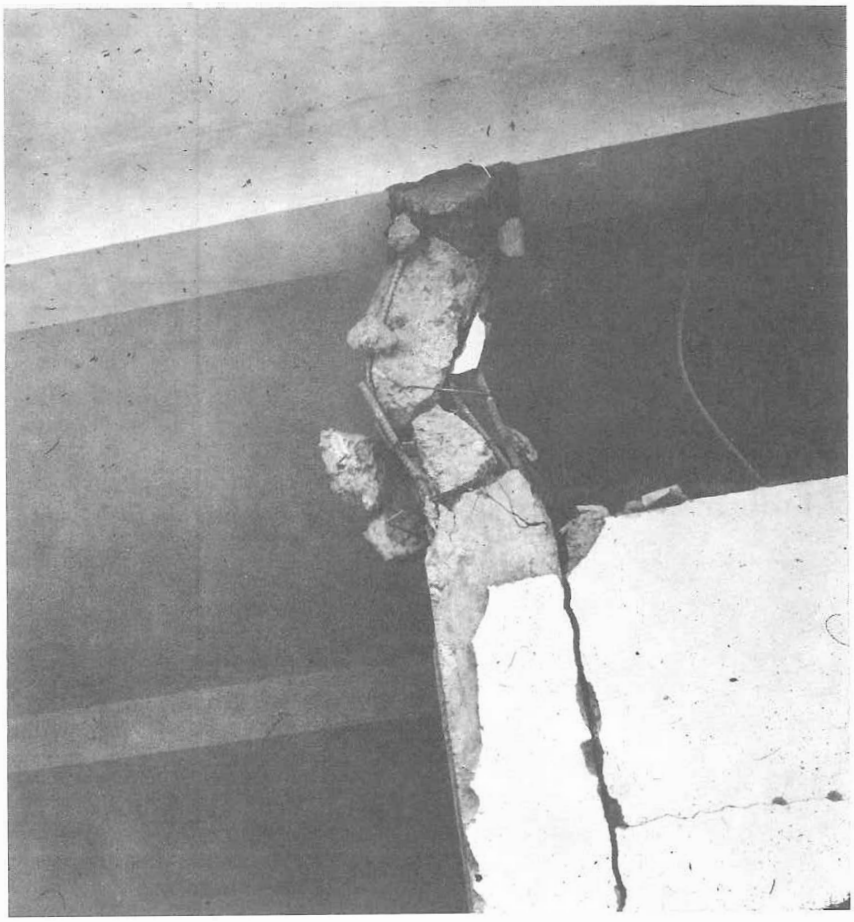
uniformidad de estructuración es disponer los elementos soportantes considerando la existencia y aplicación de una retícula estructural de diseño, con variaciones suaves de un piso a otro. Debe procurarse que la distribución de masas y rigideces sea lo más regular posible.

La simetría de la estructura es necesaria para minimizar los efectos torsionales de las fuerzas sísmicas. La innumerable cantidad de casos de colapso y fallas graves que han ocurrido por la falta de simetría estructural, nos obliga a no aceptar (ni siquiera considerar) diseños arquitectónicos asimétricos en el caso de edificios altos (más de 15 pisos).

Sin embargo, no debe exagerarse esta limitación; en construcciones de poca altura se puede aceptar distribuciones de elementos en planta con cierta asimetría, siempre y cuando el centro de masas y el centro de rigideces se encuentren muy próximos*. Esto último se puede obtener variando la rigidez de los distintos elementos estructurales (ya sea modificando sus dimensiones, formas o el material de que estén constituídos) o separando adecuadamente las diferentes partes del edificio. No obstante, las combinaciones estructurales con diferentes materiales, no son la mejor solución y deben ser evitadas en lo posible.

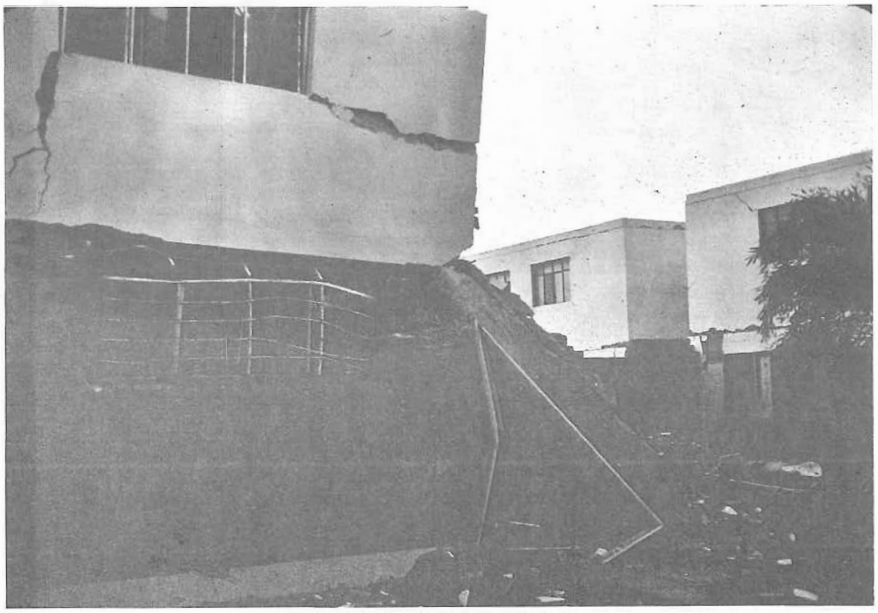
Como aclaración se puede mencionar, que los elementos rígidos "atraen" el centro de rigidez y por tanto la ubicación de los mismos (muros, placas de concreto armado, escaleras, núcleos de ascensores, etc.) será de crucial importancia, para optimizar o equilibrar la estructuración. (Fig. 10).

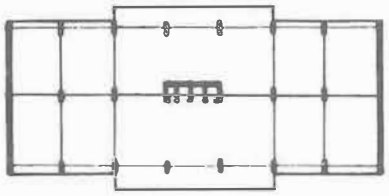
***Centro de masas y centro de rigideces.—Se podría definir el centro de masas de un entrepiso como el punto de aplicación de la fuerza cortante actuante en el mismo y su ubicación en planta será la del centro de gravedad de las masas situadas sobre el nivel considerado. Centro de rigideces de entrepiso sería el punto donde podría considerarse concentrada la resistencia a la deformación lateral de dicho entrepiso y su ubicación se determina como si se tratase del "centro de gravedad" de las rigideces de cada elemento de ese nivel. La distancia entre el centro de masas y rigideces es la excentricidad con que acciona la fuerza cortante, produciendo un efecto equivalente al de un momento torsor, que actúa sobre el entrepiso considerado globalmente como una sóla pieza.**



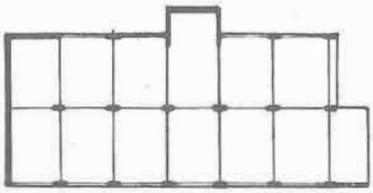
Columnas cuyo comportamiento dinámico, correspondía en ciertos planos (los de los tabiques adyacentes con vano superior), al de una columna "corta", que debió ser zunchada o reforzada con gran cantidad de estribos. Casma, Sismo 1970.

Viviendas de albañilería sin elementos dúctiles (columnas o vigas de amarre). Chimbote, Sismo 1970.

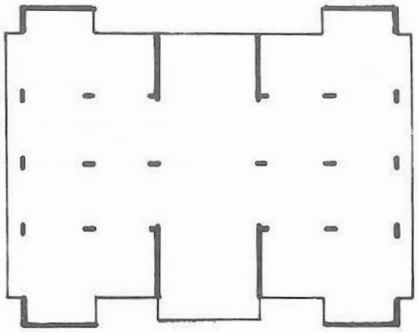




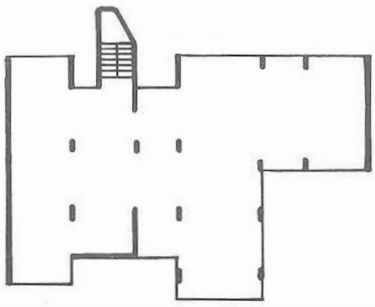
Planta simétrica



Planta asimétrica

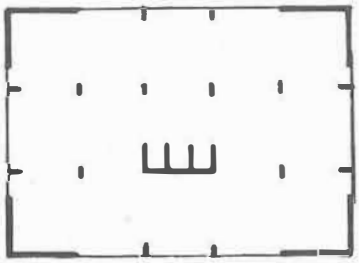


Planta simétrica

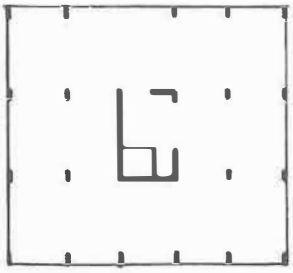


Planta asimétrica

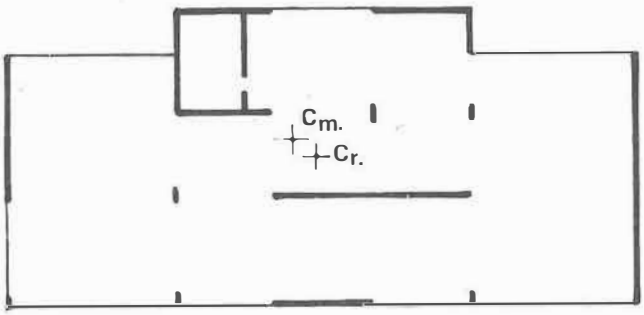
Fig. 10



Planta con buena rigidez torsional.



Planta sin adecuada rigidez torsional.



Planta asimétrica aceptable por tener poca distancia entre el centro de masas y el de rigideces, además de una adecuada rigidez torsional.

Fig. 11

Un ejemplo frecuente de daño ocasionados por la irregularidad de rigideces en planta y que es interesante mencionar, es el de los edificios que constan de dos o más volúmenes unidos por un sector angosto y en los cuales, uno de dichos volúmenes es más rígido que el otro.

—Rigidez torsional en planta.

Si se tiene en cuenta que el efecto torsional de las fuerzas sísmicas es siempre importante, no sólo por la naturaleza misma de la solicitación (componentes torsionales de un terremoto), sino por asimetrías constructivas, de distribución de sobrecargas, etc., aún en edificios que tengan planta simétrica, deberá disponerse los elementos resistentes de modo que por su forma y ubicación proporcionen una rigidez torsional adecuada. (Rigidez torsional: Fuerza necesaria para producir un giro unitario en la planta considerada del edificio).

La Fig. 11 aclara el concepto de rigidez torsional descrito.

—Criterios de seccionamiento de la estructura.

Frecuentemente es posible obtener una buena solución estructural para un anteproyecto arquitectónico complejo, dividiendo adecuadamente el edificio en varias unidades independientes.

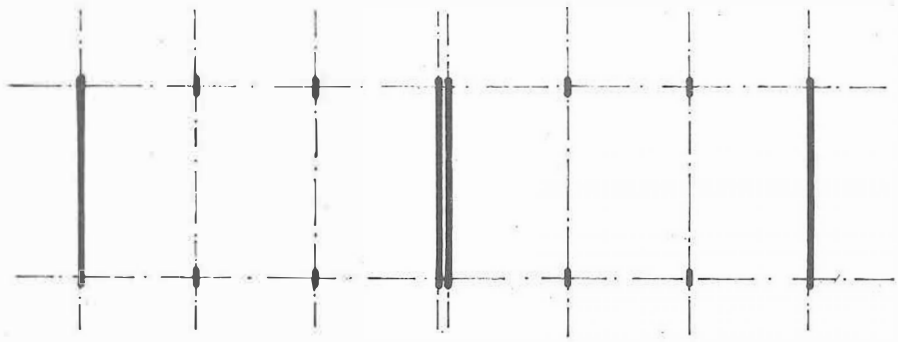
A continuación se describirá algunos casos corrientes de donde podría generarse un concepto para ubicar las juntas o separaciones.

Edificios con plantas alargadas.— En estos casos pueden ocurrir dos situaciones:
—Que los elementos de mayor rigidez lateral se encuentran muy distantes entre sí.
—Que dichos elementos estén asimétricamente distribuídos.

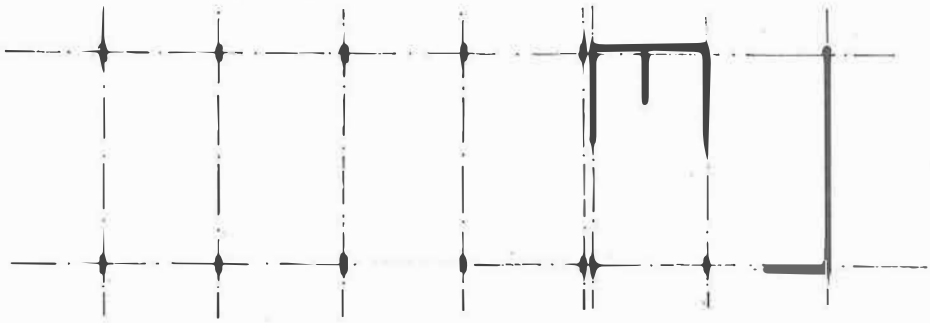
Ambos problemas se pueden solucionar con juntas adecuadas como se describe en las figuras 12 y 13. En la decisión de la ubicación de estas juntas debe tenerse en cuenta que exagerar el número de juntas puede significar la duplicación de los elementos resistentes, con el consiguiente perjuicio económico. Las juntas deben servir, por tanto, no sólo para controlar los esfuerzos producidos por cambios de temperatura, como es tradicional, sino también para mejorar simultáneamente, la distribución de rigidez lateral.

Edificios con variaciones bruscas en altura o en planta.— En general las discontinuidades tienden a crear problemas de concentración de esfuerzos difícilmente solucionables.

En problemas dinámicos es conocido el hecho de la "independencia" que tienden a cobrar en su



Edificio simétrico con junta que forma dos unidades simétricas. La duplicación del elemento central es necesaria para lograr dicha simetría.
Fig. 12



Junta que convierte un edificio asimétrico en dos unidades aceptablemente simétricas
Fig. 13

Interferencia en la vibración de construcciones vecinas o partes de un mismo edificio.

movimiento las distintas partes de una estructura, en la medida en que se puedan diferenciar estas partes por sus características vibratorias. Dependiendo de la distribución de masas en el edificio y las rigideces laterales relativas de los elementos que lo componen, ocurrirá que el edificio vibre como un todo (con tendencia a vibrar con la frecuencia del modo fundamental), o que las distintas partes vibren independientemente (con tendencia a vibrar con la frecuencia del modo fundamental de esa porción de la estructura). Si se produce lo segundo, es decir, que existan partes del edificio con características vibratorias distintas, ocurrirán serios problemas en las zonas de contacto o uniones entre ellas, que justamente son zonas donde habrá que ubicar las juntas de separación para lograr una franca y estudiada independencia. (Figs. 14, 15 y 16).

En general todo tipo de juntas, al igual que en caso de construcciones vecinas, deberá contemplar la suma de las deformaciones posibles en las partes seccionadas, debidas a los efectos sísmicos.

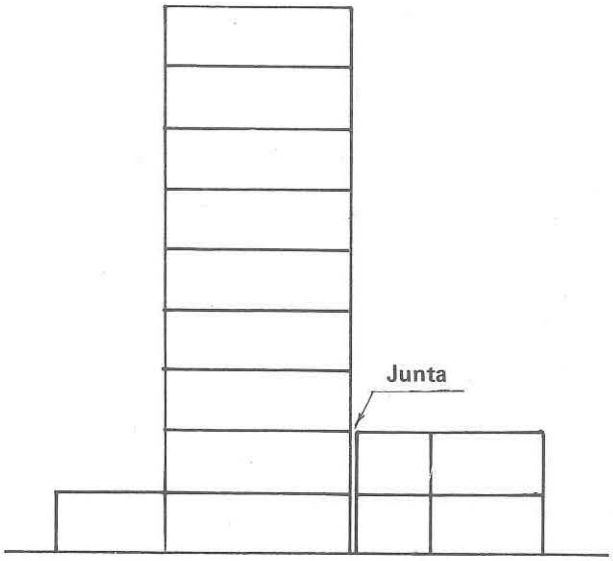
Se tendrá especial cuidado en evitar, que por descuido, se introduzcan en las juntas pedazos de materiales rígidos (rebabas, escombros, etc.). Los espacios de separación podrán tener un material comprensible de relleno, que permita movimientos relativos sin transmitir fuerzas significativas.

Si por algún motivo no fuera viable lograr la separación en las zonas de fuertes discontinuidades, habrá que considerar en el diseño el efecto de esta irregularidad poniendo un especial cuidado en reforzar adecuadamente los elementos comprometidos.

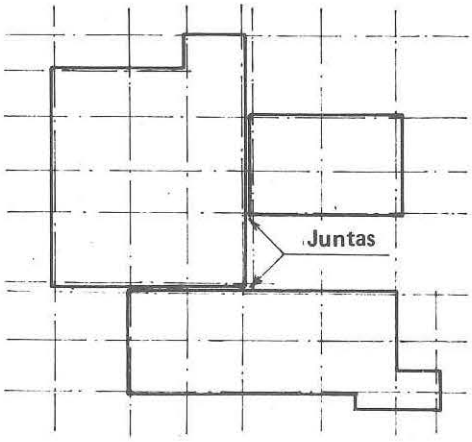
--Las Fundaciones.

El carácter oscilante y alternativo de la solicitación sísmica produce cambios bruscos en los esfuerzos que se presentan en las fundaciones, que obligan a tener precauciones especiales para su diseño, no solo en relación a la bondad del material constitutivo sino principalmente en la forma y conexiones que éstas deben tener.

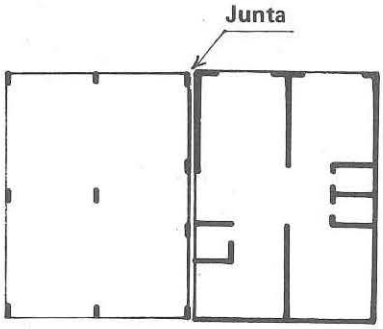
La necesidad de evitar corrimientos diferenciales horizontales, hace pensar que la mejor solución sería el usar fundaciones contínuas o en su defecto amarrar entre sí las fundaciones aisladas, mediante vigas de fundación dise-



Esquema de la elevación de un edificio con la junta recomendable
Fig. 14

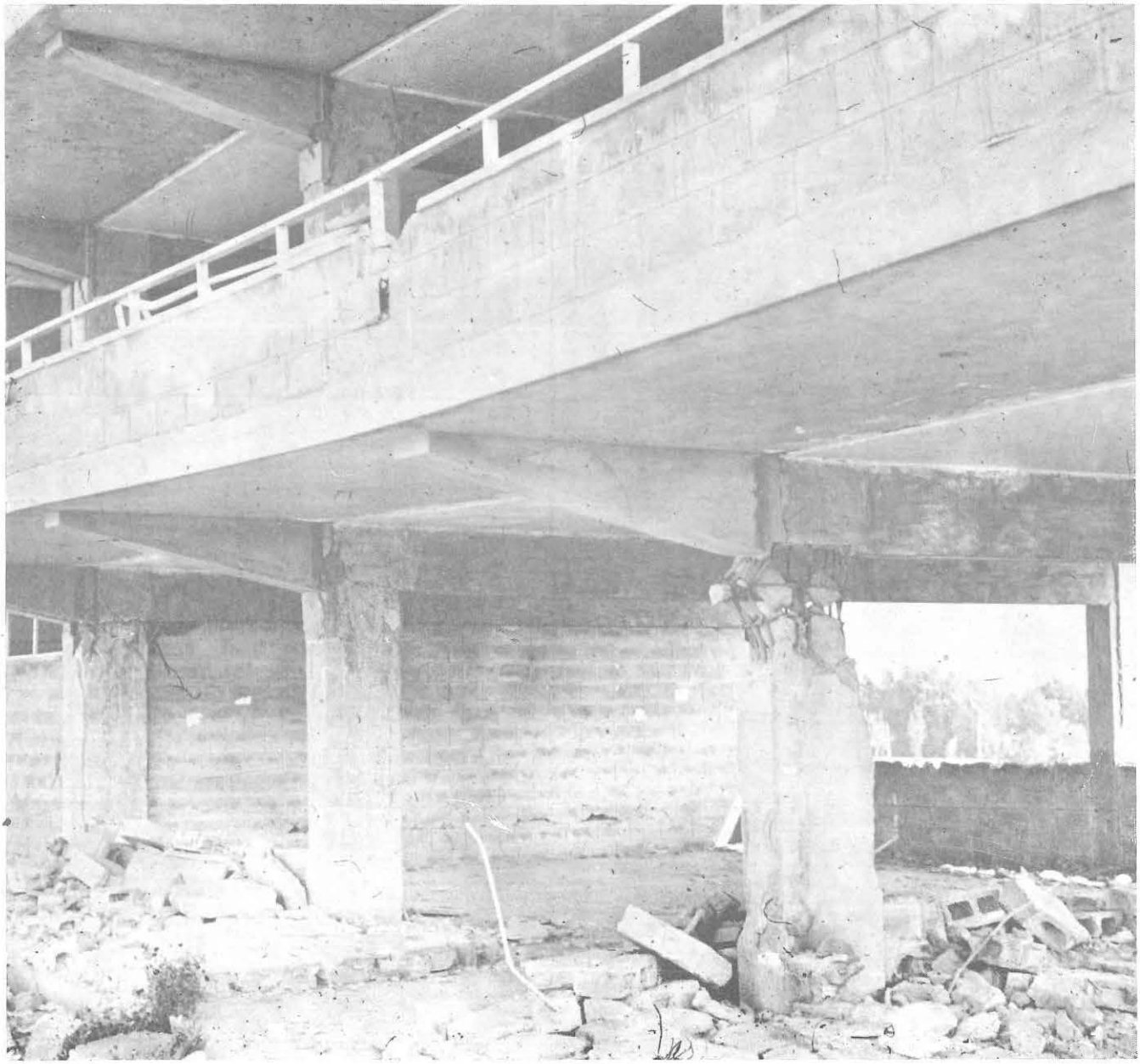


Esquema de la planta de un edificio con las juntas recomendables.



Junta en planta para separar una zona flexible de otra rígida.
Fig. 16

Nudos poco ductilizados, tabiques en el suelo por falta de elementos de anclaje. Chimbote, Sismo 1970.

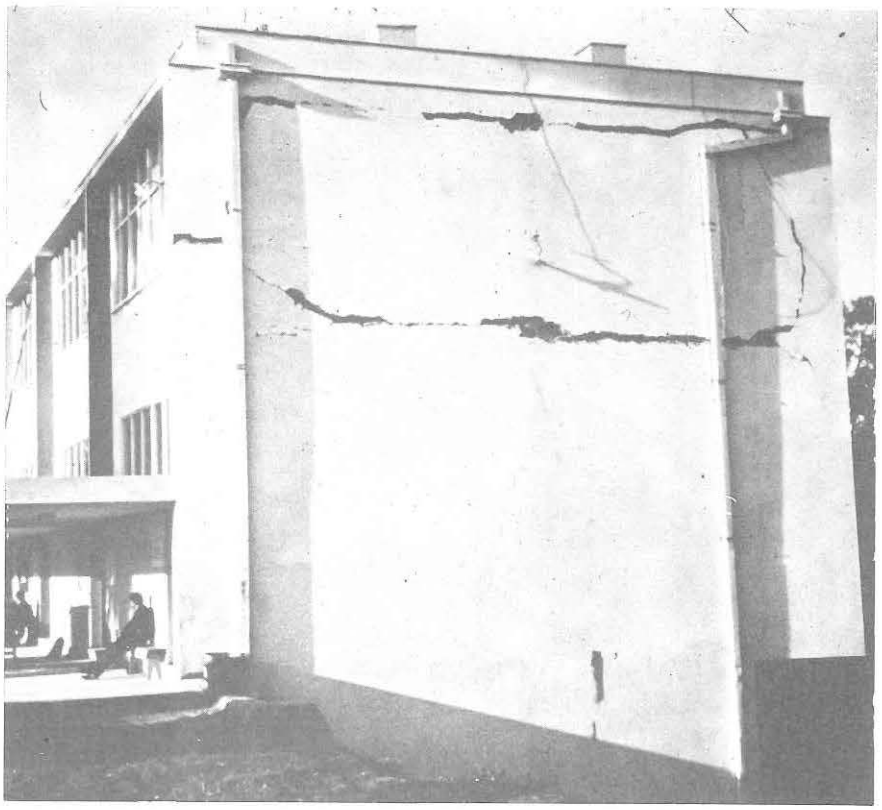


ñadas de forma tal que puedan transmitir las tracciones o compresiones que se originen, o si se quiere, diseñar estas vigas como para soportar momentos sísmicos.

Dependiendo de la solución estructural, covendrá mantener la independencia de las fundaciones de una unidad o parte, de las de otra, que hayan sido separadas por los motivos que se indicaron anteriormente, así como las fundaciones sobre suelos de diferentes características o fundaciones ubicadas en diferentes profundidades (siempre que sean importantes).

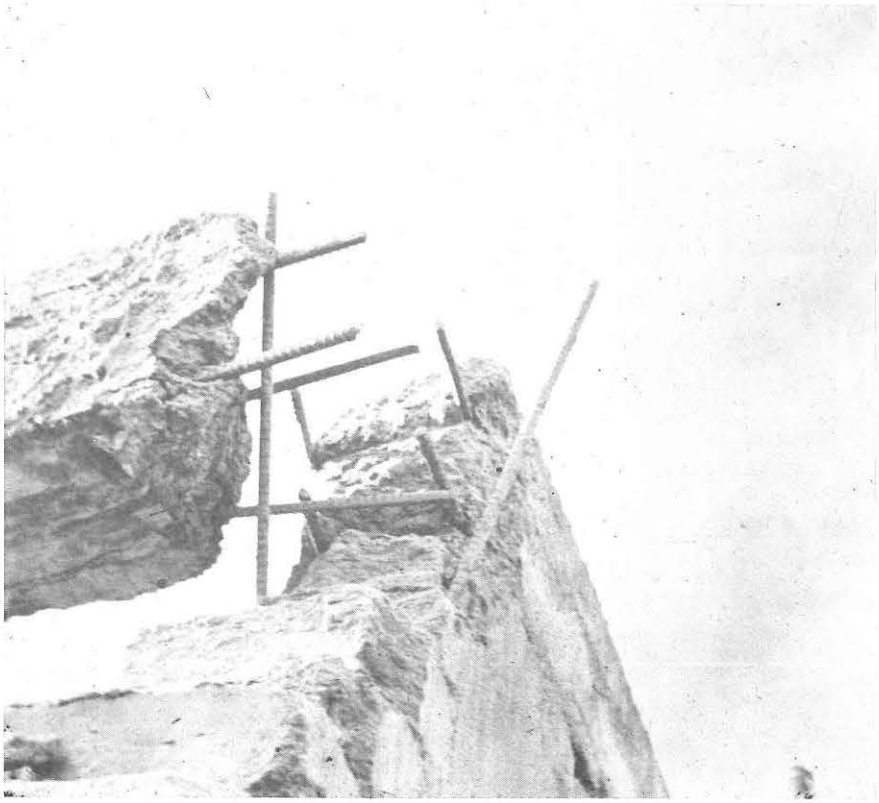
En estos dos últimos casos se deberá mantener la independencia en el resto del edificio y no solo en la cimentación.

Cabe mencionar aquí, un aspecto importante respecto del comportamiento de los muros armados, núcleos de ascensores, escaleras (si son solidarias con la estructura), etc., y en general elementos muy rígidos que absorban gran parte de las fuerzas sísmicas. Elementos que algunas veces son incluídos específicamente para rigidizar el edificio y para absorber fuerzas sísmicas. Sin embargo, hay que tener presente que si no es posible dar una cimentación adecuada a cualquiera de los elementos mencionados, no sólo no se conseguirá el propósito buscado, sino que, en muchos casos los elementos rígidos producirán daño en los menos rígidos, al momento de una acción sísmica.



Es muy frecuente encontrar fallas ocasionadas por mala ejecución de las juntas de construcción o llenado. Valparaíso, Sismo 1971.

Falla ocasionada por la falta de anclaje de las armaduras. Los sismos detectan así, errores que en condiciones estáticas pueden pasar desapercibidos. Casma, Sismo 1970



V. TECNICAS CONSTRUCTIVAS Y DE INSPECCION

—Coherencia entre las hipótesis del cálculo y la construcción.

En nuestro medio se aprecia con frecuencia una fuerte falta de coordinación entre las consideraciones e hipótesis planteadas por los proyectistas y los trabajos efectuados en la obra. El problema parece centrarse en la transmisión de las hipótesis de forma que no queden a libre interpretación de los constructores o inspectores.

Dentro de este renglón se puede ubicar la ya mencionada actuación estructural de lo que se supone "no estructural". La importancia de este punto justifica la repetición de lo ex-

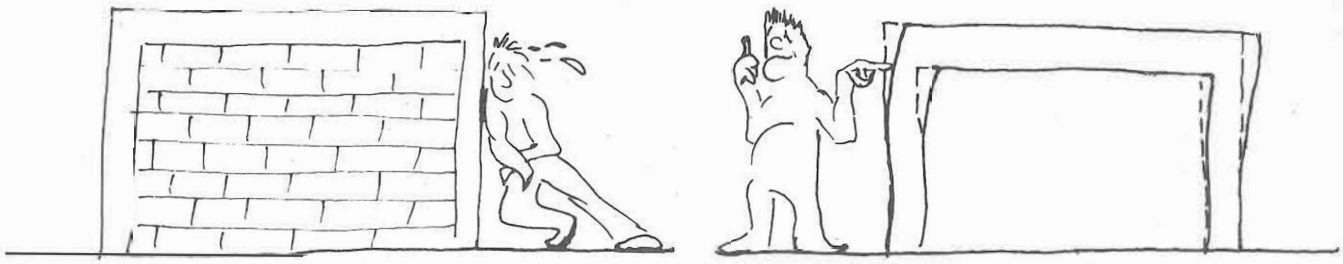
presado al tratar sobre la protección contra daños materiales.

Hasta hace muy poco tiempo, nuestros calculistas no habían dado a las consideraciones sísmicas la importancia que hoy día se les conceden. El cálculo estructural se reducía frecuentemente a consideraciones estáticas e inclusive a veces sin considerar solicitaciones sísmicas. De acuerdo a esto, resultaba aceptable considerar que la tabiquería ubicada dentro de la estructura, no tuviera mayor interferencia con ella, máxime si se suponía que la tabiquería era construída posteriormente, cuando ya se habían producido las deformaciones elásticas de la estructura debidas al peso propio, y si se suponía además que las juntas entre tabiquería y estructura dejaban algún margen para movimientos relativos. En los planos de estructuras no aparecían indicaciones sobre la tabiquería.

Este criterio obviamente carece de todo fundamento si se admite que puedan presentarse fuerzas horizontales debidas a un sismo. Si se permite que la tabiquería quede relativamente libre entre la estructura, el riesgo de desplome es muy grande, y no sería coherente aceptarlo según lo expresado en los objetivos de un diseño antisísmico. Este peligro se puede evitar (siempre que realmente sea mejor desde el punto de vista estructural, aislar los tabiques), con anclajes adecuados que son muy costosos, como ya se expresó anteriormente. Si en cambio, se fija la tabiquería a la estructura de manera de que pueda esperarse un comportamiento conjunto, debe considerarse así en el análisis estructural. Cada tabique influirá en la ubicación del centro de rigidez, porque habrá aumentado considerablemente la rigidez lateral del pórtico vertical que lo comprende. Al respecto conviene destacar que la rigidez relativa de un muro de ladrillo es mucho mayor que la del pórtico que lo enmarca.

Es decir, producir un centímetro de deformación lateral en el plano de un muro de ladrillo requiere una fuerza horizontal bastante mayor que la necesaria en el caso de un pórtico. (Fig. 17).

Resulta entonces que la ubicación de un tabique o muro de ladrillo en cualquier punto de la construcción no es algo que se pueda decidir sin hacer consideraciones de tipo estructural, en relación a su participación en el comportamiento de conjunto. Ni qué decir de las variaciones de ubicación de muros decididas en obra, sin consultar al calculista; o peor todavía, las construcciones "adicionales" de albañilería cuando la edificación ya está en servicio. (Fig. 18). Difícil olvidarse del caso de un edificio fuertemente dañado por un sismo en el que confluían dos de los errores mencionados. El edificio que había sido calculado como una estructura aporticada, fue rellenado de albañilería de ladrillo calcáreo macizo en todos los pisos menos el primero que era de estacionamiento. (Variando totalmente las rigideces supuestas y



La rigidez relativa de un muro de ladrillo es mucho mayor que la del pórtico que lo enmarca.

Fig. 17

creando principalmente una discontinuidad en la distribución de rigideces en altura); además posteriormente se construyó, sólo en un extremo del primer piso, muros de ladrillos que producían una grave asimetría en dicho piso. El edificio dañado tuvo un comportamiento dinámico ni siquiera parecido al del modelo estructural con que se diseñó. ¿Error de transmisión de las hipótesis consideradas? ¿De coordinación Constructor-Calculista ? ¿Inspección? ¿Falta de divulgación de técnicas antisísmicas? En cualquier caso, un error del equipo de profesionales participantes en donde, como sucede con los procesos de culpabilidad, la responsabilidad se diluye.

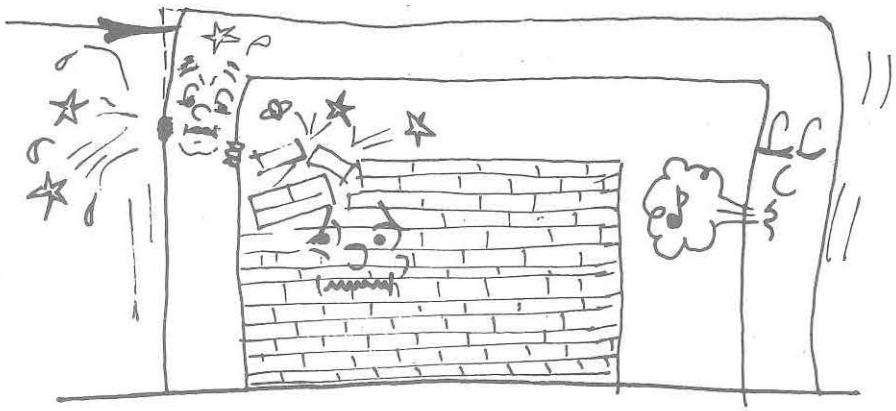
—Reglamento de Construcciones. Normas Antisísmicas.

Existe un reglamento nacional de construcciones que naturalmente se perfeccionará en la medida en que los profesionales se esmeren en conseguirlo y conforme se pueda desarrollar estudios e investigaciones propias teniendo en cuenta las peculiaridades de los suelos, materiales, sistemas constructivos, mano de obra, etc. En este reglamento aparecen normas que orientan al diseño y ejecución de las obras, incluyendo aspectos que influyen en el comportamiento de las estructuras durante un sismo. Conviene recordar algunos tópicos que deben ser considerados:

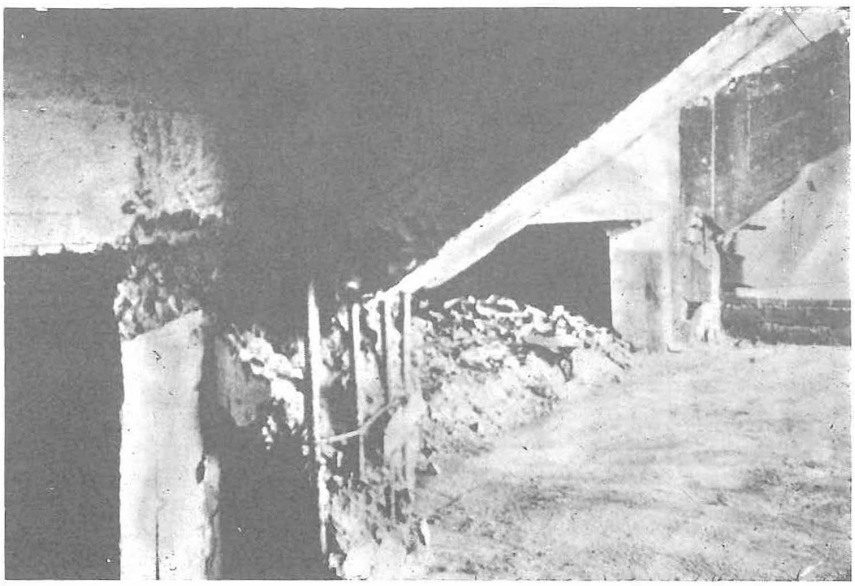
- o Precauciones en los elementos no estructurales de fachada.
- o Separaciones en colindancias y juntas de separación.
- o Confinamiento adecuado de muros de albañilería.
- o Junta de llenado o de construcción (que constituye el motivo más frecuente de fallas durante terremotos).
- o Normas sobre calidad de materiales.
- o Tolerancias.
- o Obligatoriedad de especificaciones técnicas con requerimientos mínimos e instrucciones de ejecución.
- o Detalles de uniones (anclaje de armaduras y estribaje suficiente cuando se trate de concreto armado, especificaciones de soldadura, conectores, etc., cuando se trate de madera o estructuras metálicas).

—Calidad de Materiales.

Obviamente para lograr el comportamiento deseado de la edificación, es menester que la calidad de los materiales de construcción sean congruentes con el partido estructural elegido. Los índices de dicha calidad son variables y se podrá encontrar dispersiones fuertes con excesiva frecuencia, especialmente en materiales preparados en obra. El control de la calidad de los materiales

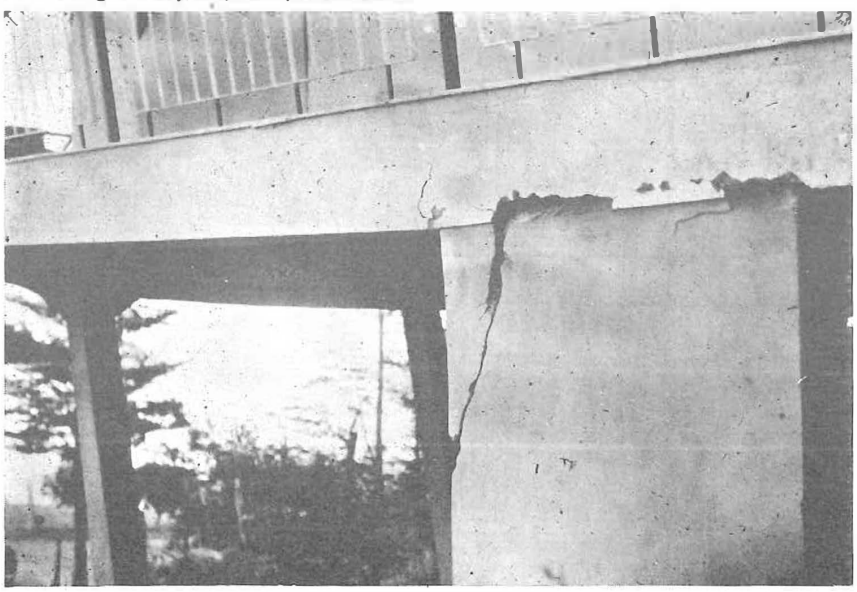


Muro supuesto "no estructural", que por su gran rigidez varía el comportamiento de las columnas del pórtico (en el plano de la figura). La columna izquierda, es más rígida que la otra y por tanto atrae sobre sí mayor fuerza sismica.
Fig. 18



Falta de estribos en las uniones para conseguir la formación de rótulas plásticas, de mucha deformabilidad y gran disipación de energía. Tribuna en Valparaíso, Sismo 1971.

Muro rígido dañado por la fuerte torsión en planta que sufrió esta vivienda, debido a una distribución asimétrica de rigideces (columnas muy flexibles que giraban alrededor de un núcleo rígido). Papudo, Chile, Sismo 1971.



constituye un factor primordial para evitar daños considerables en un sismo.

Se puede también nombrar algunas tareas, donde es común cometer errores clasificables en este rubro:

- o Graduación y limpieza de los áridos.
- o Dosificación adecuada del concreto.
- o Calidad de arcillas para la ejecución de ladrillos.
- o Dimensiones y resistencia de los mismos. Calidad de morteros.
- o Curado de elementos de concreto.
- o Conocimiento de las características de la madera empleada (resistencia, humedad, durabilidad, mermas por aplicación de sustancias preservativas, etc.).

—Coordinación entre los proyectos de instalaciones y el de estructuras.

En muchas oportunidades ocurre que la presión del corto tiempo disponible para realizar, tanto los diferentes proyectos de la obra como la construcción de la misma, es tal que imposibilita una coordinada actuación del equipo de proyectistas. No solo en referencia a la concepción global del proyecto, sino más bien a la relativa incompatibilidad que puede presentarse entre algunos de estos proyectos. Se dan casos por ejemplo, en que las instalaciones sanitarias o de aire acondicionado perforen indiscriminadamente los elementos estructurales. El ingeniero constructor resolverá o no el problema, en la medida no solo de sus conocimientos y experiencia (que pueden no ser tan completos como los de los especialistas) sino en que realmente exista una solución aceptable al momento en que él lo perciba. Lógicamente debe planearse anticipadamente que los elementos de cada proyecto no interfieran entre sí y esto será el resultado natural de un trabajo en equipo de los profesionales participantes, desde los momentos iniciales del desarrollo arquitectónico.

Hay quienes con poca seriedad, menosprecian las precauciones sísmicas para edificaciones de uno o dos pisos. Managua, Sismo 1972.

La responsabilidad se diluye

Agradecimiento:

El autor expresa su reconocimiento a los compañeros de trabajo que cooperaron en la preparación del presente artículo. A Carl Lüders por la autorización para reproducir ciertas fotos y a José Sebastiani por la confección de las caricaturas.

OFICINA DE PUBLICACIONES

sagsa