21

Diseño sísmico

Instituto Técnico
de la Estructura
en Acero



ITEA

ÍNDICE DEL TOMO 21

DISEÑO SÍSMICO

Lección 21.1: Visión Global del Comportamiento Sísmico de Sistemas Estructurales 1

1 PRESENTACIÓN DE LAS DIAPOSITIVAS DE DAÑOS DE TERREMOTOS .. 4
2 DISCUSIÓN DE LOS DAÑOS CAUSADOS POR LOS TERREMOTOS 5
3 COMPORTAMIENTO DEL SUELO 8
4 INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA 11
5 EL COMPORTAMIENTO DE LOS CIMIENTOS 12
6 LA RESPUESTA DE LAS ESTRUCTURAS PORTICADAS DE ACERO 13
7 EL COMPORTAMIENTO DE LOS FORJADOS 15
8 EL COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS SECUNDARIAS Y DE ANEXOS 16
9 EL COMPORTAMIENTO DE LA MAMPOSTERÍA Y DE LOS REVESTIMIENTOS 19
10 DEPÓSITOS 22
11 RESUMEN FINAL 23
12 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 23
13 AGRADECIMIENTOS POR LAS DIAPOSITIVAS 23

Lección 21.2: Introducción al Diseño Sísmico: Riesgo y Peligro Sísmico 25

1 INTRODUCCIÓN 28
2 EL EPISODIO SÍSMICO 29
2.1 Generalidades 29
2.2 Orígenes de los Seismos 29

2.3 Características del Terremoto 29
2.4 Espectro de Respuesta 37
3 CARACTERIZACIÓN DEL TERREMOTO PARA EL PROYECTO ESTRUCTURAL 40
4 OBSERVACIONES FINALES 44
5 RESUMEN FINAL 45
6 BIBLIOGRAFÍA 45
7 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 45

Lección 21.3: Comportamiento Clínico de Elementos y Uniones de Acero 47

1 INTRODUCCIÓN 50
2 DUCTILIDAD 52
3 MATERIAL 53
4 SECUENCIAS DE CARGA 55
5 PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS DE ECCS 57
5.1 Procedimiento completo de ensayos 57
5.2 Interpretación de los Ensayos 57
6 ELEMENTOS DE ARRIOSTRAMIENTO 60
7 VIGAS Y PILARES 63
8 UNIONES 67
9 RESUMEN FINAL 75
10 BIBLIOGRAFÍA 75
11 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 75

Lección 21.4: Análisis Estructural para Cargas Sísmicas 77

1 GENERALIDADES 80
2 MÉTODOS DIRECTOS DEL ANÁLISIS DINÁMICO (INTEGRACIÓN TEMPORAL) 81
3 MÉTODO DE ANÁLISIS DEL ESPECTRO DE RESPUESTA 82
4 COMPORTAMIENTO INELÁSTICO Y SU PAPEL EN EL PROYECTO 86
5 RESUMEN FINAL 90
6 BIBLIOGRAFÍA 90

Lección 21.5: Requisitos y Verificación de Estructuras Sísmicamente Resistentes 91

1 EL EUROCÓDIGO 8-VERIFICACIONES DE SEGURIDAD 94
2 CONSIDERACIONES GENERALES RELATIVAS AL PROYECTO DE EDIFICIOS SITUADOS EN ÁREAS DE ACTIVIDAD SÍSMICA 96
3 EL PROYECTO DE LAS ESTRUCTURAS METÁLICAS EN AREAS DE ACTIVIDAD SÍSMICA 102
4 RESUMEN FINAL 113
5 BIBLIOGRAFÍA 113
6 BIBLIOGRAFÍA ADICIONAL 113

Lección 21.6: Temas especiales 115

1 PUENTES 118
1.1 Introducción 118
1.2 Directrices Generales y Requisitos Básicos 118
1.3 Acciones Sísmicas 119
1.3.1 Movimineto en un punto 119
1.3.2 Variabilidad espacial 119
1.4 Método de Cálculo 120
1.5 Comportamiento No Lineal y Coeficientes q 120
1.6 Apoyos del Tablero y Embridados Longitudinales 121
1.7 Disposiciones para los Puentes de Acero y Mixtos 121
1.8 Referencias 122
1.9 Bibliografía adicional 122
2 TANQUES PARA EL ALMACENAMIENTO DE LÍQUIDOS 123
2.1 Introducción 123
2.2 Depótitos Anclados 125
2.2.1 Acción Sísmica Horizontal 125
2.2.2 Acción Sísmica Vertical 126
2.2.3 Análisis de la Estabilidad y de la Resistencia 126
2.3 Depósitos Simplemente Apoyados 127

2.4 Normas de Proyecto y Recomendaciones Actuales 129
2.4.1 Reglamentos Estadounidenses 129
2.4.2 Recomendaciones Austríacas 130
2.4.3 Normas Canadienses 130
2.4.4 Normas Japonesas 130
2.4.5 Normas Neozelandesas 130
2.5 Bibliografía 130
3 RESUMEN FINAL 132
DIAPOSITIVAS COMPLEMENTARIAS 133

ESDEP TOMO 21
DISEÑO SÍSMICO

Lección 21.1: Visión Global del Comportamiento Sísmico de Sistemas Estructurales

OBJETIVOS/CONTENIDO

Ofrecer, mediante estudios de los perjuicios causados por los sismos, una visión global de los tipos principales de daños sísmicos, junto con algunas explicaciones acerca de los mecanismos de rotura.

CONOCIMIENTOS PREVIOS

Ninguno.

LECCIONES AFINES

Ninguna.

RESUMEN

No resulta posible diseñar eficazmente estructuras sísmicamente resistentes sin comprender la forma en la que, en la práctica, éstas resultan dañadas por los terremotos. El proceso del diseño no consiste simplemente en una cuestión de análisis, cálculo y cumplimiento de reglamentos. Es esencial un conocimiento práctico del comportamiento de los edificios durante los terremotos.

Se describen los tipos principales de daños, en base a estudios de los desperfectos causados por los terremotos, junto con algunas explicaciones acerca de la mecánica de las roturas.

1. PRESENTACIÓN DE LAS DIAPOSITIVAS DE DAÑOS DE TERREMOTOS

Las diapositivas que se presentan no se limitan a edificios con estructuras de acero debido a dos razones. La primera es que muchos de los problemas que causan los terremotos son comunes a todos los tipos de construcción. La segunda razón es que resulta muy difícil encontrar fotografías de edificios de acero que hayan sufrido daños graves como consecuencia de un sismo.

2. DISCUSIÓN DE LOS DAÑOS CAUSADOS POR LOS TERREMOTOS

Normalmente los ingenieros están acostumbrados a diseñar bajo la acción de cargas estáticas que actúan sobre estructuras elásticas. Una de las lecciones más importantes que se aprende a partir de los estudios de los daños es la diferencia entre las formas de colapso por cargas estáticas aplicadas en una única dirección y las que son debidas a cargas cíclicas. Otra lección consiste en la necesidad que tiene el diseño sísmico de considerar el comportamiento del sistema estructural tras la fluencia.

DIAPOSITIVA 1 El edificio Pino Suárez de la Ciudad de México era un edificio porticado de acero estructural de 21 plantas construido alrededor de 1978. Sufrió colapso parcial y graves daños. Obsérvese el arriostramiento en "K" que se basa en la resistencia a la compresión de los elementos - un sistema que carece de la ductilidad para absorber los daños sin sufrir el colapso.

Un aspecto importante de los estudios posteriores al sismo consiste en comprender el importante papel que juega la calidad de la construcción. Los terremotos no respetan teorías, cálculos ni repartos de responsabilidades. Los edificios dañados por los terremotos exponen invariablemente muchos ejemplos de mala calidad en la construcción. Algunos de los ejemplos más frecuentes de mala calidad son las armaduras mal colocadas, hormigón mal compactado, enlechado incompleto de la mampostería y tornillos que faltan o están flojos en las estructuras de acero.

A pesar de que el principal objetivo del diseño de edificios sísmicamente resistentes es la seguridad de sus ocupantes y transeúntes, todos los terremotos exponen ejemplos de vidas puestas en peligro como consecuencia de defectos menores en la construcción - mampostería o revestimientos que se derrumban, placas del techo que se vienen abajo, marcos de ventana que se separan de las paredes y caen hacia dentro o hacia fuera y salidas de emergencia bloqueadas por puertas atascadas y mampostería derrumbada. Normalmente estos tipos de rotura podrían haberse evitado con un coste muy reducido.

Una categoría importante de la rotura de edificios durante los terremotos se produce cuando el edificio resulta dañado de tal gravedad que ha de ser demolido, aunque no se haya derrumbado. Para el propietario y para la compañía aseguradora los costes son similares tanto si el edificio se derrumba como si ha de ser demolido. Sin embargo, para sus ocupantes representa la diferencia entre la vida y la muerte.

Cuando dos edificios están juntos, o cuando hay una junta que permite el movimiento entre ellos, es probable que ambas partes impacten la una contra la otra durante el terre-



Diapositiva 1



Diapositiva 2

moto. Esto puede tener como resultado serios daños estructurales, especialmente cuando los niveles de los forjados son diferentes. La causa radica en la cercanía de las dos estructuras y en la flexibilidad de los edificios, factores que están bajo el control del proyectista.

DIAPOSITIVA 2 Los edificios adyacentes impactarán el uno contra el otro a menos que se prevea un espacio suficiente entre ellos. En este ejemplo de la Ciudad de México, la ruina de una planta completa ha sido el resultado del impacto entre los dos edificios de diferentes alturas y propiedades dinámicas.

A menudo los edificios modernos se montan a partir de componentes independientes. Normalmente, los más antiguos tienen suelos de madera con viguetas mal sujetas a las paredes de apoyo. Cualquier falta de sujeción interna de un edificio se ve rápidamente expuesta por la acción sísmica. La naturaleza del movimiento sísmico del suelo origina inevitablemente un desplazamiento diferencial entre los componentes independientes que se producirá, en ausencia de una continuidad estructural.

Los sismos subsiguientes, que generalmente son de una magnitud mucho menor que la de la sacudida del sismo principal al que siguen, no juegan un papel explícito en el proceso del diseño. Sin embargo, juegan un importante papel en las operaciones de rescate y supervivencia inmediatas al terremoto. Los daños adicionales causados por las réplicas en edificios ya dañados son mayores de lo que su magnitud permitiría suponer. Tras producirse un terremoto importante, muchas estructuras que quedan al borde del colapso a causa de esta sacudida principal son destruidas por las sacudidas posteriores de menor intensidad.

Las concentraciones de fuerzas se producen allí donde hay cambios bruscos en la rigidez estructural o en la distribución de la masa. Debido a esta razón, la forma de los edificios



Diapositiva 3



Diapositiva 4

debe ser regular y simétrica en la medida en que las necesidades funcionales lo permitan.

DIAPOSITIVA 3 A pesar de que la acción a cortante es normalmente mayor en la planta baja, las variaciones en la fuerza, masa y rigidez pueden ocasionar el inicio de colapso en cualquier nivel - en este caso un colapso desde "arriba hacia abajo" en la Ciudad de México.

DIAPOSITIVA 4 Finalmente, un ejemplo de una estructura de acero (sin daños) en construcción situada en la ciudad de Los Ángeles - un área de gran actividad sísmica. Esta estructura soldada tiene que adecuarse a las necesidades funcionales del dueño del edificio en el sentido de que, debido a razones arquitectónicas, debe haber el mínimo de pilares en la planta inferior. Este requisito resulta común en hoteles y edificios de oficinas en los que se necesita más espacio abierto en este nivel.

3. COMPORTAMIENTO DEL SUELO

Los efectos de una sacudida violenta del suelo consisten en aumentar temporalmente las fuerzas laterales y verticales, alterar la estabilidad intergranular de los terrenos no cohesivos, e imponer deformaciones directamente en el suelo superficial allí donde al plano de falla alcanza la superficie. Un aumento transitorio de las fuerzas laterales y verticales pone en peligro a cualquier estructura del terreno que tenga capacidad de desplazamiento. Los tipos de daños resultantes son las avalanchas y los corrimientos de tierras. La experiencia de los terremotos de 1970 en Perú y de 1964 en Anchorage, Alaska, muestra que estos daños pueden producirse a escala masiva. Una localidad peruana, Yungay, fue destruida casi en su totalidad y se perdieron 18.000 vidas a causa de una riada de residuos que arrastró millones de toneladas de roca y hielo.

La alteración de la estructura granular del terreno a causa de la sacudida origina la consolidación tanto del material seco como del saturado, debido a la compactación más fuerte de los granos. En el caso de las arenas saturadas, la presión intersticial puede verse aumentada por la sacudida hasta tal punto que se superan las presiones efectivas del terreno, produciéndose la liquefacción temporal. Este es un efecto importante. Puede originar un colapso masivo de las estructuras de apoyo, y de las cimentaciones sobre pilotes, colapso de taludes, diques y presas. Puede causar el fenómeno conocido como "ebullición", consistente en que arenas licuadas ascienden formando bolsas superficiales. También es posible que algunos suelos inestables se levanten.

DIAPOSITIVA 5 Puede producirse un colapso importante del suelo, especialmente en suelos granulares que se encuentren saturados. En este caso, el colapso del suelo causó la caída de varias grúas del puerto en Viña del Mar, en Chile.



Diapositiva 5



Diapositiva 6

DIAPOSITIVA 6 Puede producirse el asiento de cimentaciones debido a la liquefacción o consolidación del suelo sobre el que se apoyan. En este edificio de la Ciudad de México, la práctica totalidad de la planta baja ha desaparecido por debajo del nivel de la calle. Resulta interesante observar que, a pesar de este asiento, el edificio no ha sufrido un colapso total.

DIAPOSITIVA 7 Este edificio de la Ciudad de México ha sufrido un colapso por vuelco de sus cimientos, con toda probabilidad originado a causa del fallo del suelo sobre el que se apoya.

Los movimientos de desplazamiento del terreno pueden producirse en la superficie o completamente por debajo de ella. Allí donde la falla del terremoto alcanza la superficie pueden producirse movimientos permanentes de considerable magnitud, en metros en lugar de en centímetros. Los movimientos de deslizamiento en la superficie también pueden producirse como resultado de otros desplazamientos del suelo - corrimientos o consolidación, por ejemplo, los movimientos de desplazamiento por debajo de la superficie pueden producirse en estratos más débiles, causando daños en estructuras enterradas total o parcialmente. Los movimientos de deslizamiento por debajo de la superficie también reducen la transmisión del movimiento del suelo hacia la superficie, lo cual pone un límite eficaz al movimiento de la superficie.

Al considerar los desplazamientos permanentes del terreno más espectaculares que puede causar la sacudida del suelo, no debe olvidarse que también se producen desplazamientos elásticos. Estos son críticos para el diseño de pilotes, conducciones subterráneas y estructuras de canalización. La rotura de conducciones subterráneas y de obras de canalización es habitual en los terremotos y tiene importantes implicaciones para los servicios de emergencia posteriores al sismo.



Diapositiva 7

4. INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

La forma en la que el terreno vibra está influenciada sustancialmente por el subsuelo que se encuentra bajo el emplazamiento. Los suelos blandos tienden a vibrar a una frecuencia inferior que los duros, pero es más probable que presenten valores máximos de la aceleración más elevados.

Las indicaciones generales del efecto del suelo sobre el período fundamental de movimiento de la superficie pueden verse a partir de la figura 1. En la práctica, la importancia de este período es el aumento del riesgo de daños allí donde el período natural del edificio sea cercano al del suelo. En el caso de sacudidas de baja amplitud, es posible que se produzcan amplificaciones de gran magnitud. En suelos muy blandos, por ejemplo, se han registrado amplificaciones superiores a 20 para el lodo de la bahía de San Francisco. No obstante, este efecto se ve rápidamente superado por la fluencia de los suelos blandos a medida que aumentan las amplitudes, de manera que, en el caso de una sacudida intensa, las aceleraciones máximas se reducen normalmente debido a la transmisión a través de los niveles superiores del suelo.

Considerando las capas del subsuelo como un sistema dinámico, resulta evidente que las respuestas de la superficie se modificarán si se añade otra estructura en el nivel superior. La interacción entre la estructura y el suelo sobre el que se apoyan puede pertenecer a dos categorías. En la primera categoría, los edificios, en general, son ligeros en relación a la masa de su suelo de apoyo y relativamente flexibles. Por lo tanto, la adición del edificio no afecta significativamente al movimiento superficial del terreno. Sin embargo, la flexibilidad local del suelo allí donde éste está en contacto con los cimientos puede modificar la respuesta del edificio. Los efectos de esta flexibilidad local consisten en modificar los modos de vibración, rebajar las frecuencias naturales y generar un amortiguamiento adicional mediante la disipación de energía en el suelo circundante. A pesar de que puede producirse un aumento de la respuesta, el efecto general consiste en producir una reducción en el deslizamiento de los cimientos. Las cimentaciones sobre pilotes, en comparación con las de sistemas de apoyo, ejercen generalmente un efecto menor sobre los modos y frecuencias propios, pero producen unos efectos de amortiguamiento menores.

El segundo tipo de interacción suelo-estructura que hay que considerar es cuando se trata de una estructura con gran masa y rígida. En este caso, la estructura se convierte en un elemento significativo del sistema dinámico representado por el subsuelo y la estructura. Origina una modificación en el movimiento superficial del suelo circundante.

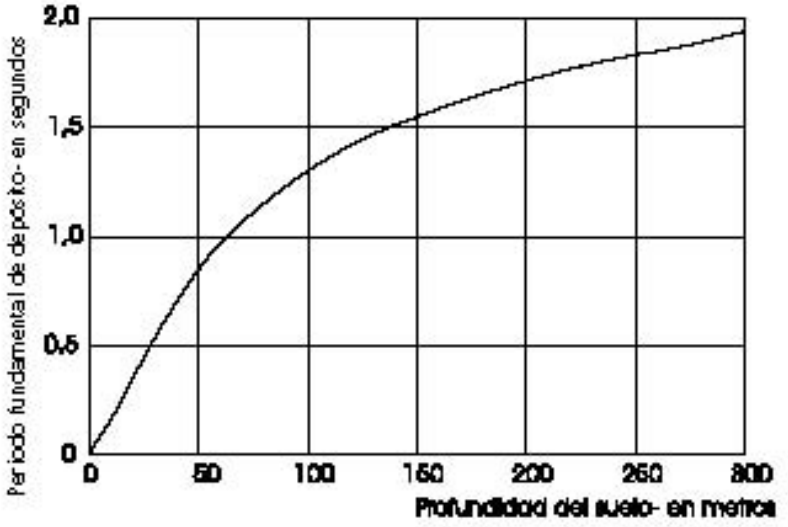

Figura 1 Relación entre el periodo natural del suelo y la profundidad aluvial (según Seed, 1970)

5. EL COMPORTAMIENTO DE LOS CIMIENTOS

El colapso de los cimientos de los edificios durante los terremotos no es algo infrecuente, pero casi siempre está causada por el colapso de su suelo de apoyo. Los colapsos por vuelco debidos a un levantamiento se producen raramente, con mucha menor frecuencia de lo que sugieren los cálculos. Esta baja frecuencia se debe probablemente a la reducción efectiva de la rigidez que acompaña al levantamiento, lo cual reduce correspondientemente la fuerza ejercida por la aceleración del suelo. No hay duda de que en el nivel de los cimientos puede desarrollarse una tensión sustancial como resultado de las fuerzas de vuelco El examen de algunos pilares inferiores derrumbados en Caracas, tras el terremoto de 1967, mostró que habían fallado en tracción debido a una combinación de fuerzas de vuelco y aceleración vertical del suelo.

Existe documentación de ejemplos de ruina en pilotes. En general los pilotes tienden a amoldarse a los desplazamientos del suelo y resultan vulnerables en los puntos cuyos estratos adyacentes tienen propiedades marcadamente diferentes. Algunas configuraciones que incorporaban pilotes inclinados han fallado en la parte inferior de la cabeza del pilote.

6. LA RESPUESTA DE LAS ESTRUCTURAS PORTICADAS DE ACERO

Generalmente las estructuras porticadas de acero son estructuras competentes para resistir la gravedad y las cargas del viento. En los procesos de diseño se presta normalmente atención a las tensiones antes de considerar los desplazamientos y a menudo se olvidan los efectos secundarios del desplazamiento. Frecuentemente los daños de los terremotos hacen que se vuelva a dirigir la atención tanto a los efectos directos de los grandes desplazamientos, tales como el impacto en los nudos y los daños en los componentes no estructurales y contenidos, como a los efectos de segundo orden producidos por los desplazamientos.

Los edificios con paredes reforzadas o con pórticos arriostrados, siempre y cuando mantengan su integridad, presentan un comportamiento más favorable que las estructuras más flexibles en lo concerniente a daños a los contenidos y a elementos no estructurales. Algunos puntos concretos que a menudo quedan expuestos en las estructuras porticadas son:

i. A menudo el comportamiento de los pilares situados en las esquinas no es satisfactorio en comparación con otros pilares exteriores e interiores. Este comportamiento sugiere que el diseño no se ocupa adecuadamente de los efectos de las fuerzas del terremoto en direcciones ortogonales.

ii. El colapso total de los elementos proyectados para poseer una ductilidad elevada no es frecuente. Cuando se produce la ruina de elementos de baja ductilidad resulta evidente que la ruina se ha producido con rapidez. Este comportamiento es particularmente acusado en los elementos de hormigón armado.

iii. Se observa que un nivel máximo de redundancia es deseable. El mecanismo anti ruina debe involucrar al mayor número de elementos posible, proporcionando vías de carga alternativas cuando un elemento ceda o falle.

iv. Cuando se produce la fluencia en los pilares antes que en las vigas, el colapso del pórtico se hace mucho más probable. Este punto se ilustra en la figura 2, que muestra el número de rótulas dúctiles necesarias para que se produzca la ruina en el modo de fluencia de los pilares en comparación con el modo de fluencia de las vigas.

Las estructuras de acero muestran los siguientes tipos de daños como consecuencia de los terremotos:

i. Rotura por fragilidad de tornillos a cortante o a tracción.

ii. Rotura por fragilidad de soldaduras, especialmente cordones de soldaduras, a cortante o a tracción.

iii. Pandeo de elementos, incluyendo el pandeo por torsión.

iv. Pandeo local del alma y del ala.

v. Elevación de pórticos arriostrados.

v. Ruina local de elementos de conexión, tales como uniones en T y escuadras de unión.

vii. Suelta de tornillos.

viii. Graves deformaciones en pórticos no arriostrados.

ix. Colapso en las uniones entre elementos de acero y otros elementos del edificio, tales como suelos.

x. Los anclajes hechos a la mampostería u hormigón mediante elementos empotrados o tornillos de cabeza expandible se muestran casi siempre frágiles a cortante y a tracción. Por lo tanto, son incapaces de acomodar ningún movimiento. Como resultado de lo anterior, la ruina es habitual, agravada cuando la mampostería o el hormigón en el que está colocado el anclaje también resultan dañados.

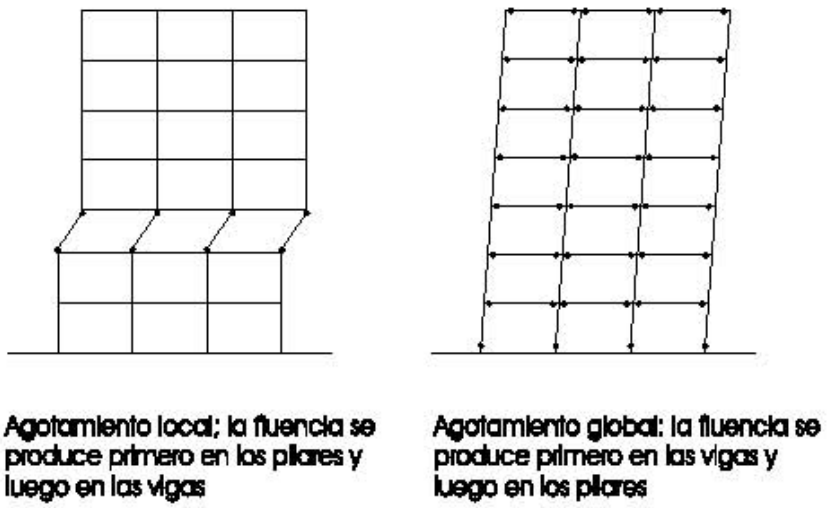

Figura 2 Modos de agotamiento de pórticos

xi. Muchos colapsos se producen en torsión horizontal, especialmente en estructuras en las que los centros de masa y de resistencia están alejados en su propio plano, o en los que la resistencia inherente a la torsión del sistema es baja. Una causa común de vulnerabilidad torsional de las estructuras es el emplazamiento de edificios en esquinas de calles.

DIAPOSITIVA 8 Este edificio de la Ciudad de México experimentó el colapso de los pilares de la planta baja debido a una primera planta flexible y a los efectos de la torsión horizontal.



Diapositiva 8

7. EL COMPORTAMIENTO DE LOS FORJADOS

Los forjados se comportan como diafragmas al transferir las fuerzas laterales. La figura 3 muestra forjados posibles. En el primer caso, la acción de diafragma es escasa, pero en el segundo es claramente significativa. La transferencia del cizallamiento en cada pared de los extremos impuso altas tensiones sobre la placa. Algunos sistemas de suelos prefabricados, total o parcialmente, ofrecen muy poca resistencia frente al cizallamiento horizontal o al pandeo.

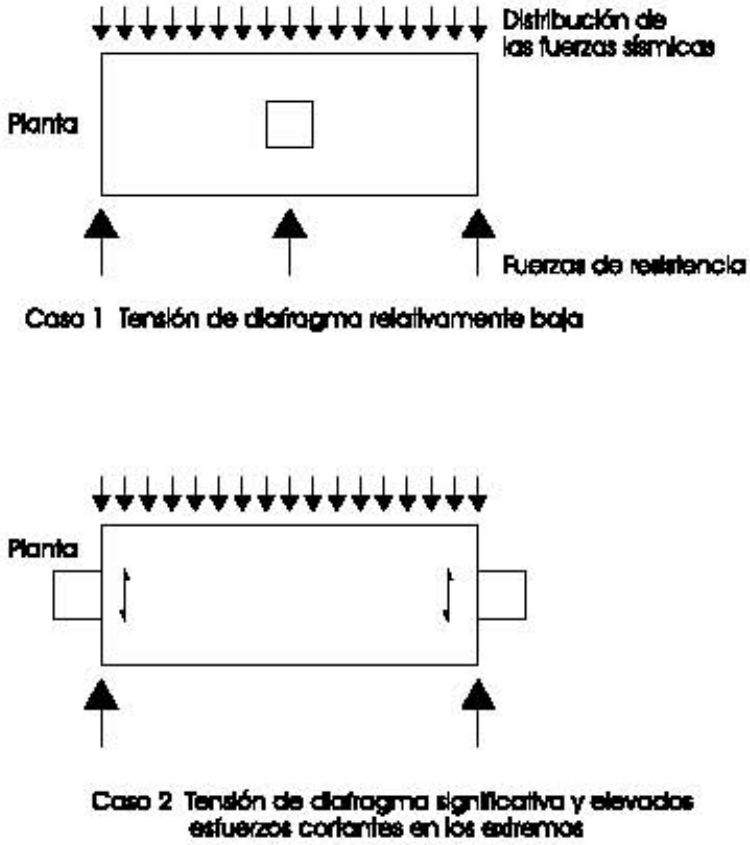

Figura 3 Acción de diafragma en forjados

DIAPOSITIVA 9 Los diafragmas horizontales no son siempre elementos rígidos capaces de distribuir las fuerzas entre estructuras. En esta escuela de Anchorage una placa de hormigón armado del tejado ha sido rasgada como si fuera un trozo de cartón.



Diapositiva 9

8. EL COMPORTAMIENTO DE ESTRUCTURAS SECUNDARIAS Y DE ANEXOS

Los anexos colocados en edificios - parapetos de mampostería, aleros, depósitos en el tejado, revestimientos y ménsulas - tienden a mostrar un comportamiento poco satisfactorio cuando se produce un terremoto. La razón que explica este comportamiento es doble. En primer lugar, muchos de ellos están diseñados sin ninguna ductilidad y, en segundo lugar, los efectos de la amplificación dinámica por parte del edificio al que se han añadido pueden aumentar en gran medida las fuerzas que les son aplicadas.

La figura 4 ilustra el efecto de la respuesta dinámica del edificio sobre el espectro de respuestas, comparando el espectro del nivel del suelo con el de la quinta planta. La frecuencia de los valores máximos se ve tanto aumentada como modificada.

A menudo los contenidos de los edificios sufren daños importantes incluso cuando el edificio en sí queda relativamente indemne. Este efecto es mayor en el caso de edificios más flexibles. Representa una razón adicional para que el proyectista ejercite un control severo de los desplazamientos. En muchos edificios modernos los contenidos tienen mayor valor e importancia que el edificio en sí. A menudo los costes para la prevención de los daños son triviales, por ejemplo el uso de tirantes angulares de acero en la parte superior de estanterías y atornillado al suelo para las baldas.

En un edificio de varias plantas, el movimiento del suelo se modificará en todos los niveles como resultado del movimiento del mismo edificio. Generalmente el efecto consiste en concentrar la frecuencia de la respuesta alrededor de una banda cercana a la frecuencia natural del edificio y amplificar la aceleración máxima en proporción a la altura, alcanzando una amplificación de quizás dos o tres en el nivel del tejado.

Todos los contenidos que sean muy rígidos, o que tengan una frecuencia natural propia cercana a la del edificio están, por lo tanto, sujetos a fuerzas mayores de las que experimentarían si estuvieran montados al nivel del suelo.

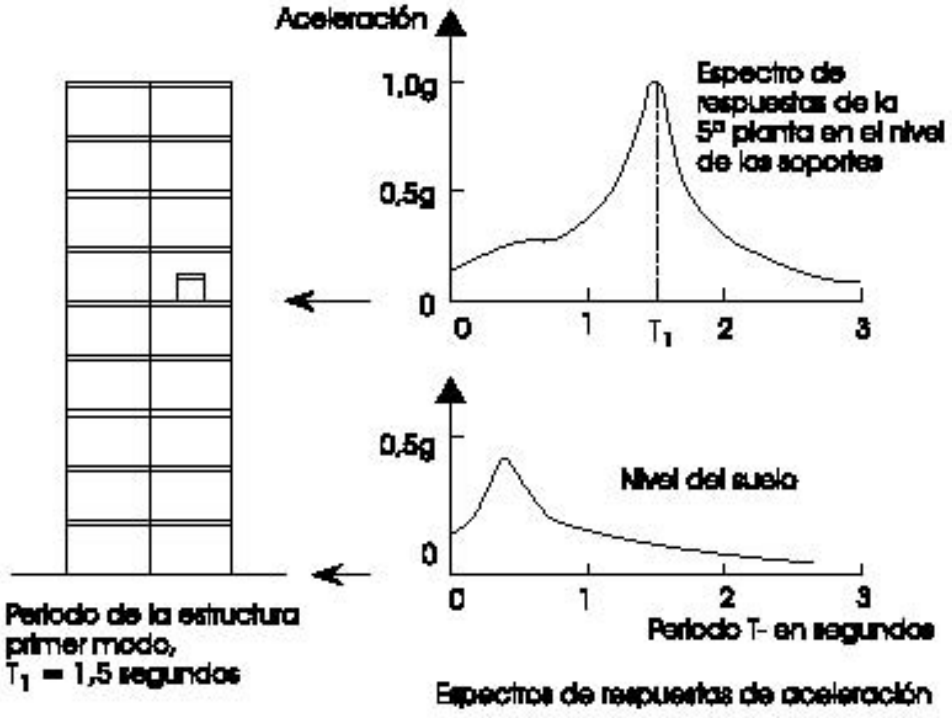

Figura 4 Respuesta al movimiento del suelo en estructuras secundarias

La experiencia muestra que los elementos no estructurales que están suspendidos, tales como sistemas de techos y accesorios de iluminación presentan un comportamiento poco satisfactorio. Los apéndices tales como parapetos y equipos mecánicos también sufren un alto grado de daños, especialmente cuando funcionan como "péndulos invertidos" de un grado de libertad. Los daños también aumentan hacia el tejado en las estructuras de varias plantas. Los