

Fig. 17.—HUNDIMIENTO DEL PUENTE DE LO GALLARDO DURANTE EL TERREMOTO DE CHILE DE 1985.

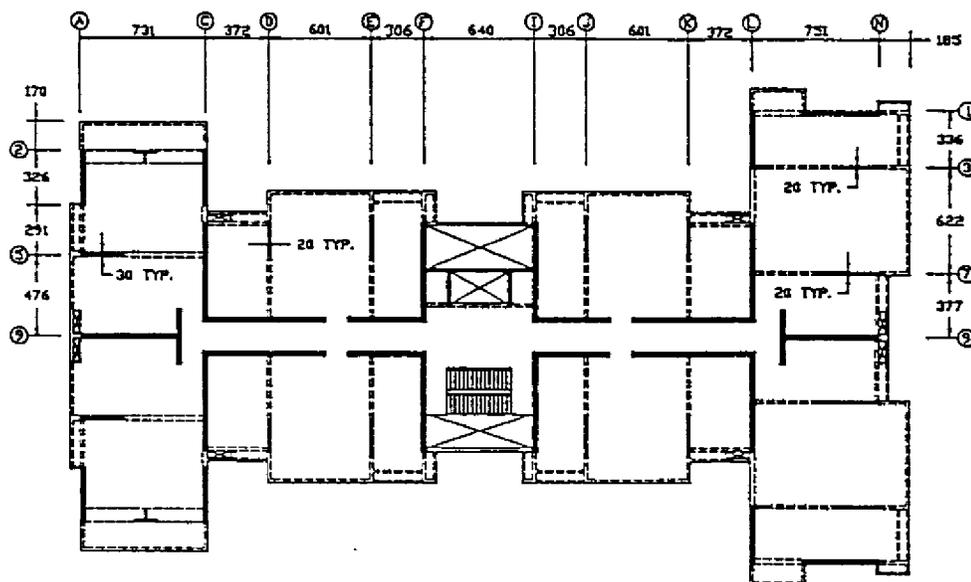


Fig. 18.—PLANTA DE PISO TÍPICO DE EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO DE 14 PLANTAS EN VIÑA DEL MAR (UCB/EERC-89/05, Wallace and Moehle, 1989)

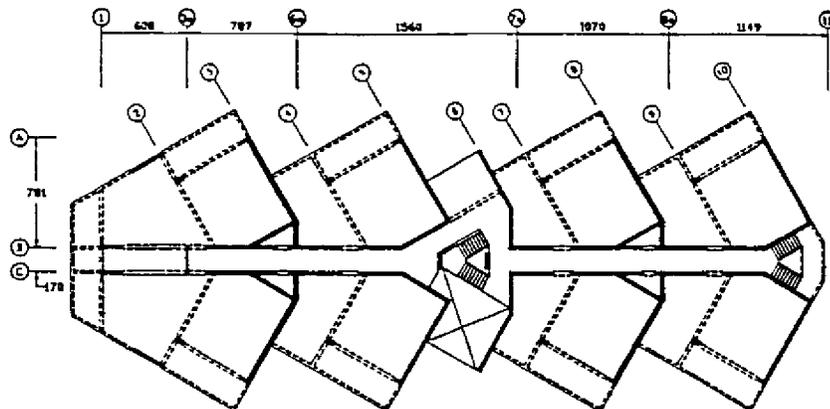


Fig. 19.—PLANTA DE PISO TÍPICO DE EDIFICIO DE HORMIGÓN ARMADO DE 23 PLANTAS EN VIÑA DEL MAR (UCB/EERC-89/05, Wallace and Moehle 1989)

En la Fig. 21 se muestran los registros de aceleración y los espectros de respuesta de aceleración absoluta con amortiguamiento crítico del 5%, correspondientes a las componentes horizontales de la aceleración registrada en la Ciudad Universitaria (CU) (en suelo firme - Zona I) y en el Centro SCOP de la Secretaría de Comunicación y Transportes (SCT) (en suelo de alta compresibilidad - Zona III). La comparación de estos espectros de respuesta indica claramente la importancia de las condiciones del emplazamiento (perfil del suelo y topografía) en el movimiento del suelo en campo libre. Mientras la máxima aceleración del suelo registrada en CU era 39 cm/seg^2 , la componente EW registrada en SCT tiene un valor pico de 168 cm/seg^2 , lo que indica una diferencia en un factor mayor que cuatro.

La importancia de los movimientos registrados con respecto a C, se hace evidente cuando sus espectros de respuesta con amortiguamiento del 5% (Fig. 21(b)) se comparan con aquéllos en los que se basó la obtención de C, (Fig. 20(a)). Esta comparación demuestra que para los edificios del Grupo B, situados en la Zona III, los espectros de respuesta de los registros de SCT exceden los espectros de diseño asumidos por el código para todas las estructuras que tienen periodos fundamentales de hasta 3,2 segundos. Para estructuras con periodo fundamental alrededor de 2 segundos, el valor del espectro de respuesta del movimiento registrado es más de 4 veces el adoptado por el código de 1976 de México Distrito Federal.

Otro resultado importante, obtenido de los movimientos registrados durante el terremoto de México de 1985, son los factores de amplificación del espectro. Para un periodo de alrededor de dos segundos, los factores de amplificación del espectro con amortiguamiento crítico del 5% para la aceleración máxima del suelo eran $983/168=5,85$, un valor considerablemente más alto que los sugeridos y considerablemente más alto que los usados actualmente en los EE.UU. [22]. Por ejemplo, para un nivel de probabilidad de un sigma (1σ) y amortiguamiento crítico del 5%, el factor de amplificación sugerido para la aceleración es 2,71. Luego, si pueden ocurrir en los EE.UU. movimientos del suelo similares a los registrados en México, los resultados discutidos con anterioridad indican la necesidad de una revisión de los procedimientos actualmente empleados para desarrollar espectros de diseño.

Debería notarse que, debido a que estos movimientos del suelo fueron tan fuertes, y a que bastantes edificios se comportaron mal, el código para el Distrito Federal de 1976 se revisó, y algunos meses después del terremoto se empezó a aplicar un nuevo código, basado en espectros de respuesta significativamente más intensos (Fig. 20(b)). Para edificios del grupo A, junto con instalaciones esenciales, el espectro de diseño en este código de emergencia es 1,5 veces el de las estructuras de ocupación normal (Grupo B). Por otro lado, los requerimientos tentativos de 1985 de la SEAOC especifican que la importancia del factor de ocupación, I, debería ser 1,25, es decir, 1,2 veces menor que el nuevo requerimiento mejicano. De las comparaciones del espectro de respuesta (amortiguamiento crítico 5%) de la componente EW registrada en SCT en México** con los espectros (amortiguamiento crítico 5%) en los que se basan la ATC [24] y la SEAOC 1985 (Fig. 22), incluso para la región de riesgo sísmico más alto en los EE.UU. (área nº 7 mapa ATC y Zona 4 mapa SEAOC), se obtiene que los coeficientes de fuerza lateral sísmica recomendados C_p (basados en un espectro asumido), para perfiles de arcillas blandas (tipo de suelo S_e) y para periodos $1,7 < T(s) < 3,0$, son significativamente menores que los valores correspondientes a un espectro similar obtenido del movimiento del suelo registrado en SCT en Ciudad México.

Por eso, los resultados de los registros de Ciudad de México deberían ser valorados con cuidado, con respecto a nuestros actuales espectros de diseño sísmico para zonas que tienen perfiles de suelo que podrían ser similares a los que se encuentran en el centro de Ciudad de México.

Además de estas lecciones aprendidas y enfatizadas de nuevo en el terremoto de México de 1985, hubo muchas más, entre las cuales las cinco siguientes merecen especial atención en los EE.UU., cuando se trate de diseño sismorresistente y práctica de la construcción: 1) la duración del movimiento fuerte y el desplazamiento máximo; 2) resonancia suelo-edificio (interacción); 3) interacción suelo-estructura; 4) sistemas estructurales de edificios; y 5) separación de edificios contiguos.

Duración del movimiento fuerte y desplazamiento máximo. Como puede verse del espectro de respuesta calculado para la componente EW registrada en la estación SCT (Fig. 21(b)), para $T=0,5$ y $0,7$ segundos, S_e es aproximadamente 0,3, y aumenta para $T \geq 1$ s alcanzando un valor de 1 para $T=2$ s. Además, del análisis de este registro (Fig. 21(a)), está claro que consistía en un movimiento cuasiarmónico con un periodo de alrededor de 2 segundos y una duración extremadamente larga (unos tres minutos de movimiento perceptible) y que el movimiento fuerte (dígase, aceleración $a \geq 50$ gals) duró unos 35 segundos con casi ocho ciclos de cargas y descargas que excedían 100 gals. Además, se calculó una amplitud de desplazamiento de 21 cm para la dirección EW. Este valor es casi dos veces el desplazamiento máximo obtenido de los movimientos del suelo registrados en Lillole durante el terremoto de Chile de 1985.

** Un espectro de respuesta un tanto más exigente se obtiene si se considera la aceleración del suelo que proviene de la combinación de las dos componentes NS y EW registradas en SCT. Esta combinación tiene como resultado una aceleración del suelo de 196 cm/seg^2 en la dirección S60E.

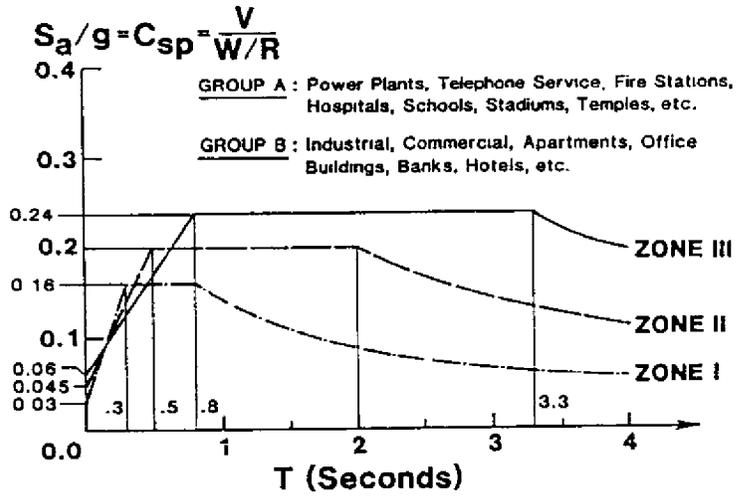


Fig. 20(a).—Espectros de diseño del código 1976 para edificios del Grupo B; para el Grupo A, los valores espectrales han de multiplicarse por 1.3

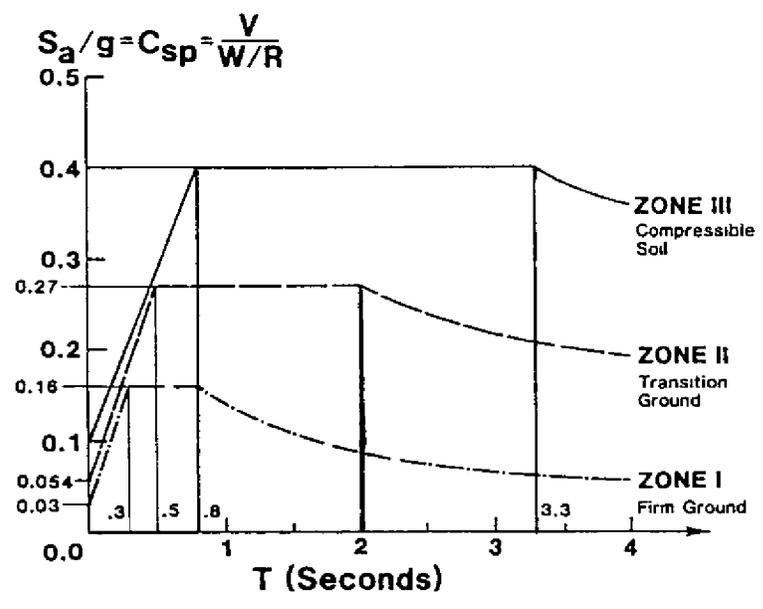


Fig. 20(b).—Espectros de diseño del código de emergencia 1985 para edificios del Grupo B, para el Grupo A, los valores espectrales han de multiplicarse por 1.5

Fig. 20 —ESPECTROS DE RESPUESTA LINEAL ELÁSTICA CON AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO 5%. DE DISEÑO PARA MÉXICO DISTRITO FEDERAL.

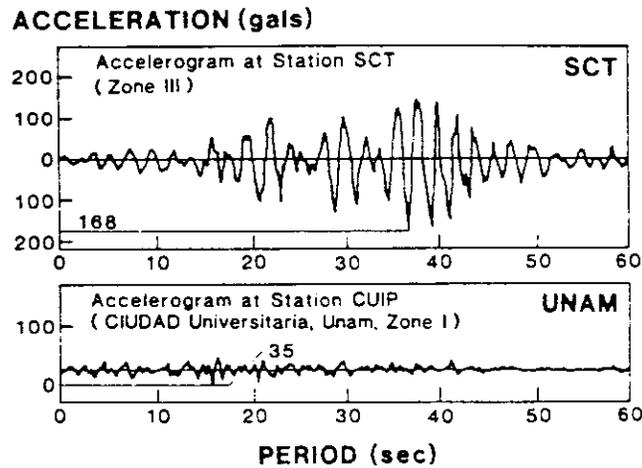


Fig. 21(a).—Componentes EW registradas.

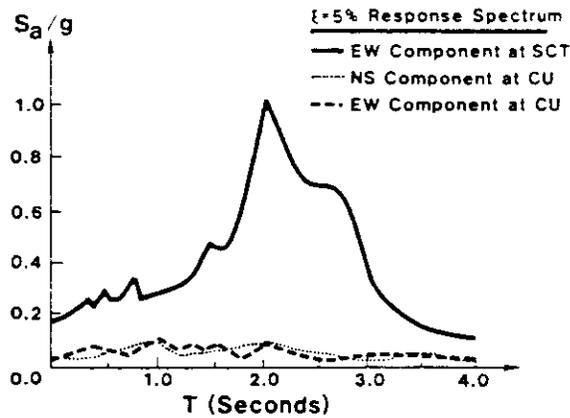


Fig. 21(b).—Espectros de respuesta lineal elástica (5% amortiguamiento crítico) de algunas componentes registradas.

Fig. 21.—TERREMOTO DE MÉXICO DEL 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985: COMPONENTES EW REGISTRADAS EN LAS ESTACIONES CU (CIUDAD UNIVERSITARIA) Y SCT (SECRETARÍA DE COMUNICACIÓN Y TRANSPORTES) Y ESPECTROS DE RESPUESTA LINEAL ELÁSTICA, PARA AMORTIGUAMIENTO CRÍTICO DEL 5%.

$$S_a/g = C_{sp} = \frac{V}{W/R}$$

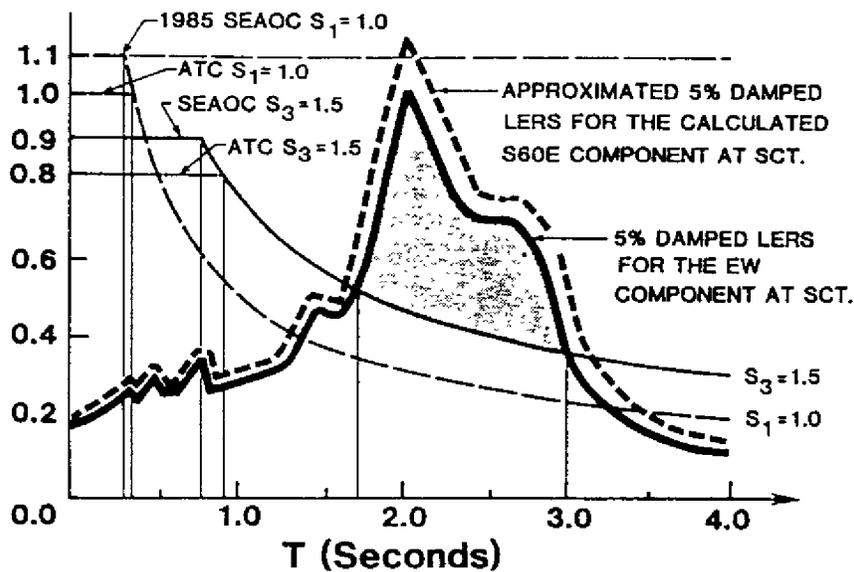


Fig. 22 —COMPARACIÓN DEL ESPECTRO DE RESPUESTA (5% AMORTIG. CRÍT.) DE LA COMPONENTE EW REGISTRADA EN LA ESTACIÓN SCT (TERREMOTO DE MÉXICO 19 DE SEPTIEMBRE DE 1985) CON LOS ESPECTROS DE DISEÑO (5% AMORT. CRÍT.) RECOMENDADOS POR ATC-3-06 Y SEAOC (1985) PARA LAS REGIONES DE MAYOR RIESGO EN LOS EE.UU.

No cabe duda que en estructuras para las que $T \geq 0,5$ s, diseñadas según el código de México, D.F. (donde C_s era menor o igual que 0,06), se produjeron severas oscilaciones que indujeron a muchos ciclos de plastificación alternada que no sólo causaron el deterioro significativo de su rigidez (alargando así sus periodos), sino que también pudieron haber causado el deterioro significativo de sus resistencias máximas a cortante axial y a flexión, torsión y adherencia (anclajes), en particular en el caso de pórticos rígidos de hormigón armado con sólo losas aligeradas o placas sobre apoyos aislados como sistemas de suelo.

Aunque los movimientos del suelo registrados en Lolleo durante el terremoto de Chile en 1985 han demostrado que, debido a la larga duración del movimiento fuerte, algunos edificios con corto T pueden sufrir un gran número de inversiones de carga, el terremoto de México de 1985 es, quizás, el primero en el que los movimientos del suelo registrados y las correspondientes respuestas de edificios han mostrado la posibilidad de que las estructuras diseñadas, según el código, puedan sufrir un número significativo de ciclos de plastificación alternada con exigencia de altas razones de ductilidad, considerablemente mayores que las que se consideraban posibles antes de este terremoto. Un gran número de edificios en Ciudad de México falló debido a esta larga duración del movimiento fuerte.

Fallos en cimientos e interacción suelo-estructura. Se ha observado también que hubo muchos fallos de cimientos (pilotes), y que algunos edificios quedaron inclinados y otros volcaron (Fig. 23). Esto pudo haber sido consecuencia de la degradación de cimientos (particularmente en la fricción efectiva de pilotes de rozamiento) debida a un gran número de ciclos de carga/descarga, que produjeron grandes deformaciones. Los códigos actuales en los EE.UU. deberían revisarse respecto al diseño sismorresistente de cimientos en suelos con malas condiciones, con el fin de determinar si este problema ha sido adecuadamente tratado. Debería observarse que el movimiento en SCT se registró en un aparcamiento a bastante distancia del edificio más cercano, por lo que puede considerarse un registro de campo libre. El movimiento en la base de edificios pesados en suelos blandos puede ser muy distinto del medido en este caso, y por eso debe considerarse una cuidadosa valoración de la interacción suelo-estructura, porque la influencia de esta interacción puede ser perjudicial para aquellas estructuras que tienen periodos de la base rígida algo menores que el periodo predominante del suelo blando (en este caso particular alrededor de 2 segundos). Actualmente, los códigos sísmicos, y por tanto también la práctica, asumen que los efectos suelo-estructura son beneficiosos para la respuesta del edificio.

Resonancia suelo-edificio. La mayoría de los edificios de altura media que se derrumbaron o que sufrieron graves daños fueron edificios flexibles con periodo fundamental inicial $T \geq 0,7$ s, el cual aumentó con el daño que se acumuló como consecuencia de la larga duración del movimiento fuerte. Muchos edificios más antiguos con