

## CARACTERÍSTICAS DEL REGISTRO ASOCIADAS AL DAÑO EN EDIFICIOS DE HORMIGÓN ARMADO

*Patricio Bonelli*<sup>1</sup>

### RESUMEN

Utilizando tres edificios de diez pisos, estructurados con muros de hormigón armado de acuerdo a lo que ha sido tradicional en Chile, se comparan diversos índices de daño propuestos por diferentes autores, calculados con registros de sismos severos recientes y con registros que contienen sólo los pulsos de aceleración que entregan la mayor energía por ciclo. Se observa que sólo una parte de la energía histerética se traduce en daños de importancia, y esta energía la entrega una parte del registro que contiene pulsos largos de aceleración, cuya duración está determinada por el cambio de signo de la velocidad del suelo (pulsos largos de velocidad). La resistencia a acciones laterales que la estructura posee tiene cierto efecto en el grado de daño sólo en los registros con pulsos largos de aceleración, como el de México y Northridge. Es importante considerar el efecto de la duración del sismo en casos de registros que contengan varios pulsos largos de aceleración consecutivos. Se concluye que al evaluar la capacidad destructiva de un registro, se deberían aislar los pulsos de mayor contenido de energía y aplicarle a ellos los diferentes índices de daños propuestos. Identificar los posibles registros de aceleración a partir de los pulsos de velocidad esperados en un lugar permite establecer parámetros útiles en el diseño para minimizar el daño.

### SUMMARY

The earthquake response of three typical Chilean R/C structural wall buildings is analyzed. Different damage indices proposed in literature are evaluated for different records and special records containing just acceleration pulses. The hysteretic energy due to long acceleration pulses produces significant damage; the input duration is determined by the long velocity pulse duration. The effect of lateral strength in lateral displacements appears to be important only in the Mexico and Northridge records, both having long acceleration pulses. Duration of the strong motion appears important only in the case of several long acceleration pulses, as in the Mexico City case. The goal of this paper was to show that the maximum energy input in a critical cycle is an additional aspect to be considered in the evaluation of seismic destructiveness. The long acceleration pulse content should be identified to determine the potential destructiveness characteristics of the record.

---

Artículo recibido el 21 de abril de 1998 y aprobado para su publicación el 18 de junio de 1999. Se aceptarán comentarios y/o discusiones del artículo hasta cinco meses después de su publicación

<sup>1</sup> *Profesor investigador, Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Casilla 110-V, Valparaíso. CHILE.*

## INTRODUCCIÓN

Se han propuestos varias medidas de severidad. Entre las más recientes y más aceptadas destacan la Energía de Entrada  $E_I$  de Bertero (1992), el Potencial Destructivo  $P_D$  de Saragoni (Araya y Saragoni, 1985), el índice de daño de Park-Ang (1985), el parámetro adimensional  $\gamma$  de Fajfar (1992) y un índice de daño que considera las características de la estructura  $I_D$  (Rodríguez, 1994), (ver anexo página 20). La energía absorbida y el máximo desplazamiento son los parámetros más importantes considerados en algunos de estos índices. La finalidad de este trabajo es mostrar que la máxima energía de entrada en un ciclo crítico es un aspecto adicional que debe ser considerado en la evaluación de la capacidad destructiva de un terremoto. Se evalúa también el efecto de la resistencia a acciones laterales de la estructura en el desplazamiento lateral.

Bertero (1992) ha ilustrado la importancia de los pulsos largos de aceleración en la respuesta sísmica de las estructuras, aspecto no considerado explícitamente en los diversos índices de daño anteriormente mencionados. El potencial destructivo  $P_D$  de Saragoni y el índice de daño  $I_D$  de Rodríguez han servido para ordenar los terremotos según el daño observado; sin embargo, aun cuando el primero no incluye características de la estructura, considera indirectamente el contenido de pulsos largos de aceleración a través del número de cruces por cero del acelerograma. Por otra parte, Rodríguez (1994) sí las toma en cuenta al considerar la energía histerética total y el máximo desplazamiento, pero no considera la manera en que el sismo entrega la energía a la estructura (potencia).

## ESTRUCTURAS ESTUDIADAS

En la figura 1 se muestran las elevaciones y la planta de un edificio de diez pisos elegido para este estudio. La densidad de muros y la distancia entre ejes, según se muestra en la dirección Y de esta figura, representan un sistema estructural muy utilizado en Chile. Las vigas quedan sostenidas por marcos que no toman esfuerzos importantes bajo la sollicitación sísmica si la densidad de muros es alta. En la dirección X se supone que existe una estructuración similar. Uno de los objetivos de este trabajo fue evaluar el efecto que tiene la resistencia a acciones laterales de la estructura en el desplazamiento lateral, para ello se pueden tomar arbitrariamente diferentes valores de resistencia. A fines de trabajar con valores similares a los utilizados en la práctica, se diseñó el edificio con la norma chilena NCh.433 Of.93 para dos casos extremos: el denominado como Edificio 1 se supuso ubicado en zona 2 (Zona Central de Chile, con una aceleración efectiva de  $A_0 = 0.3 g$ ) sobre suelo firme (con un período predominante del suelo de  $T_0 = 0.15$ ), y el Edificio 2 en zona 3 (Borde costero,  $A_0 = 0.4 g$ ) sobre suelo blando (arenas típicas de Viña del Mar,  $T_0 = 0.75$ ). Las armaduras se calcularon con el ACI318-92 (1992). Para tener un valor mucho mayor de resistencia se consideró un tercer caso, denominado como Edificio 3, armando los muros con el doble de la armadura a flexión que la obtenida para los muros del Edificio 2. Los detalles sobre los espectros de diseño se pueden consultar en la norma utilizada (INN, 1993) no siendo relevantes para los fines de este trabajo. El dato de interés para posibles comparaciones es el valor real de resistencia nominal a acciones

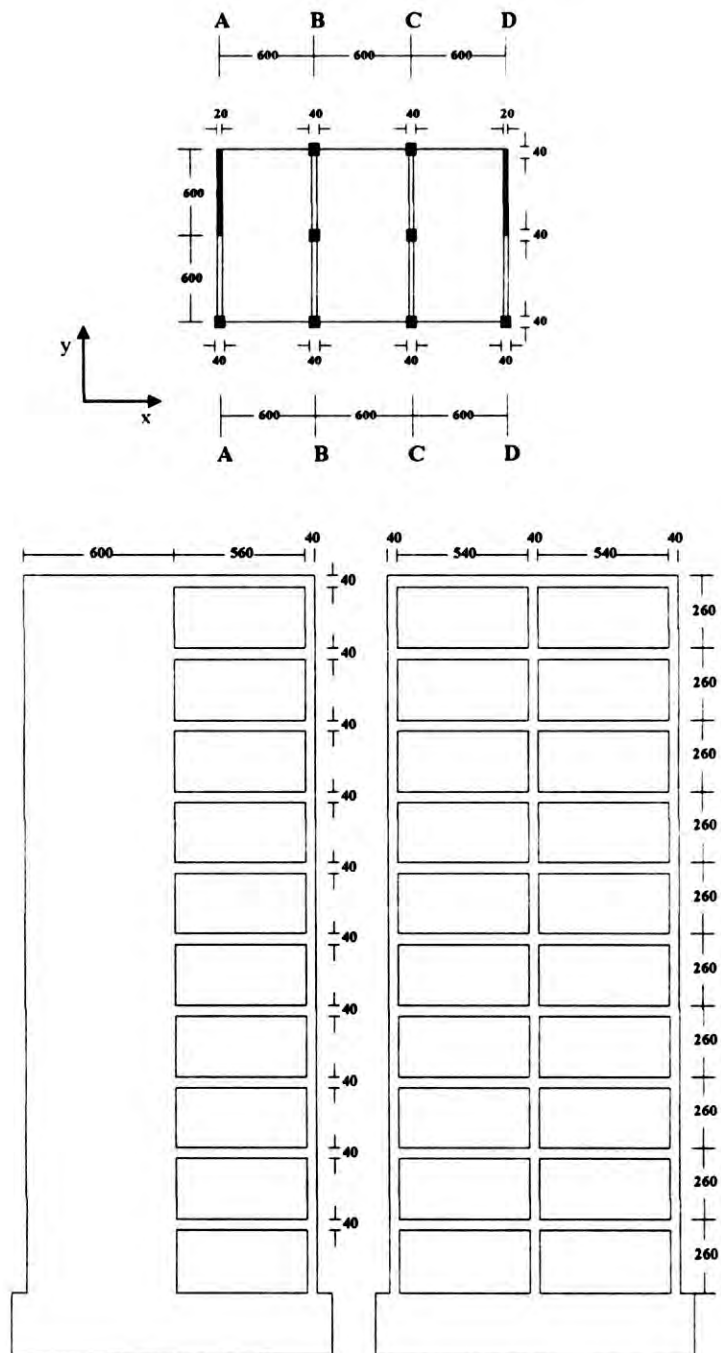


Fig 1. Planta y elevación del edificio

laterales obtenidas para cada edificio, independientemente del método de cálculo o norma utilizada. El mayor corte basal que se puede desarrollar en cada edificio fue de 24, 30 y 43 por ciento de su peso total, respectivamente. En la figura 2 se muestran las relaciones corte basal versus desplazamiento lateral del techo para distribuciones triangulares invertidas de fuerzas laterales.

La respuesta de los edificios a los diversos sismos considerados se calcularon usando el programa de análisis dinámico no lineal Ruaumoko (Carr, 1996). Como ley constitutiva, se utilizó el modelo de Takeda (Otani, 1974) mostrado en la figura 3 que considera en los ciclos de histéresis un comportamiento bilineal con degradación de rigidez y resistencia. Los tres edificios se sometieron a los registros de Viña del Mar S20W (Chile, 1985), Llole N10E (Chile, 1985), SCT-EW (México, 1985), Sylmar (Northridge, 1994) y Kobe, JMC (Japón, 1995), mostrados en la figura 4.

### SELECCIÓN DE PULSOS LARGOS

Para los cinco registros considerados, se calcularon los desplazamientos laterales de los edificios. Se aisló la parte de la respuesta en torno a sus máximos, y en un mismo gráfico se dibujaron los desplazamientos laterales del techo de cada estructura, la aceleración, la velocidad y el desplazamiento del suelo, encontrándose que la forma de la respuesta en desplazamientos es similar a la forma de la velocidad del suelo, según se aprecia en la figura 5. Se observó que un desplazamiento lateral grande está siempre relacionado con la existencia de uno o más pulsos largos de aceleración del suelo, relacionados con pulsos largos de velocidad del suelo. Si la aceleración del suelo aumenta durante un tiempo relativamente largo significa que también lo hace la velocidad y por lo tanto, el suelo se mueve en una dirección sin cambiar de signo. Al cambiar el signo de la aceleración, la velocidad comienza a disminuir, es decir, el suelo comienza a frenar pero continua su desplazamiento en el mismo sentido, deteniéndose cuando la velocidad se hace cero, obviamente. Es decir, el instante de velocidad nula determina el instante en que el suelo se detiene y se devuelve. En todo el tiempo en que el suelo se ha movido en un mismo sentido sin cambiar de dirección, la estructura, en general, sigue el movimiento del suelo y por efecto de las fuerzas restitutivas puede adelantarse respecto a su base. Si el sentido del movimiento del suelo cambia bruscamente, la estructura, por inercia, continua su desplazamiento, haciéndose máximo el desplazamiento lateral del techo relativo a la fundación. En la figura 6 se dibujaron el desplazamiento lateral del techo del Edificio 2 y el desplazamiento del suelo, ambos mirados desde un sistema fijo de referencia (desplazamientos absolutos), para los cinco registros considerados en este estudio. Se puede observar que para que la incursión del material dentro del rango no lineal sea importante, se requiere de un tiempo relativamente largo de movimiento del suelo sin cambio de signo. Si no hay pulsos largos de aceleración y, por lo tanto, de velocidades, el suelo cambia de signo (se devuelve) y al comenzar la incursión dentro del rango no lineal la estructura, que está amarrada al suelo en su fundación, necesariamente invierte el sentido del desplazamiento saliéndose de la incursión no lineal. Por ello, en este trabajo se plantea que para que exista daño debe haber un grado de incursión no lineal importante.

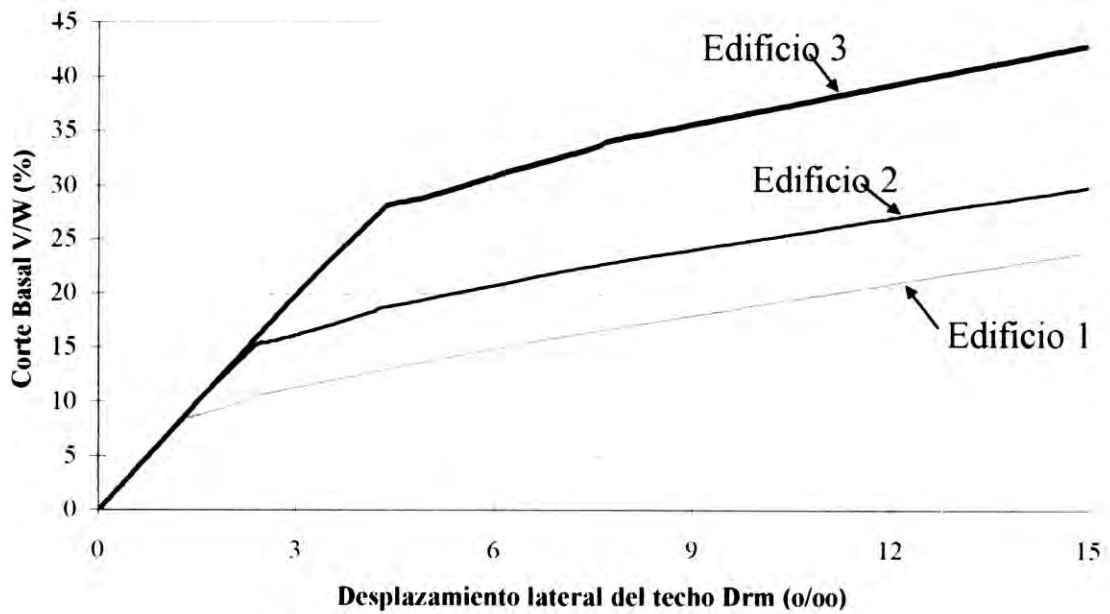
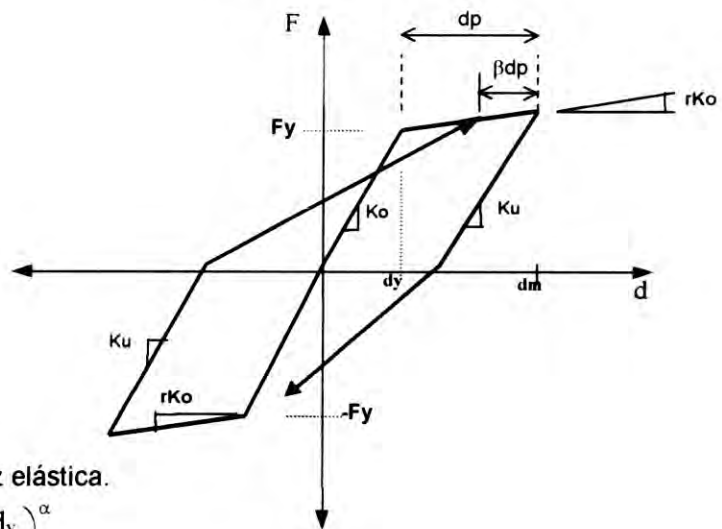


Fig 2. Corte Basal versus desplazamiento lateral del techo

**Takeda (Otani, 1974)**



Donde:

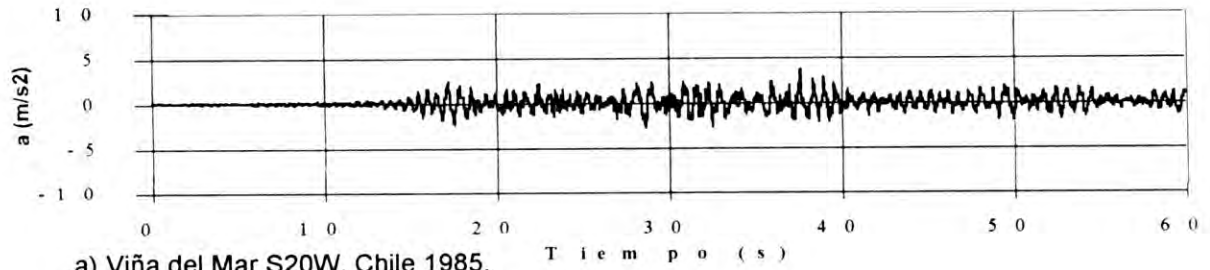
$K_o$  = Rigidez elástica.

$$K_u = K_o \left( \frac{d_y}{d_m} \right)^\alpha$$

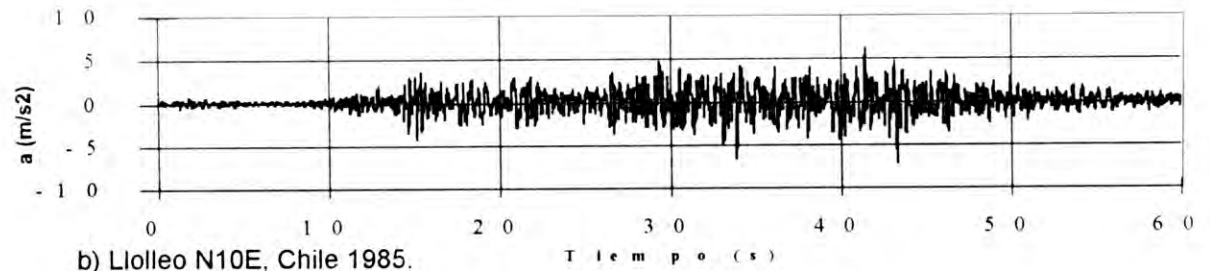
$\alpha$  = Constante de descarga ( $0 < \alpha < 0.5$ ).

$\beta$  = Constante de carga ( $0 < \beta < 0.6$ ).

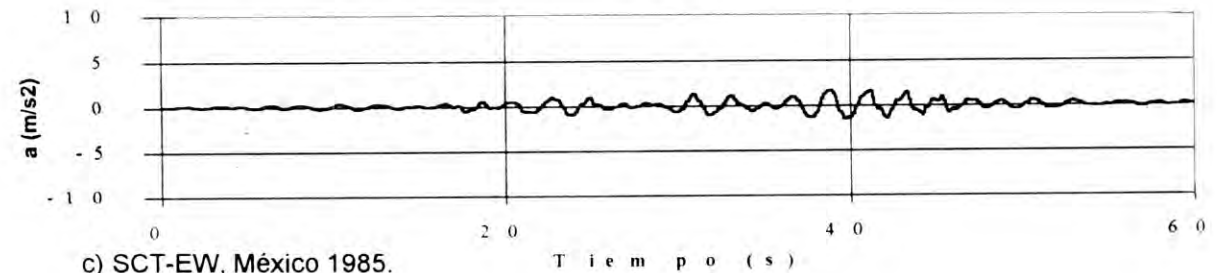
Fig 3. Curva de histéresis de Takeda



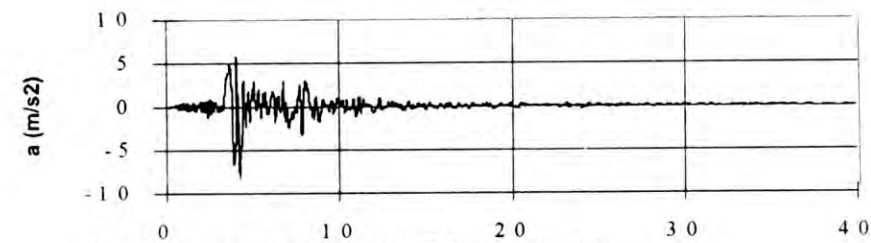
a) Viña del Mar S20W, Chile 1985.



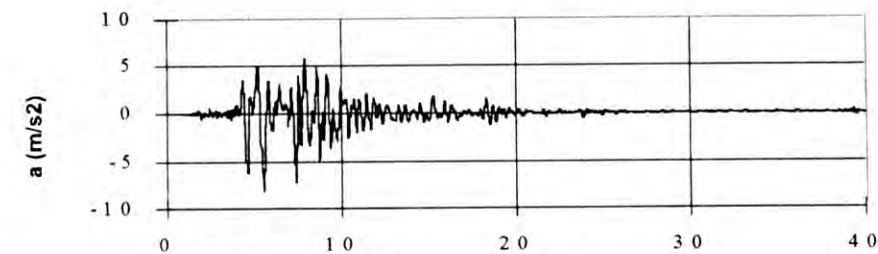
b) Lolleo N10E, Chile 1985.



c) SCT-EW, México 1985.



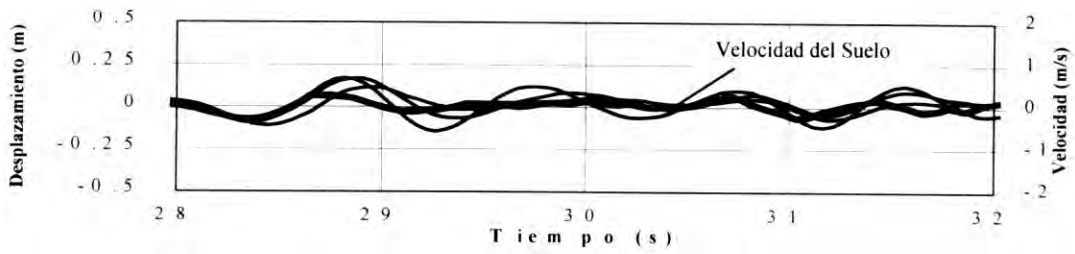
d) Sylmar, Northridge 1994.



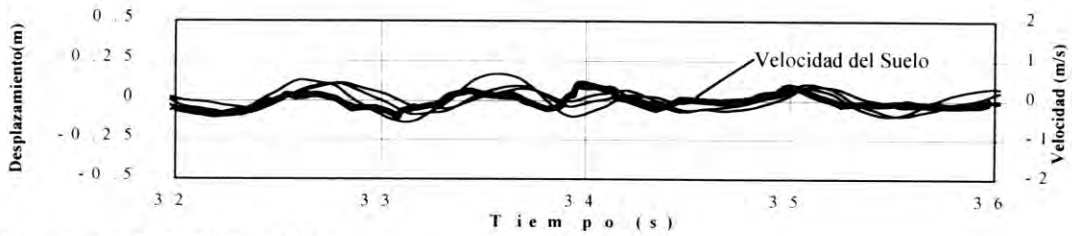
e) Kobe JMC, Japón 1995.

Fig 4. Registros completos de los sismos considerados

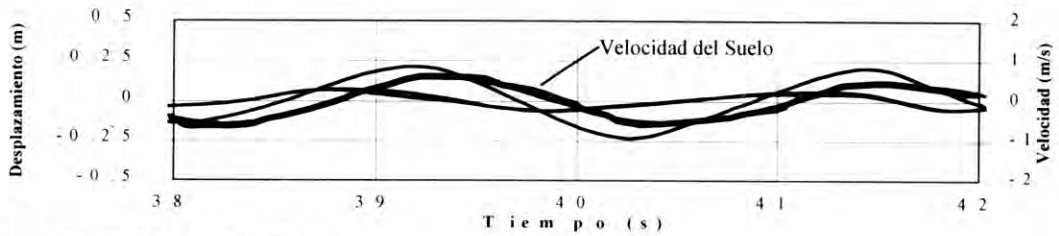
Características del registro asociadas al daño en edificios de hormigón armado



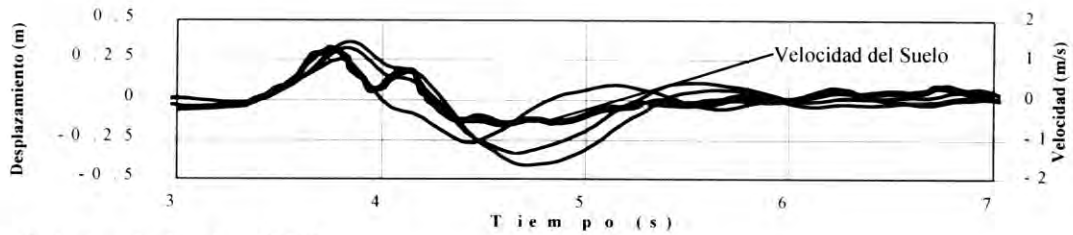
a) Viña del Mar S20W, Chile 1985.



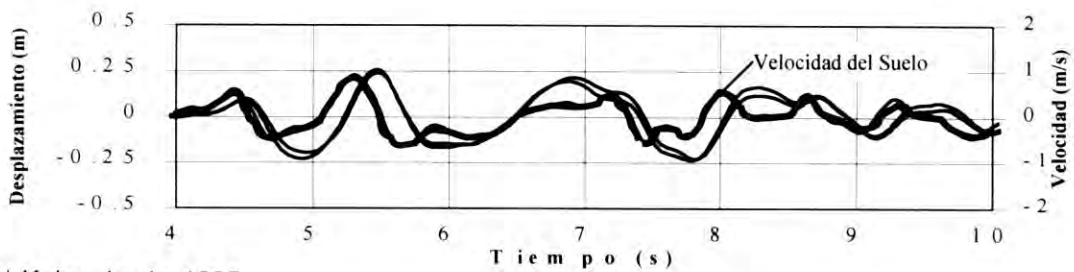
b) Lolleo N10E, Chile 1985.



c) SCT-EW, México 1985.



d) Sylmar, Northridge 1994.



e) Kobe, Japón 1995.

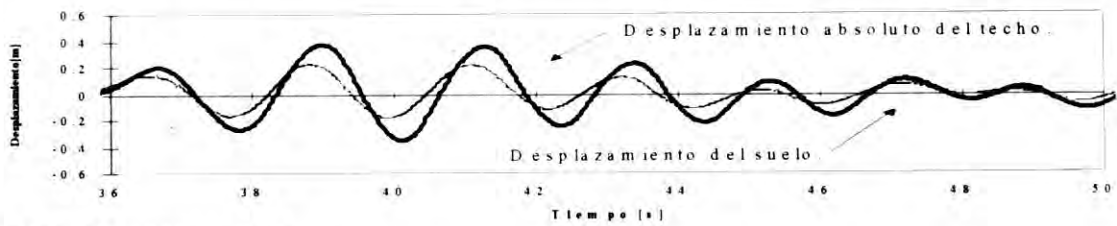
Fig 5. Historia de desplazamientos absolutos del techo y la velocidad del suelo



a) Viña del Mar S20W, Chile 1985.



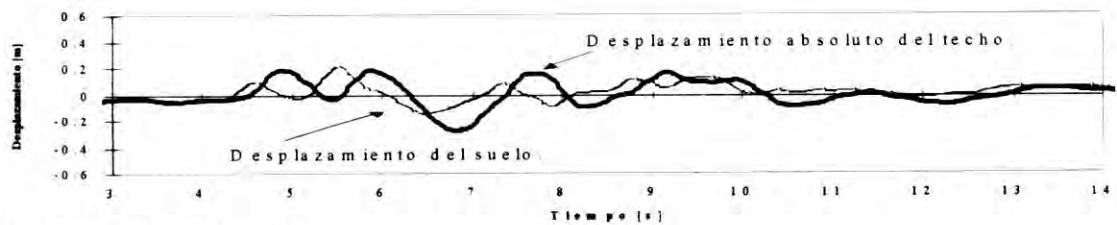
b) Lolleo N10E, Chile 1985.



c) SCT-EW, México 1985.



d) Sylmar, Northridge 1994.



e) Kobe JMC, Japón 1995.

Fig 6. Historia de desplazamientos absolutos del techo del edificio y del suelo



Para encontrar el instante en que ella ocurre es necesario aislar el contenido de pulsos largos de aceleración, cuya duración queda determinada por el tiempo que transcurre entre dos cruces por cero consecutivos de la velocidad del suelo.

En la figura 7 se dibujó el pulso largo de velocidades seleccionado para la componente S20W del registro de Viña del Mar que produce un desplazamiento lateral importante en la estructura. En el mismo gráfico se dibujó el intervalo seleccionado del registro de aceleraciones del suelo. Para definir el largo del intervalo se hicieron varios análisis con diferentes duraciones de la sollicitación hasta obtener una respuesta de la estructura parecida a la calculada con todo el registro en ese intervalo de tiempo. Finalmente se decidió tomar el instante de velocidad nula como inicio del intervalo elegido, seleccionándose una duración determinada por tres cruces consecutivos de la aceleración del suelo. En el caso de Viña del Mar no hay incursiones no lineales importantes y son varios los pulsos que producen valores similares. En cambio en Northridge o en Kobe existe prácticamente un gran pulso largo que entrega repentinamente la mayor cantidad de energía. En la figura 8 se muestran los pulsos seleccionados para el registro de Kobe, registro muy parecido al de Northridge en este aspecto.

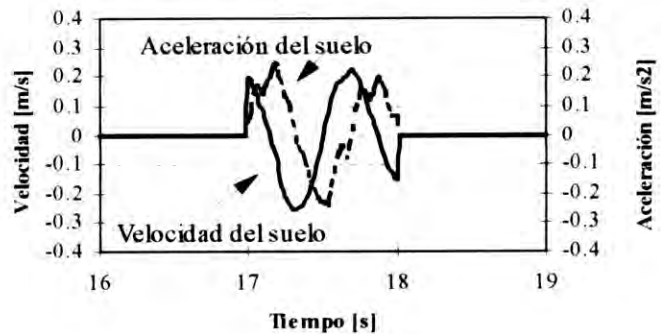


Fig 7. Pulso aislado del sismo de Viña del Mar

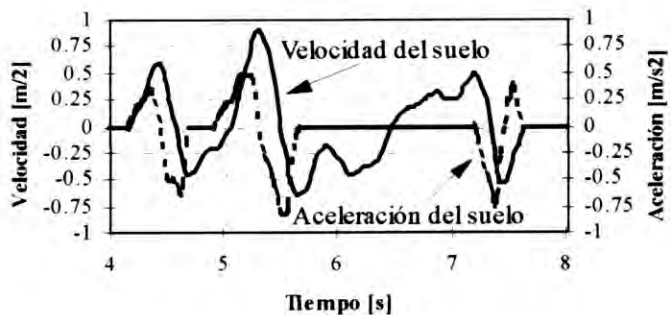


Fig 8. Pulso aislado del sismo de Kobe

En las figuras 9 y 10 se dibujó para los registros S20W de Viña del Mar y JMC de Kobe, la energía de entrada (Bertero, 1992) cada dos cruces por cero consecutivos de la velocidad del suelo, destacándose el sector correspondiente de los registros que contienen solamente los intervalos elegidos relacionados con los mayores pulsos largos de

velocidad. Se puede observar que los pulsos seleccionados están relacionados con las mayores cantidades de energía de entrada por ciclo.

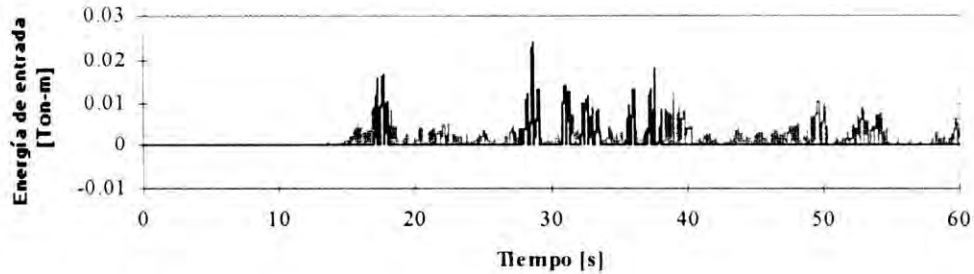


Fig 9. Energía de entrada entre cruces por cero consecutivos de la velocidad del suelo Viña del Mar S20W. Se destacan los pulsos seleccionados

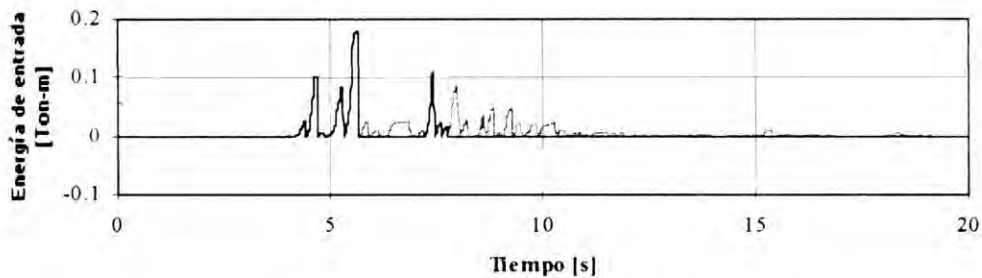


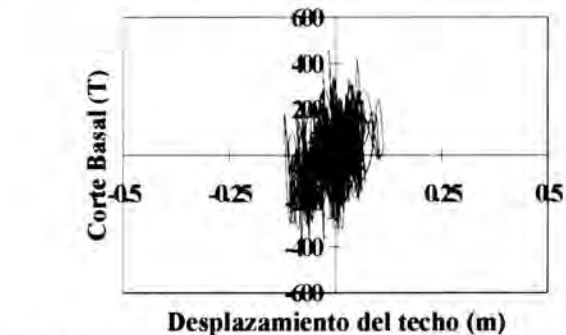
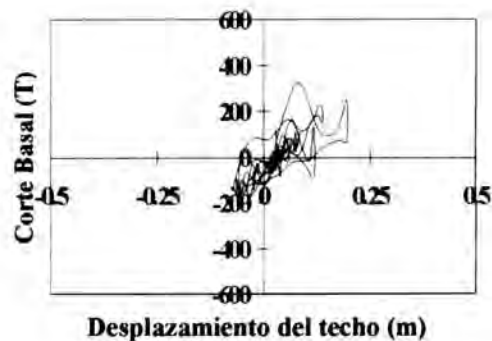
Fig 10. Energía de entrada entre cruces por cero consecutivos de la velocidad del suelo Kobe. JMC. Se destacan los pulsos seleccionados.

### COMPARACIÓN DE LA RESPUESTA A UN REGISTRO CON LA RESPUESTA AL INTERVALO SELECCIONADO DEL REGISTRO QUE CONTIENE PULSOS LARGOS DE ACELERACIÓN

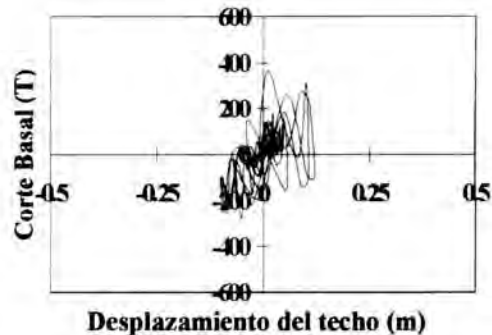
En la figura 11 se dibujó el corte basal en función del desplazamiento lateral del techo para el edificio 2; al lado izquierdo se muestran los dibujos para los registros completos y al lado derecho para los registros aislados de aceleración para los cinco sismos estudiados. Se excluyó el registro SCT-EW (México, 1985), que aparece como una sucesión de pulsos largos de aceleración, porque al aplicar el criterio adoptado de selección de pulsos largos se seleccionaría prácticamente el registro completo, indicando su gran destructividad potencial para estructuras flexibles. Se observa que las máximas demandas de desplazamientos laterales corresponden a Northridge y Kobe, seguidos por Viña del Mar y Llolleo. En la figura de la derecha se puede visualizar que los intervalos de aceleración



a) Viña del Mar S20W, Chile 1985.



b) Lolloo N10E, Chile 1985.



c) Sylmar, Northridge 1994.



d) Kobe JMC, Japón 1995



Fig 11. Corte Basal - Desplazamiento del techo para el edificio 2

seleccionados reproducen prácticamente de manera idéntica la forma de la mayor incursión no lineal en las relaciones fuerza-deformación, rescatándose de esta manera las características destructivas del sismo. El resto del registro produce desplazamientos pequeños conformando las manchas en torno al origen en las figuras de la izquierda, sin producir por lo tanto daños significativos a pesar de la larga duración del sismo. Los resultados para los otros dos edificios fueron similares, omitiéndose por razones de espacio.

En las figuras 12 se muestran las energías de entrada para los Edificios 1 y 2 para los registros completos y para los intervalos de aceleración seleccionados. Se omitieron los resultados del tercer edificio porque eran muy similares a los obtenidos para el Edificio 2. Exceptuando el caso del registro SCT-EW de México, se puede notar que la resistencia a acciones laterales del edificio no tiene una gran influencia en la cantidad de energía de entrada, tanto para el registro completo como para los intervalos seleccionados. Es importante destacar la gran diferencia entre la energía de entrada total del sismo y la cantidad de energía entregada por los pulsos de aceleración seleccionados. En algunos terremotos, como Kobe y Northridge, los pulsos aislados entregan entre el 70 % y el 90 % de la energía total, en cambio en Viña del Mar y Llolleo los pulsos aislados entregan solamente entre un 30 % y un 50 % de la energía total. Como el daño está relacionado sólo con incursiones importantes dentro del rango no lineal, que están íntimamente correlacionadas con los pulsos largos de velocidad, se ve de estos resultados que en cuanto a daño, no es la cantidad total de energía de entrada la que interesa sino la entregada a la estructura por unidad de tiempo. Las pendientes de estas curvas muestran la rapidez con que la energía es entregada al edificio. Para el caso de Kobe se observa una fuerte pendiente inicial para los dos edificios tanto para el registro completo como para los pulsos aislados de aceleración.

En el caso del registro SCT-EW de México, la extensa sucesión de pulsos largos de aceleración hace que en el Edificio 1, de baja resistencia, la energía de entrada sea mucho mayor que en el Edificio 2, a pesar de su alta rigidez, mostrándose que en este caso es importante tener una resistencia adecuada. En la figura 13 se comparan las relaciones corte basal versus desplazamiento lateral del techo calculadas con este registro para los edificios 1 y 2 (el tercero dio una respuesta casi idéntica al segundo). Se observa que en el Edificio 2 se logró una respuesta lineal con un pequeño aumento de la resistencia respecto al Edificio 1, no siendo necesario aumentarla más allá de este valor para mejorar su respuesta. Edificios bajos estructurados con muros habrían tenido una excelente respuesta a este movimiento del suelo que tanto daño causara en estructuras más flexibles.

En la figura 14 se dibujó para los Edificios 1 y 2 la energía histerética calculada con el registro completo y con el registro que contiene sólo los pulsos largos de aceleración seleccionados. Se observa en los casos de Llolleo y de Viña del Mar, que toda la energía histerética queda entregada por los pulsos seleccionados, independientemente de la resistencia, aún cuando sólo una pequeña parte de la energía de entrada corresponde a la ocurrencia de pulsos largos, según se puede ver en la figura 12. Por otra parte, en

Características del registro asociadas al daño en edificios de hormigón armado

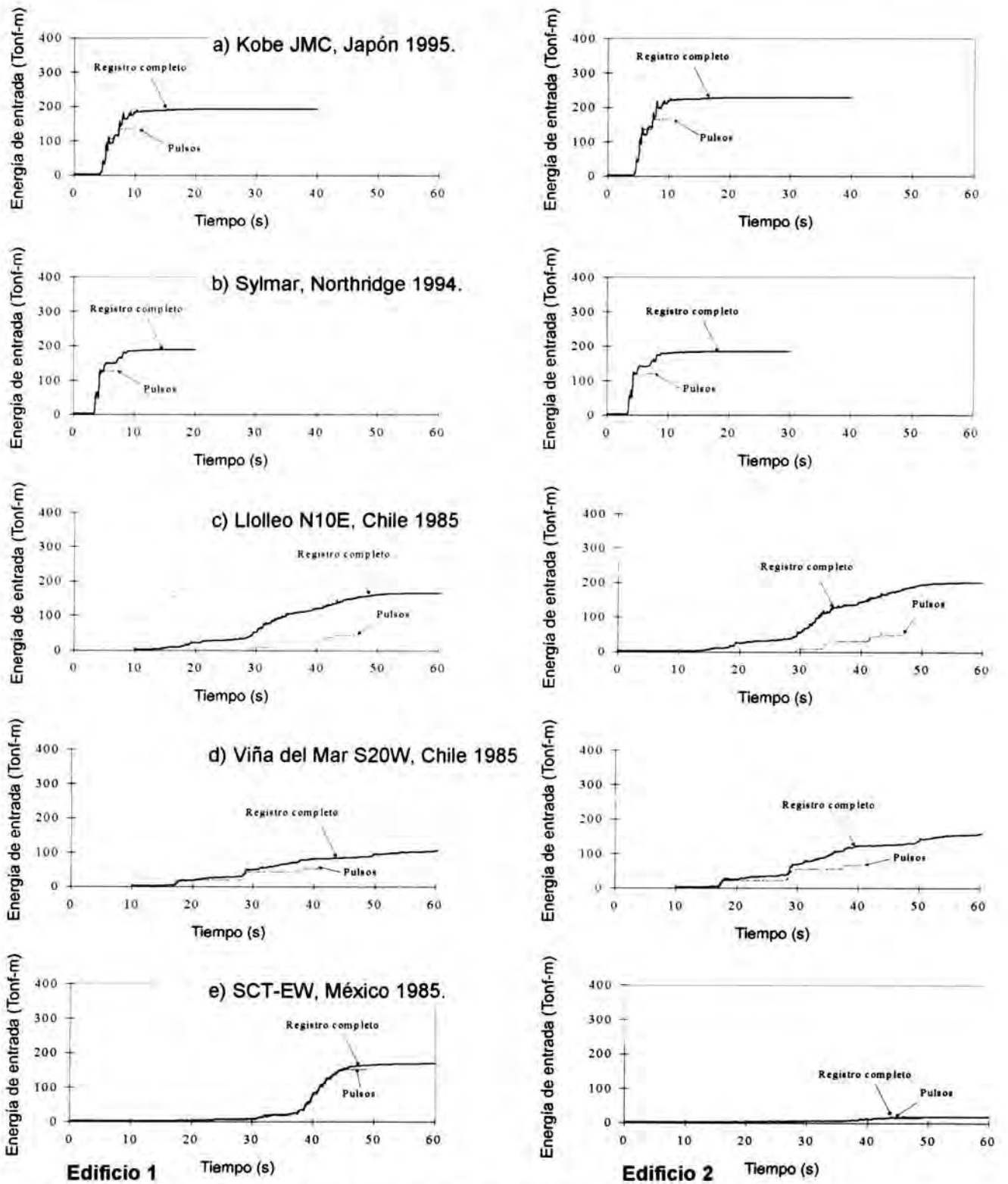


Fig 12. Energía de entrada para los registros completos y pulsos aislados

Northridge y Kobe casi toda la energía de entrada está relacionada con el pulso largo de aceleraciones, y por lo tanto, toda la energía histerética se absorbe y disipa en un tiempo corto. Es decir, registros con gran energía de entrada, no necesariamente son los más dañinos porque la energía histerética desarrollada a bajos desplazamientos no constituye un daño acumulativo, y en un caso extremo la estructura podría vibrar indefinidamente sin llegar a la falla.

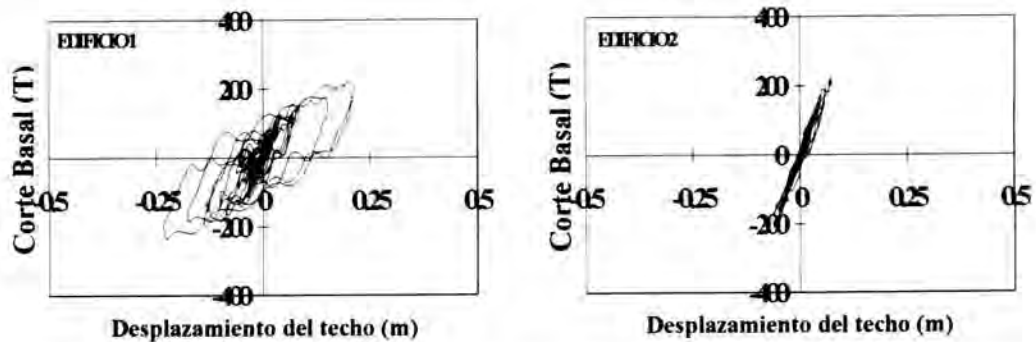


Fig 13. Historias de corte basal-desplazamiento del techo para los edificios 1 y 2, sometidos al registro completo SCT-EW, México 1985

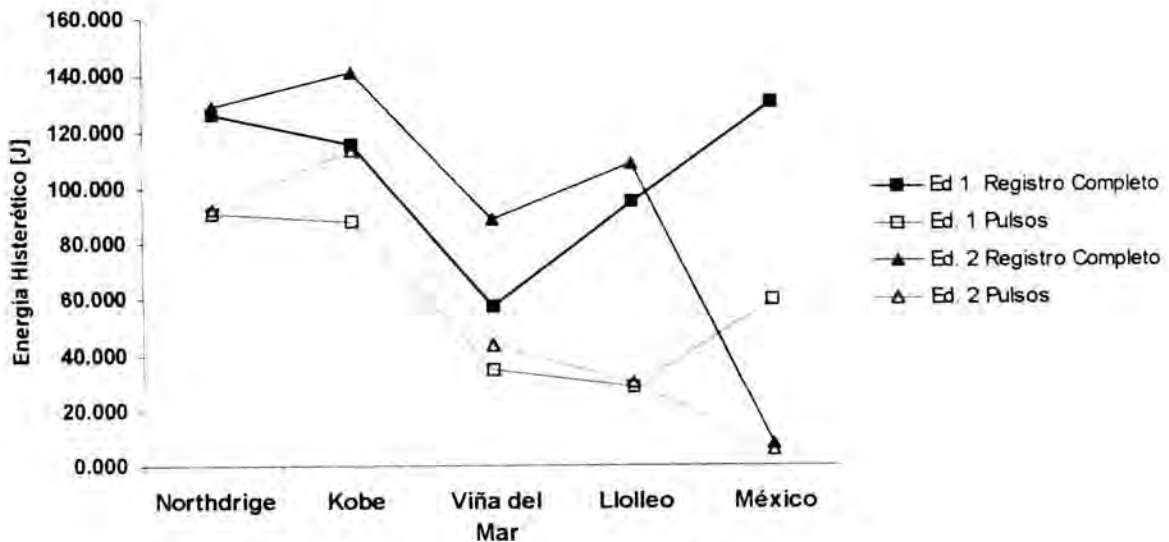


Fig 14. Energía Histerética. Edificios 1 y 2

Para estudiar el efecto de la resistencia a acciones laterales que las estructuras poseen en el grado de daño que se produce, se necesita estudiar algún índice que considere también el desplazamiento lateral. Para ello se dibujaron en la figura 15 los índices de daño de Park-Ang calculados con los cinco registros para los Edificios 1 y 2. De esta

figura se puede ver que este índice ordena bien los edificios en cuanto a daño observado, tanto como si se calcula con el registro completo o con pulsos aislados, dado que considera el grado de incursión no lineal a través del término del desplazamiento lateral. Si se calcula sólo para los pulsos largos seleccionados, se corrige la pequeña diferencia que se obtendría en Lollole en el Edificio 2, con el registro completo. Se puede observar que edificios rígidos de alta resistencia tendrían un daño similar en los cuatro primeros terremotos. El edificio más débil sufriría bastante en los tres terremotos ocurridos fuera de Chile. Estos resultados coinciden con lo observado en edificios de diez pisos con muros en su estructura.

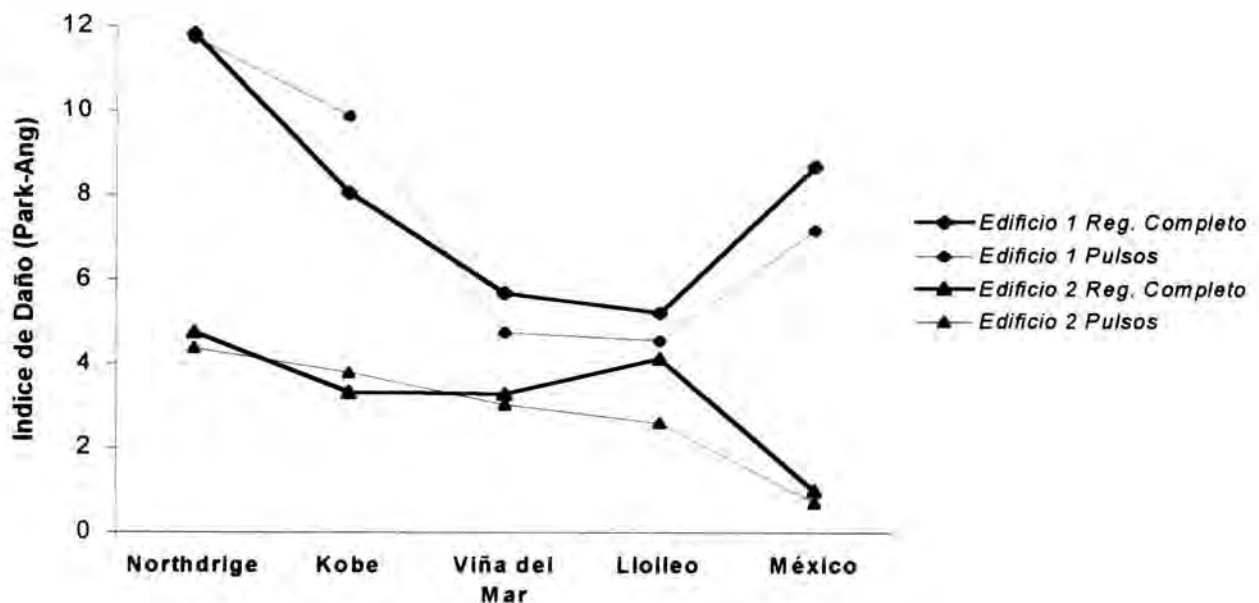
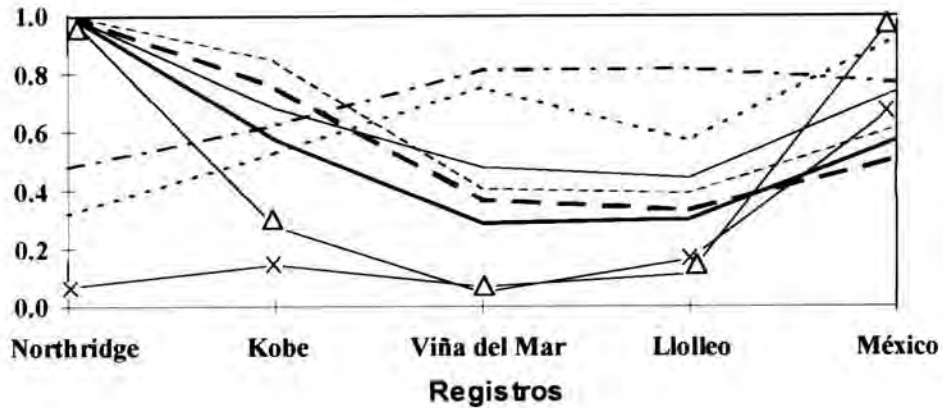


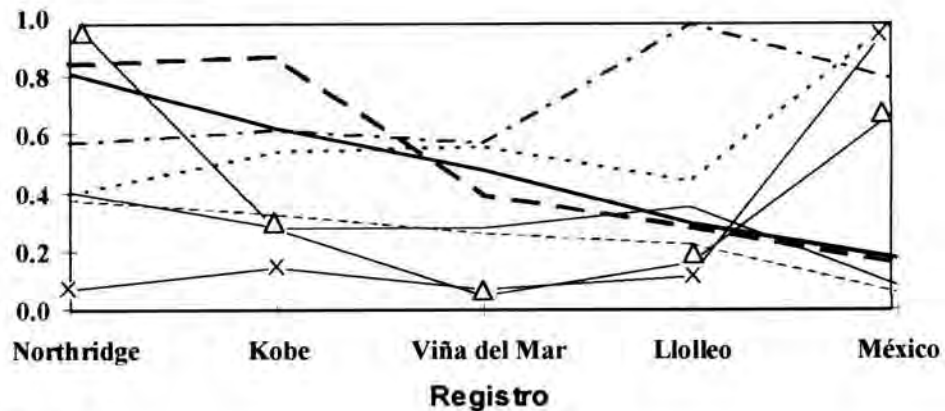
Fig 15. Índice de Daño de Park-Ang. Edificios 1 y 2

En la figura 16 se compara la ordenación de los registros que producen los diferentes parámetros propuestos como índices para estimar el daño, calculados para los Edificios 1 y 2. En estas figuras se incluyeron el desplazamiento lateral máximo del techo, el índice de daño de Park-Ang y el factor Gamma, normalizados respecto al mayor valor de la serie. Al estar los valores normalizados, la figura solo permite visualizar la ordenación que se le da a los terremotos, no permitiendo una discusión sobre la incidencia de los diferentes parámetros participantes. El mayor desplazamiento lateral se obtuvo para el Edificio 1 con el registro de Northridge; el registro de Viña del Mar habría dado un 30 % de este valor para ese edificio y un 50 % para el Edificio 2. No se incluyó el Edificio 3 por razones de espacio. En esta figura se agregaron el potencial destructivo de Saragoni (Araya y Saragoni, 1985) y el índice de Rodríguez (1994) para los registros completos de los sismos estudiados. Los sismos se ordenaron según el máximo desplazamiento lateral

calculado para el edificio 1, que coinciden tanto para el pulso como para el registro completo. El mismo orden se obtiene con el índice de Park-Ang y con el valor inverso del Factor  $\gamma$ , calculados con el registro que contiene sólo pulsos aislados de aceleración. El potencial destructivo de Saragoni le da una gran importancia relativa al registro de México al no considerar la resistencia de la estructura. El índice de Rodríguez contiene indirectamente la resistencia y rigidez de la estructura al incluir el máximo desplazamiento esperado, pero considera la energía histerética total sin importar cómo fue entregada,



a) Edificio 1.



b) Edificio 2.

	Registro completo	Pulsos
Desplazamiento máximo	—————	———
Park & Ang	—————	- - - - -
Factor Gamma	—————	- - - - -
Pd (Saragoni)	————— X	
Id (Rodríguez)	————— Δ	

Fig 16. Indices de daño normalizados



quedando los registros de Northridge y México como los más destructivos. En este índice se supuso que en ambos lugares había edificios flexibles. Aun cuando se corrigiera el valor tomando la mitad del período considerado, estos dos sismos aparecerían con la mayor potencialidad destructiva.

Algunos de los índices aquí evaluados contienen las características de la estructura, como el período, la resistencia y además de manera implícita una definición del daño. En el anexo de este trabajo se muestra la definición de cada uno de estos índices. El índice de daño de Park-Ang, es una combinación lineal de dos términos, el primero mide el daño debido a las deformaciones máximas de la estructura. Dado que los pulsos aislados de aceleración dan desplazamientos similares a los calculados con el registro completo, el primer término de este índice debería ser semejante para ambos. El segundo término corresponde al daño debido a cargas cíclicas caracterizado principalmente por la energía histerética  $E_h$  y un factor  $\beta$  que depende de las características de la estructura. El registro completo induce más energía histerética que un registro de menor duración que contenga sólo pulsos aislados de aceleración pero como no toda la energía histerética se traduce en daños importantes, el índice podría sugerir que la estructura queda más dañada que lo realmente observado en el caso de sismos del tipo armónico, como lo son los dos registros de Chile utilizados.

Para ordenar los registros de acuerdo a la capacidad destructiva del temblor en ese lugar para una estructura específica, debería considerarse sólo la energía relacionada con el daño e incluir las propiedades de resistencia y rigidez de la estructura. La misma cantidad de energía produce daños diferentes si es entregada en un sólo pulso largo o en varios pulsos menores durante largo tiempo. De acuerdo a estos resultados, si en México hubiera habido sólo edificios de alta resistencia y rigidez como los edificios 2 y 3, el daño habría sido mínimo.

## CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo es mostrar a través del análisis de un edificio la conveniencia de considerar la historia completa de la respuesta para evaluar los posibles daños que un terremoto produce. De un solo caso de estudio no se pueden sacar conclusiones generales, sirviendo estos resultados para ilustrar una idea que requiere de desarrollos posteriores. El uso de índices aislados, aún cuando son de gran interés, no permite por sí sólo deducir el daño real que una estructura puede tener. En el caso de sismos vibratorios, como Chile 1985, aun cuando la energía de entrada puede ser comparable a la de sismos de menor duración, como Northridge y Kobe, la energía es entregada durante un tiempo muy largo que permite que la estructura tenga tiempo de absorberla y disiparla en muchos ciclos, respondiendo con bajos desplazamientos laterales y con menor daño que en una estructura sometida a un sismo impulsivo, caracterizado por entregar una gran cantidad de energía en un tiempo muy breve. Sólo una parte de la energía histerética se traduce en daños de importancia; esta energía es entregada por una parte del registro que contiene pulsos largos de aceleración, cuya duración está determinada por el cambio de signo de la

velocidad del suelo (pulsos largos de velocidad). Al evaluar la capacidad destructiva de un registro, se deberían aislar los pulsos de mayor contenido de energía y aplicarle a ellos los diferentes índices de daño propuestos. Identificar los posibles registros de aceleración a partir de los pulsos de velocidad esperados en un lugar permite establecer parámetros útiles en el diseño con la finalidad de minimizar el daño.

### **RECONOCIMIENTO**

Esta publicación es consecuencia del proyecto de investigación Fondecyt 1960533, realizado en la U.T.F.S.M. Las opiniones de los profesores Mario Rodríguez (UNAM) y Rodolfo Saragoni (U. de Ch.) han sido de gran importancia para el desarrollo de los temas aquí tratados, parte de las tesis de grado de los señores Pablo Cordero y Ernesto Gómez. Juan Carlos González contribuyó a la discusión y revisión de este trabajo. Se agradecen los comentarios y sugerencias de dos árbitros anónimos que contribuyeron a mejorar el contenido del artículo.

### **REFERENCIAS**

American Concrete Institute, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete", (ACI 318-89 Revised 1992), 1992

Araya, R. y Saragoni, G., "Earthquake Accelerogram Destructiveness Potential Factor". In: Proc. Eight World Conf. On Earthquake Eng. II, 835-842. EERI, San Francisco, 1985

Arias, Arturo., "A measure of earthquake intensity". In: Seismic Design for Nuclear Power Plants (R. Hansen, de.), 438-483. Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge, 1970

Bertero, V. V. y Uang, C. M., "Issues and Future Directions in the Use of an Energy Approach for Seismic-Resistant Design of Structures", Nonlinear Seismic Analysis and Design of R/C Buildings, pp. 3-22, de. Peter Fajfar and H. Krawinkler, Elsevier Applied Science, 1992

Bonelli, P.; Cordero, P. y Gómez, E., "Evaluación de los Efectos de Pulsos Largos de Velocidad en la Respuesta Sísmica de la Estructura". Séptimas Jornadas de Achisina, La Serena, Noviembre 1997

Carr, A. Ruaumoko, Inelastic Dynamic Analysis Program. University of Canterbury, January, 1996

Fajfar, P., "Equivalent Ductility Factors, Taking Into Account Low-Cycles Fatigue", The Journal of the International Association for Earthquake Engineering, Vol. 21, No. 10, pp. 837-848, Octubre, 1992

Instituto Nacional de Normalización (INN), "Diseño Sísmico de Edificios", Norma NCh433.Of93, Santiago, Chile, Primera Edición año 1993

Otani, S., "SAKE, A Computer Program for Inelastic Response of R/C Frames to Earthquakes". Report UILU-Eng-74-2029, Civil Engineering Studies. Univ. Of Illinois at Urbana-Champaign, Nov. 1974

Park, Y-J y Ang, A., "Mechanistic Seismic Damage Model For Reinforced Concrete". J. Struct. Div. ASCE, Vol. 111, No. 4 April. pp. 722-757, 1985

Rodríguez, M., "A Measure of Capacity of Earthquake Ground Motion to Damage Structures", Earthquake Eng. and Struct. Dyn. Vol 23, pp.1-17.1994

**Anexo: Definiciones de daño utilizadas**

**Potencial destructivo, Araya y Saragoni (1985)**

$$P_D = \frac{\pi}{2g} \frac{\int_0^{t_0} u_s^2(t) dt}{\nu_0^2}$$

Donde:  $u_s^2$  Aceleración del suelo  
 $\nu_0$  Frecuencia natural del suelo  
 $g$  Aceleración de gravedad

**Índice de daño, Park-Ang (1985)**

$$D_{PA} = \frac{x_{max}}{x_u} + \beta \frac{E_h}{F_y x_u} = \frac{\mu + \beta(\mu_e - 1)}{\mu_u}$$

Donde:  $x_{max}$  Desplazamiento máximo bajo sollicitaciones sísmicas  
 $x_u$  Desplazamiento último bajo sollicitaciones monotónicas  
 $\beta$  Constante, que depende de las características estructurales  
 $E_h$  Energía disipada por histéresis  
 $F_y$  Esfuerzo de fluencia

**Factor  $\gamma$ , Fajfar(1992)**

$$\gamma = \frac{\sqrt{E_h/m}}{\omega D}$$

Donde:  $E_h$  Energía disipada por histéresis  
 $M$  Masa de la estructura  
 $\omega$  Frecuencia natural de la estructura  
 $D$  Desplazamiento

**Índice de daño, Rodríguez (1994)**

$$I_D = \frac{\gamma^2 E_h}{(\omega^* \delta_d)^2}$$

Donde:  $E_h$  Energía disipada por histéresis  
 $\omega$  Frecuencia natural de la estructura  
 $\delta_d$  Desplazamiento máximo del techo

Nota : Para información detallada ver referencias.