

LA DUCTILIDAD EN EL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LAS ESTRUCTURAS

CARL LÜDERS SCH*

RESUMEN

En este trabajo se analizan las diferentes formas en que la ductilidad influye en el comportamiento sísmico de las estructuras. Se concluye que la ductilidad no solamente permite reducir los esfuerzos sísmicos de diseño de las estructuras sino que también actúa muy favorablemente sobre la redistribución de esfuerzos a que queda sometida la estructura reduciendo fuertemente el peligro de una falla en cadena y fallas debido a errores en la estimación teórica de las rigideces de los elementos resistentes. Se estudia además la importancia que tiene el endurecimiento de los elementos resistentes en la ductilidad de la estructura y se analizan los resultados de algunos casos particulares pudiendo confirmar con ellos las conclusiones que se obtuvieron en el análisis preliminar.

1. INTRODUCCIÓN

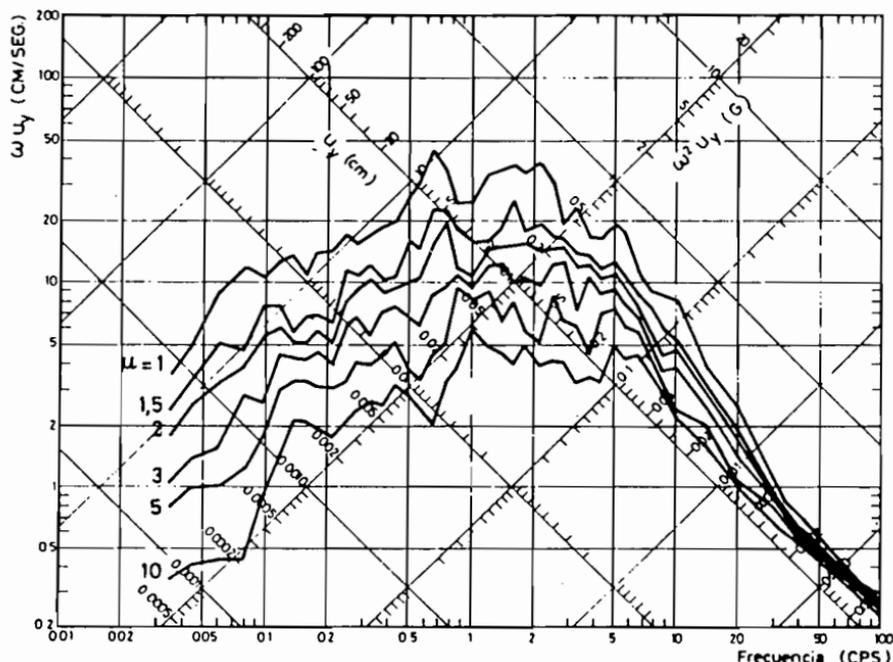
La acción de un determinado sismo sobre todas las estructuras que se podrían construir en un mismo lugar (suelo de fundación y distancia epicentral fijos) no solamente depende del sismo que actúa sobre ellas sino que también depende en gran medida de las características dinámicas (frecuencias propias, grados de amortiguamiento y ductilidad) de

*Departamento de Ingeniería Estructural, P. Universidad Católica de Chile.

cada estructura. Es imposible definir con un solo número (una aceleración, un desplazamiento o una energía máxima inducida o traspasada a la estructura) la acción de un sismo bien determinado sobre el universo de estructuras que se podrían construir en un mismo lugar.

Un sismo debe ser considerado como un movimiento forzado y variable en el tiempo de la base de la estructura o del suelo de fundación que rodea al edificio si se incluye el efecto de interacción suelo-estructura. Los elementos resistentes de la estructura tratan de arrastrar a todas las masas de la estructura para que sigan dicho movimiento. En la medida que lo consiguen se generarán mayores o menores fuerzas de inercia que son las que en definitiva dan origen a los esfuerzos sísmicos en la estructura. Surgen de inmediato tres casos muy especiales. El primero corresponde al de estructuras muy rígidas en que todas las masas de la estructura se mueven igual que el suelo de fundación. La sollicitación sísmica sobre este tipo de estructuras quedará dado por la aceleración del suelo a que da origen el sismo en cada instante. Otro caso especial es el de estructuras muy flexibles en que los elementos resistentes son incapaces de arrastrar a las masas de la estructura. Éstas seguirán inmóviles y los esfuerzos inducidos en la estructura dependerán únicamente de los desplazamientos del suelo que produce el sismo. La energía que el sismo transfiere en este caso a la estructura será muy pequeña. Un último caso especial es aquel en que alguna de las frecuencias propias de vibrar de la estructura coincide exactamente con las frecuencias dominantes del sismo. Se producirá la resonancia que está caracterizada por grandes deformaciones y grandes esfuerzos sollicitantes en los elementos resistentes de la estructura. En estos casos se transfiere gran cantidad de energía a la estructura que se manifiesta en ella como energía cinética y energía de deformación (que puede ser elástica o inelástica (plástica)) que la estructura va disipando gracias al amortiguamiento y a deformaciones inelásticas. Mientras menor sea la energía que el sismo traspasa a la estructura y mayor sea la energía que la estructura es capaz de disipar durante el tiempo que dura el sismo menor será la energía máxima acumulada en ella y por consiguiente los esfuerzos que el sismo induce en sus elementos resistentes.

La mejor forma que actualmente existe para representar en forma completa y correcta la acción de los sismos sobre las estructuras son los espectros de respuesta. Si se usa la forma trilogarítmica de representarlos que propuso Newmark se obtienen gráficos como los que se muestran para algunos registros del terremoto de la zona central de Chile del 3 de marzo de 1985 en las Figuras 1 al 4 (Ref. 1). En ellos el eje de las abscisas representa las frecuencias propias de vibración elástica de la estructura. Como parámetro se usa la ductilidad global que debe poseer la estructura

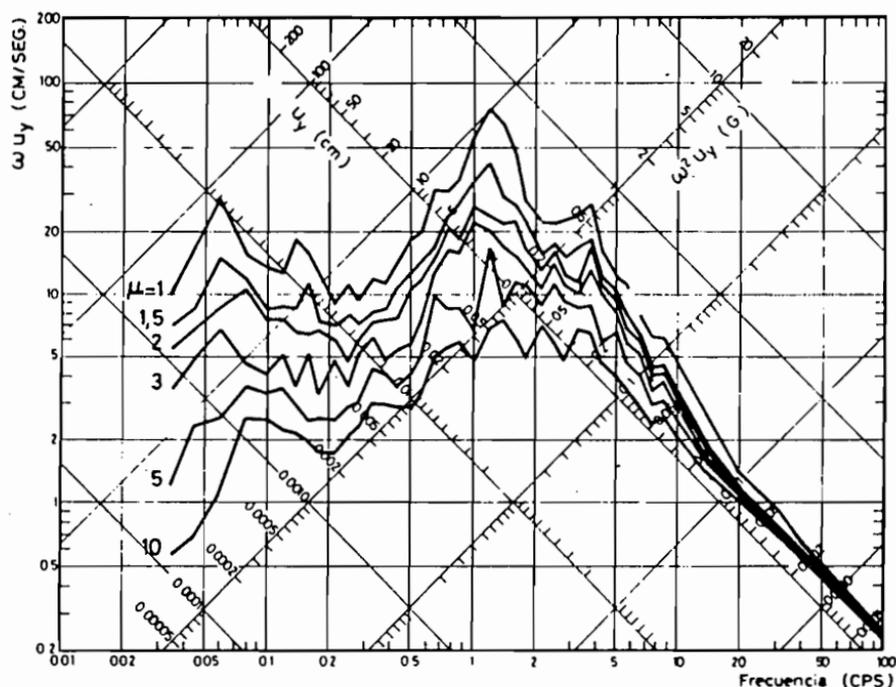


Espectros inelásticos para Valparaíso, UTFSM, 3/3/85, componente N70 E, sistemas elastoplásticos con 5% de amortiguamiento y ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 5 y 10.

Figura 1. Espectro inelástico de respuesta del sismo registrado en la U.T.F.S.M. el 3/3/85 (REF. 1).

para poder sobrevivir al sismo a que corresponde el espectro. Es fácil comprobar mediante estos espectros, o cualquier otro, la validez del comportamiento sísmico que se atribuyó a las estructuras especiales que se analizaron anteriormente.

Los espectros permiten confirmar que estructuras que son capaces de ceder al movimiento que les desea imponer un sismo y estructuras que son capaces de disipar energía durante el sismo, quedarán sometidas a sollicitaciones sísmicas mucho menores que aquellas que son relativamente rígidas y se mantienen en rango elástico. Sin embargo, el hecho de pasar al rango inelástico presenta algunos problemas. Necesariamente deben producirse algunos cambios permanentes en la estructura que generalmente se manifiestan en forma de daños. Lo importante es conseguir que estos daños sean tales que no reduzcan en forma notoria la resistencia máxima de la estructura (incluso después de varios ciclos de carga y descarga) y que sean fácilmente reparables con el fin de que la estructura sea capaz de



Espectros inelásticos para Valparaíso, El Almendral, 3/3/85, componente S40E, sistemas elastoplásticos con 5% de amortiguamiento y ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 5, y 10.

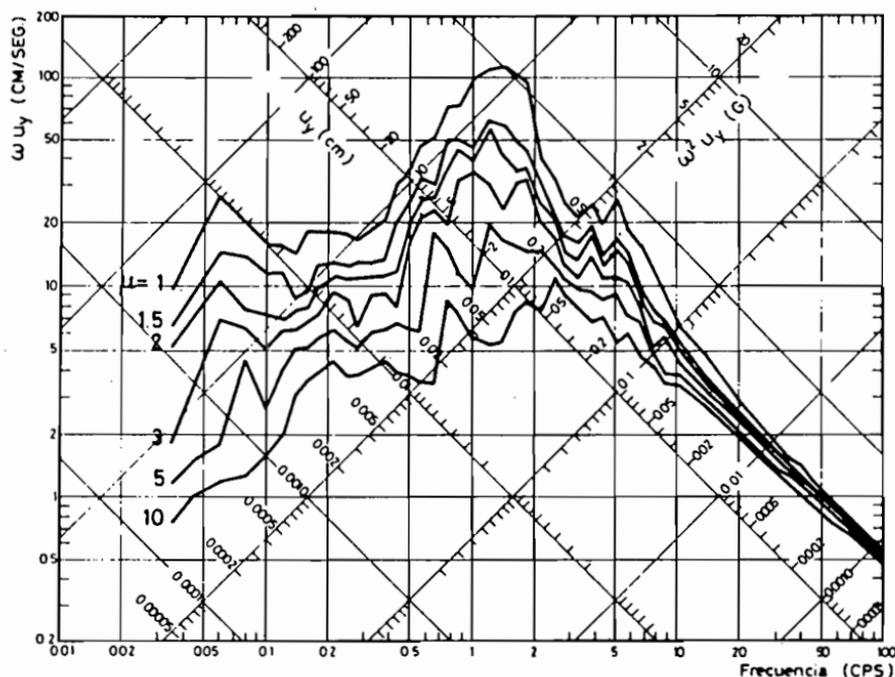
Fig. 2. Espectro inelástico de respuesta del sismo registrado en el Almendral (Valparaíso) el 3/3/85 (Ref. 1).

enfrentar en buena forma a otro sismo de características similares. Esto es relativamente fácil de lograr en estructuras de acero y bastante más difícil de lograr en estructuras de hormigón armado y albañilería armada.

2. LA DUCTILIDAD

La ductilidad es el parámetro con el cual se mide la capacidad de una estructura para deformarse más allá del límite elástico sin pérdida notoria de su capacidad resistente. Cuantitativamente se define en la forma que se muestra en la Figura 5, o sea, como el cociente entre la deformación máxima que alcanza la estructura sin perder mucha resistencia y la deformación que presenta la estructura al pasar al rango inelástico.

Mientras mayor es la ductilidad que posee una estructura, mayor será su capacidad para enfrentar y sobrevivir a sismos de gran violencia. Los



Espectros inelásticos para Viña del Mar, 3/3/85, componente S20W, sistemas elastoplásticos con 5% de amortiguamiento y ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 5, y 10.

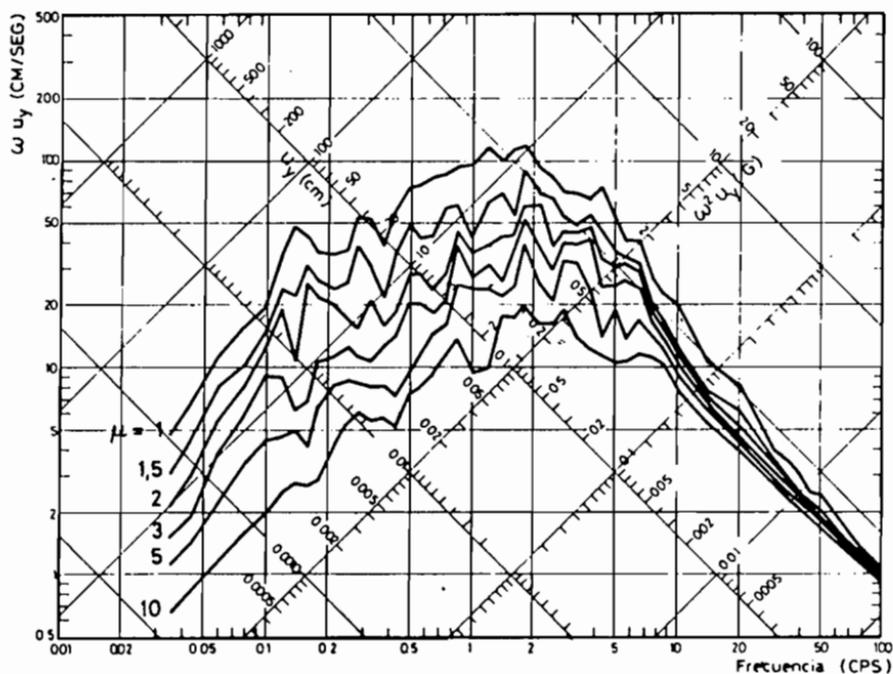
Fig. 3. Espectro inelástico de respuesta del sismo registrado en el plano de Viña del Mar el 3/3/85 (Ref. 1).

motivos que permiten sostener esto son fundamentalmente los siguientes:

2.1. Reducción de Esfuerzos Sísmicos debido a la Ductilidad

En estructuras que pasan al rango inelástico durante un sismo se generan esfuerzos que en general son mucho menores que los que se producen en estructuras similares (de igual frecuencia propia elástica e igual grado de amortiguamiento) que se mantienen en rango elástico. Esta reducción de esfuerzos depende sin embargo de las características de la estructura.

En estructuras flexibles en relación a las frecuencias dominantes del sismo los esfuerzos máximos que genera el sismo en la estructura son controlados por los desplazamientos máximos que experimenta el suelo de fundación. En dichos casos es fácil demostrar que la reducción de



Espectros inelásticos para Llo-Lleo, 3/3/85, componente N10E, sistemas elastoplásticos con 5% de amortiguamiento y ductilidades de 1, 1.5, 2, 3, 5 y 10.

Fig. 4. Espectro inelástico de respuesta del sismo registrado en Llolelo el 3/3/85 (Ref. 1).

esfuerzos por ductilidad es directamente proporcional a la ductilidad, tal como se muestra en la Figura 6.

Para estructuras más rígidas en que la energía que el sismo traspasa a la estructura con comportamiento inelástico es igual que la energía que traspasa a una estructura que se mantiene en rango elástico, los esfuerzos sísmicos inducidos en la estructura elástico-plástica se reducen en el factor $\sqrt{2\mu - 1}$ con respecto a los esfuerzos que el mismo sismo genera en estructuras perfectamente elásticas de igual período propio. Las deformaciones máximas que se producirán en la estructura elasto-plástica serán $\frac{\mu}{\sqrt{2\mu - 1}}$ veces mayores que las de la estructura elástica correspondiente.

Para estructuras muy rígidas en relación a las frecuencias dominantes del sismo los esfuerzos internos que genera el sismo en la estructura son controlados para la aceleración máxima que experimenta el suelo de fundación durante el sismo. Los valores máximos de dichos esfuerzos serán iguales a la masa de la estructura multiplicada por la aceleración

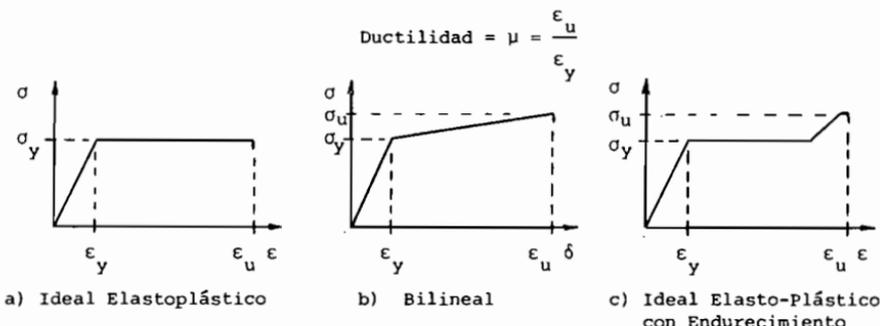


Fig. 5. Definición de la ductilidad en sistemas con diferentes tipos de comportamiento inelástico.

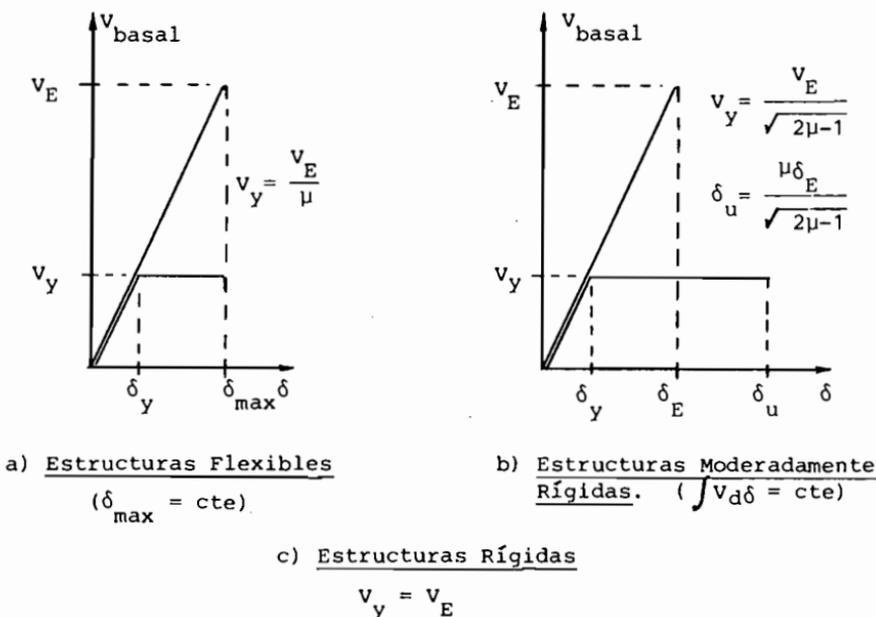


Fig. 6. Reducción de esfuerzos debido a la ductilidad.

máxima del sismo. La ductilidad de la estructura deja de ser efectiva como mecanismos para reducir los esfuerzos sísmicos.

El efecto que se acaba de analizar coincide perfectamente bien y justifica la tendencia moderna de proponer factores de reducción de las sollicitaciones sísmicas que disminuyen considerablemente (Ref. 2) para

estructuras que son muy rígidas en relación a las frecuencias dominantes del sismo. Esto no significa que la ductilidad deja de tener importancia en el comportamiento sísmico de estructuras rígidas ya que para ellas son especialmente válidos los efectos tremendamente beneficiosos de la ductilidad que se nombran en 2.2.

Los espectros de respuesta inelástica confirman la validez de los resultados que se acaban de presentar y entregan la información necesaria para conocer la respuesta sísmica exacta de cualquier otro tipo de estructura. Los valores que entregan los espectros de respuesta inelásticos naturalmente que incluyen el efecto de flexibilización que experimenta la estructura al pasar al rango inelástico, la energía tanto elástica como inelástica que es capaz de acumular la estructura y la energía que disipa la estructura durante el proceso vibratorio a que queda sometida.

2.2. *Contribución Simultánea de todos los Elementos Estructurales a la Resistencia Máxima*

La gran mayoría de las estructuras reales están compuestas por una serie de elementos resistentes que en general poseen características elásticas diferentes. Si estos elementos son frágiles es muy probable que algunos de ellos dejarán de colaborar a la resistencia global de la estructura antes de que los demás alcancen su resistencia máxima. Se producirá lo que se denomina falla en cadena. Para que todos los elementos resistentes puedan contribuir en un instante dado a la resistencia global de la estructura es necesario que ellos tengan la capacidad de seguir deformándose sin pérdida de resistencia. Es precisamente lo que se definió como ductilidad de un elemento estructural. El efecto de la ductilidad que se acaba de nombrar es totalmente independiente del efecto de reducción de esfuerzos sísmicos a que puede dar origen la ductilidad. Es un efecto que no se ha destacado mucho en la literatura especializada a pesar de la gran importancia que tiene para evitar, en caso de sismos de gran intensidad, el colapso de las estructuras y mantener el nivel de daños dentro de límites aceptables. Gracias a este efecto muchos errores en la estimación de las rigideces de los elementos resistentes y ciertos defectos de construcción pierden importancia en el comportamiento sísmico de las estructuras.

3. DUCTILIDAD Y CRITERIOS DE DISEÑO ANTISÍSMICO

En la actualidad prácticamente todas las normas de diseño antisísmico del mundo se rigen por los siguientes criterios generales de diseño:

- Frente a sismos de intensidad moderada, cuya probabilidad de ocurrencia durante la vida útil de la estructura es alta, no deben producirse daños estructurales de ninguna especie.
- Se acepta que sismos de intensidad intermedia produzcan daños estructurales menores fácilmente reparables.
- Frente a sismos de gran intensidad y muy baja probabilidad de ocurrencia se aceptan daños de gran magnitud que eventualmente obliguen a demoler la estructura. No se acepta el colapso o cualquier otro tipo de falla que puede poner en peligro la integridad física de los usuarios del inmueble.

Estos criterios están basados en consideraciones económicas que se sustentan en el hecho que los intervalos de tiempo con que se producen los sismos muy fuertes son en general grandes en relación a la vida útil de las estructuras, que los esfuerzos de diseño se pueden reducir fuertemente si se aceptan pequeñas incursiones de la estructura en el rango inelástico y que la vida humana tiene un valor infinitamente grande.

En la Figura 7 se representa esquemáticamente el comportamiento de tres estructuras de diferentes niveles de ductilidad frente a sismos de intensidad moderada, fuerte y muy fuerte. Las tres estructuras indicadas se diseñaron de tal manera que sean capaces de resistir, en el límite de su capacidad, al sismo más severo a que pueden quedar sometidas. El gráfico permite apreciar la reducción que experimentan los esfuerzos de diseño

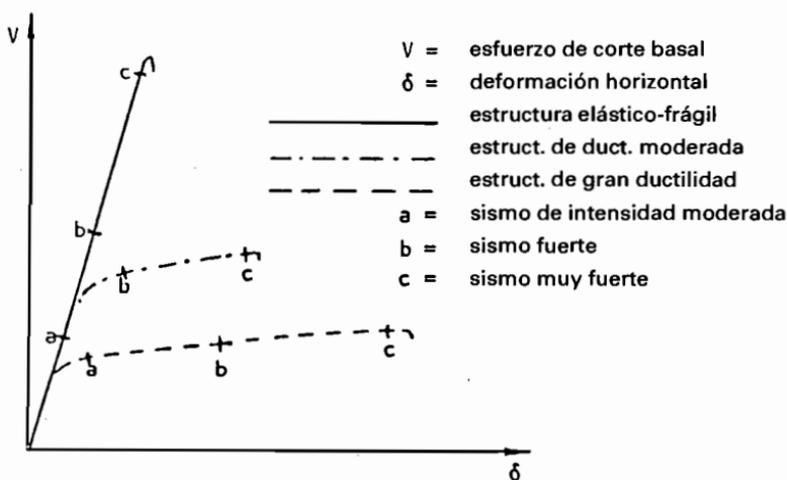


Fig. 7. Comportamiento sísmico de estructuras con diferentes grado de ductilidad global.

(representados por el esfuerzo de corte basal que se indica en el eje de ordenadas del gráfico) a medida que aumente la ductilidad global de la estructura (dada por la relación entre la deformación total que es capaz de desarrollar la estructura sin una reducción importante de su resistencia y su deformación en el límite elástico).

La estructura que posee una ductilidad global moderada cumple exactamente con los límites que fijan los criterios de diseño antisísmico. En efecto, para un sismo de intensidad moderada la estructura permanece en el rango elástico y no sufrirá daño estructural alguno. Para el sismo fuerte la estructura entra ligeramente al rango inelástico sufriendo daños estructurales leves. A pesar de ello la estructura sobrevive al sismo muy fuerte, probablemente con daños estructurales importantes.

La estructura de comportamiento elástico-frágil no sufrirá daño alguno frente a cualquiera de los tres sismos considerados. Cumple por lo tanto también con todos los criterios de diseño antisísmico. Sin embargo, hay un aspecto que es importante destacar en este tipo de estructuras. El hecho que no sufra daño alguno frente a sismos de intensidad relativamente alta no permite concluir absolutamente nada con respecto a su comportamiento frente a sismos más intensos. De hecho un sismo solo ligeramente más intenso que aquel que no ocasionó daño alguno en la estructura podría producir su colapso total.

Estructuras muy dúctiles se podrán diseñar con esfuerzos sísmicos muy bajos. Existirá por lo tanto una tendencia a que estas estructuras pasen al rango inelástico frente a sismos de muy baja intensidad. De hecho, la estructura de gran ductilidad que se indica en la Figura 7 sufre daños con el sismo de intensidad moderada y por lo tanto no cumple con los criterios de diseño antisísmico anteriormente enunciados.

De lo anteriormente dicho se concluye además que el diseño de estructuras frágiles queda controlado por el sismo de mayor intensidad a que se puede ver enfrentada la estructura mientras que el diseño de estructuras muy dúctiles quedará controlado por los sismos de intensidad moderada que deberían recibir el nombre de sismos de servicio.

Finalmente es necesario destacar que el sismo de mayor intensidad que hay que considerar depende exclusivamente del lugar en que se encuentra emplazada la estructura mientras que los demás sismos dependen además de la vida útil para la cual se esté diseñando la estructura. Para un mismo lugar, la intensidad absoluta de ellos se irá reduciendo a medida que la vida útil para la cual se está diseñando la estructura sea menor.

En la Figura 8 (Ref. 3) se muestra el nivel de daños que se podría

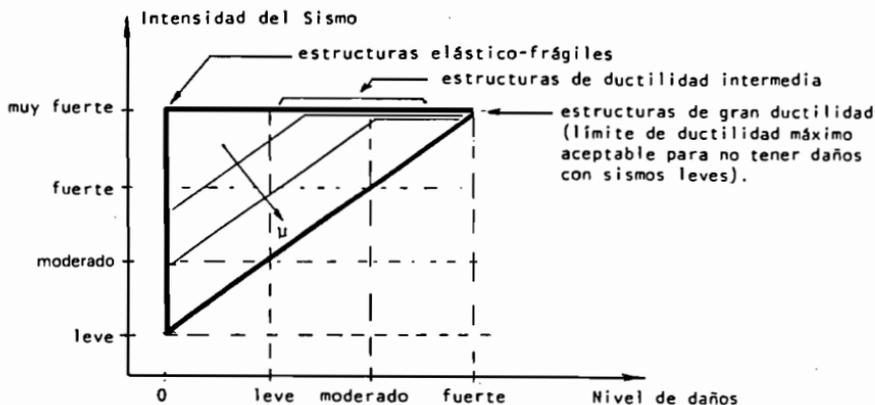


Fig. 8. Nivel de daños aceptable según la ductilidad global de la estructura y la intensidad del sismo que los provocó.

aceptar en estructuras de diferente grado de ductilidad de acuerdo a la intensidad del sismo a que puede haber quedado sometida.

4. DUCTILIDAD DE UN MATERIAL

Frente a sollicitaciones muy pequeñas casi todos los materiales responden en forma aproximadamente lineal elástica. A medida que aumentan las sollicitaciones la gran mayoría de ellos empieza a experimentar deformaciones inelásticas. Las curvas tensión-deformación ($\sigma-\epsilon$) que se pueden medir durante el proceso de deformación que experimenta el material generalmente se puede representar en buena forma mediante alguna de las tres idealizaciones que se muestran en la Figura 5.

El área que queda encerrada bajo dichas curvas representa la energía que acumula cada unidad de volumen del material considerado como consecuencia de la deformación que experimenta.

La ductilidad del material se define como la razón entre la deformación última que puede alcanzar el material sin mayor pérdida de su resistencia y la deformación que corresponde a su límite elástico. Esta definición se utiliza tanto para materiales ideales elasto-plásticos con y sin endurecimiento como para materiales de comportamiento bilineal.

5. DUCTILIDAD DE UNA SECCIÓN

La ductilidad de una sección que queda sometida a flexión se puede determinar en base a las curvas momento-curvatura ($M-\phi$) del elemento

que en general se pueden idealizar en forma semejante a las curvas tensión-deformación del material. Numéricamente la ductilidad de una sección corresponde al cociente entre la curvatura última que es capaz de alcanzar la sección sin mayor pérdida de su capacidad resistente y la curvatura que adopta la sección cuando pasa del rango elástico al rango inelástico.

En la Figura 9 se muestran las curvas $M-\phi$ de una sección I idealizada (en que el alma no existe como elemento para tomar esfuerzos axiales a pesar de ser capaz de transmitir esfuerzos de cizalle de cualquier magnitud entre las dos alas del perfil) y una sección rectangular homogénea. Se observa que la curva $M-\phi$ de la sección I idealizada es idéntica a la del material mientras que la que corresponde a la sección rectangular es algo más redondeada en la zona en que pasa del rango elástico al rango inelástico. La ductilidad de ambos casos es muy parecida.

6. DUCTILIDAD DE UN ELEMENTO ESTRUCTURAL

Con respecto al comportamiento axial del elemento se puede definir la ductilidad como el cociente entre la deformación axial última que puede alcanzar el elemento sin una pérdida muy importante de su capacidad resistente y la deformación del elemento al pasar del rango elástico al rango inelástico. Si se piensa en un elemento cilíndrico compuesto por un material ideal elasto-plástico, teóricamente la curva carga deformación del elemento resulta idéntica a la del material de que está compuesto. Sin

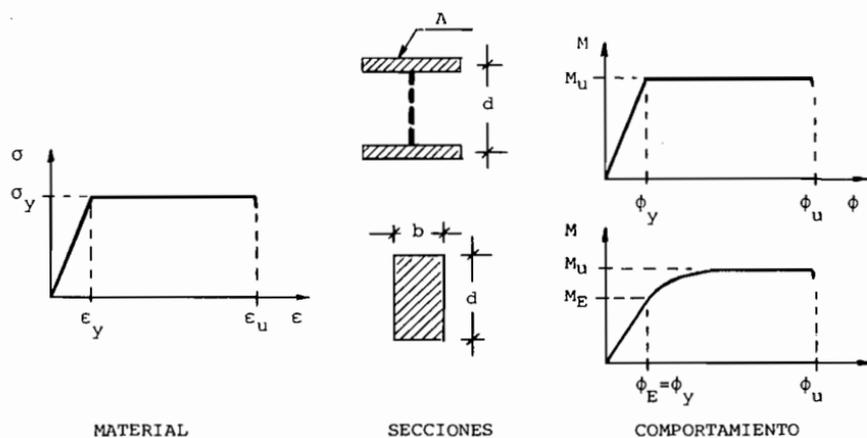


Fig. 9. Comparación entre el comportamiento a la flexión de diferentes secciones de material ideal elasto-plástico.

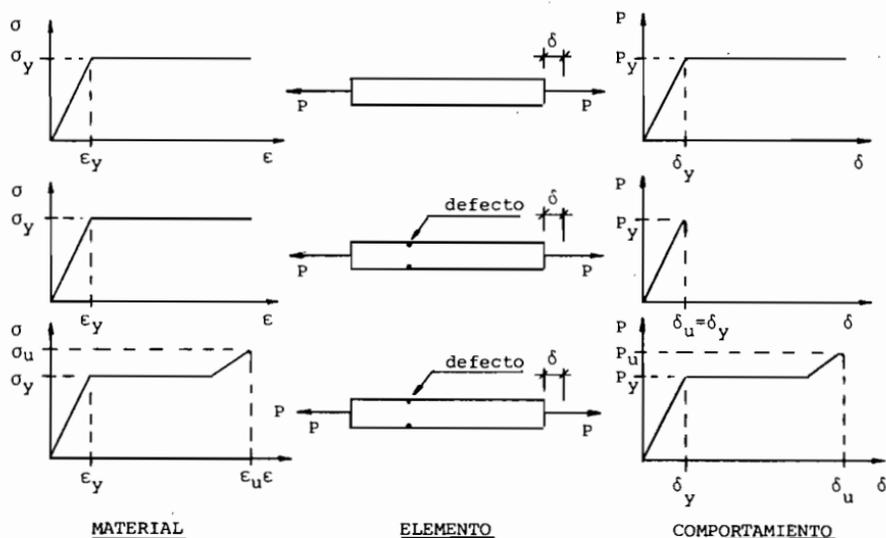


Fig. 10. Comparación entre el comportamiento frente a esfuerzos axiales de elementos compuestos por diferentes tipos de material.

embargo, si en alguna de las secciones del elemento existe algún pequeño defecto (como siempre ocurrirá en la práctica) dicha sección pasará a fluencia mientras todo el resto del elemento continuará en estado elástico. Cualquier deformación axial adicional del elemento producirá la plastificación de la sección que presenta el defecto. Como el espesor de dicha sección es igual a 0 las deformaciones unitarias (ϵ) crecerán rápidamente y alcanzarán la deformación unitaria última (ϵ_u) del material sin que el elemento experimente alargamiento alguno. Se producirá por lo tanto una falla frágil tal como se muestra en la Figura 10, por muy pequeño que sea el defecto.

Desde el punto de vista energético es interesante observar que en el caso que se acaba de analizar la falla del elemento se produce sin deformación plástica alguna a pesar de la gran capacidad de deformación plástica que tiene el material de que se compone el elemento. Esto se debe a que solamente existe una sección del elemento que plastifica y si el espesor de dicha sección es igual a 0 el volumen que plastificará será igual a 0 y por consiguiente la energía de plastificación también será igual a 0.

Si el material de que está compuesto el elemento tiene algún grado de endurecimiento o aumento de resistencia después de llegar al límite elástico (caso bilineal) la situación cambia radicalmente. En la sección que presenta el defecto el material pasará a la zona de endurecimiento. Se

elevantán algo las tensiones en dicha sección y todas las demás secciones del elemento pasarán a fluencia. El elemento volverá a exhibir una ductilidad muy similar a la del material de que está compuesto. Desde el punto de vista energético cada unidad de volumen del elemento alcanzará un nivel de plastificación muy cercano al máximo posible del material, antes de que falle el elemento.

Es fácil reconocer que se requiere de un grado de endurecimiento igual o mayor al porcentaje de deterioro que presenta la sección más débil para asegurar un comportamiento dúctil del elemento. En efecto, para tener comportamiento dúctil la zona débil del elemento debe ser capaz de transmitir una fuerza que pueda generar tensiones de fluencia en la zona más resistente del elemento.

$$\sigma_y \cdot A_1 = \sigma_2 A_2 \quad (1)$$

en que σ_y = tensión de fluencia

A_1 = sección de la zona más resistente del elemento

σ_2 = tensión en la sección más débil del elemento

A_2 = sección más débil del elemento

de (1) resulta que

$$\frac{\sigma_2 - \sigma_y}{\sigma_y} = \frac{A_1 - A_2}{A_2} \quad (2)$$

en que

$\sigma_2 - \sigma_y$ = endurecimiento requerido

y $A_1 - A_2$ = reducción de la sección en la zona más débil del elemento.

El comportamiento a la flexión del elemento es cualitativamente similar al comportamiento axial que se acaba de describir. Para ilustrarlo se considerará una columna en voladizo sometida a una carga horizontal en su extremo libre. Se considerarán dos tipos de sección: una sección rectangular llena y una sección I idealizada tal como la que se definió en 5). Si ambos elementos están compuestos por material ideal elastoplástico cada sección de cada uno de los casos considerados tiene el comportamiento que se indica en la Figura 9. En ambos elementos el momento flector crece linealmente hacia la base de la columna. En el caso de la columna que posee la sección I idealizada solamente la sección basal (teóricamente de espesor = 0) entrará en fluencia. Las fibras de dicha sección alcanzarán la deformación de rotura ϵ_μ con una deformación horizontal adicional = 0 del extremo superior de la columna. Se concluye

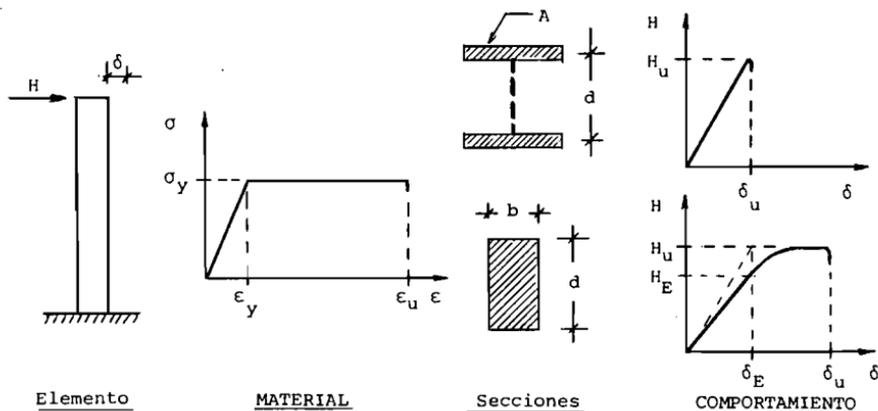


Fig. 11. Comparación entre el comportamiento a la flexión de elementos de diferentes secciones.

por lo tanto que dicha columna fallará en forma frágil tal como se muestra esquemáticamente en la Figura 11. La columna de sección rectangular, a pesar de ser un material elástico-plástico (sin endurecimiento alguno), posee un comportamiento $M-\phi$ que se puede representar aproximadamente por una curva bilineal. La sección que plastifica primero endurece y arrastra a otras secciones. Se produce por lo tanto toda una zona del elemento que plastifica y por lo tanto una cierta ductilidad del elemento. Como no plastifica todo el volumen del elemento la ductilidad del conjunto siempre será menor que la ductilidad de la sección. Mientras mayor sea el endurecimiento que pueda desarrollar la sección mayor será la ductilidad que podrá exhibir el elemento.

Si se analiza el comportamiento de una columna de hormigón arma-

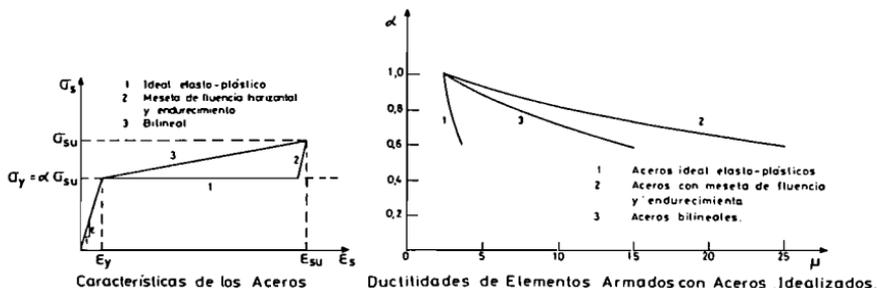


Fig. 12. Influencia de las características elásticas de las barras de refuerzo en el comportamiento dúctil de elementos de hormigón armado (Ref. 4).

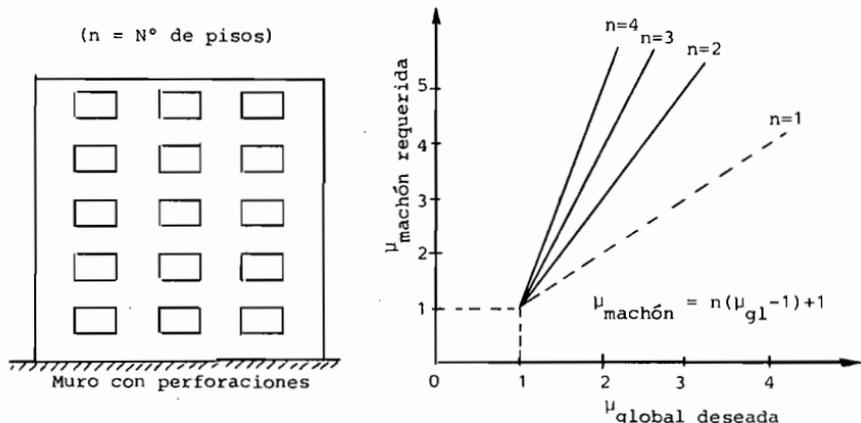


Fig. 13. Relación entre la ductilidad de un muro perforado de albañilería y la ductilidad de los machones que lo componen (Ref. 6).

do en voladizo cuya cuantía de refuerzo es inferior a la de balance se concluye (Ref. 4) que el grado de endurecimiento que puede alcanzar las armaduras de refuerzo (ya sea como comportamiento bilineal o como comportamiento perfectamente elasto-plástico con endurecimiento) tiene gran importancia en el comportamiento dúctil del elemento, tal como se muestra en el gráfico de la Figura 12. Pequeños aumentos del grado de endurecimiento de los refuerzos producen fuertes aumentos en la ductilidad del elemento.

La ductilidad del elemento será siempre menor que la ductilidad de la sección ya que no es posible que todas las secciones del elemento plastifiquen.

7. DUCTILIDAD DE LA ESTRUCTURA

Por simple analogía entre una estructura y sus elementos estructurales con respecto al comportamiento de los elementos que componen a la estructura y el comportamiento de las secciones que componen a dichos elementos se puede afirmar que el grado de endurecimiento de los elementos que componen a la estructura tiene gran influencia en la ductilidad de la estructura. Un mayor grado de endurecimiento de los elementos hará que un mayor número de elementos pase a fluencia. Mientras mayor sea el volumen de la estructura que plastifica mayor será la ductilidad global que ella será capaz de desarrollar. Debido a este mismo efecto la ductilidad global disminuye mientras más irregulares son las estructuras y los elementos que la componen.

TABLA 1
 DUCTILIDAD DE ROTACIÓN DE LA BASE DE LAS COLUMNAS
 DEL PRIMER PISO DE EDIFICIOS DE 5 PISOS
 VALORES PROMEDIO DE 8 SISMOS
 (Ref. 7)

	T_1	$\mu=2$		$\mu=4$		$\mu=10$	
		+	-	+	-	+	-
Caso 0	0,10	3,0	2,9	8,2*	9,0*	38,4*	50,7*
	0,25	2,2	2,7	4,0*	4,7*	10,7	9,0*
	0,75	2,0	1,6	2,6	3,0	4,3*	4,0*
	2,00	1,6	1,5	2,0*	2,5*	5,0*	7,6*
Caso 1	0,10	2,3	1,8	4,6*	5,3*	24,2*	29,3*
	0,25	3,9	1,6	2,6	3,6	7,0*	5,8*
	0,75	1,8	1,7	1,8	2,0	3,0	3,0
	2,00	1,4	1,5	1,3	1,8*	1,2*	1,5*
Caso 2	0,10	2,2	1,6	4,3	6,5	17,9*	33,5*
	0,25	1,8	1,6	2,5	3,2	7,0	8,0
	0,75	1,7	1,7	1,9	1,8	2,6	3,2
	2,00	1,8	1,8	1,5	1,7	3,2	5,9*

*Se generaron rótulas plásticas en los extremos de columnas en pisos superiores.

A modo de ejemplo se muestra en la Figura 13 la relación (Ref. 5 y 6) que permite determinar la ductilidad que deben poseer los machones del primer piso de un muro regular con perforaciones para que éste pueda alcanzar cierto nivel de ductilidad global preestablecido.

El análisis de algunos edificios típicos de hormigón armado de 5 pisos estructurados en base a marcos (Ref. 7) muestran la misma tendencia. En la Tabla 1 se entregan los valores de la ductilidad de rotación que en promedio (frente a 8 registros del terremoto de Chile del 3 de marzo de 1985) deben ser capaces de desarrollar las bases de las columnas del primer piso del edificio para que éste pueda sobrevivir a las sollicitaciones que corresponden a estructuras que poseen la ductilidad global que se indica en el primer renglón de la Tabla 1. Se observa que la ductilidad de los elementos (en este caso columnas del 1^{er} piso) debe ser hasta cinco veces superior a la ductilidad global que es capaz de exhibir la estructura. Las exigencias de ductilidad de las secciones de cada elemento serán aún varias veces mayores a la de los elementos (ver capítulo 6) y muy fuertemente dependientes del grado de endurecimiento que son capaces de desarrollar las secciones después de alcanzar la fluencia.

8. CONCLUSIONES

1. Los esfuerzos sísmicos de diseño se pueden reducir en la medida que se permita que la estructura incurra en el rango inelástico y ésta sea capaz de desarrollar la ductilidad correspondiente sin superar el nivel de daños aceptable. La eficiencia de ductilidad en la reducción de esfuerzos sísmicos es muy grande en estructuras flexibles, pero se reduce fuertemente a medida que las estructuras se ponen más rígidas llegando a ser nula en estructuras que son muy rígidas en relación a las frecuencias dominantes del sismo.
2. La ductilidad tiene además gran importancia en la resistencia al colapso de las estructuras. Favorece a que todos los elementos resistentes de la estructura contribuyan simultáneamente (con su resistencia máxima) a la capacidad resistente máxima de la estructura. Ayuda a evitar la falla en cadena de los diferentes elementos resistentes que componen a la estructura y cubre errores que se pueden haber cometido en la estimación de la rigidez de los elementos resistentes de la estructura y errores de construcción que apuntan en ese mismo sentido. Debido a esta última causa la ductilidad también es muy importante en estructuras rígidas.
3. La ductilidad de la estructura es siempre menor que la de los elementos que la componen. La de éstos a su vez es siempre menor que la de sus secciones. El grado de endurecimiento que puede exhibir las secciones y los elementos es fundamental en la ductilidad que puede llegar a alcanzar la estructura. Mientras mayor sea el volumen de la estructura que pasa al rango inelástico mayor será su ductilidad. Irregularidades en la estructura o en los elementos resistentes favorecen a la aparición de fallas locales y por consiguiente al comportamiento frágil de la estructura.

REFERENCIA

1. CRUZ, HIDALGO, LÜDERS, RIDDELL, RODRÍGUEZ, TRONCOSO, VAN SINT JAN, VÁSQUEZ. *Lecciones del Sismo del 3 de marzo de 1985*. Instituto Chileno del Cemento y del Hormigón, Editorial Universitaria. Santiago, Chile, 1988.
2. RIDDELL, R., P. HIDALGO, E. CRUZ. *Factor de Reducción de Respuesta para el Diseño de Estructuras Rígidas*. 5^{as} Jornadas Chilenas de Ing. Antisísmica. Santiago, Chile, agosto, 1989.
3. LÜDERS, C., O. HIDALGO. *Evaluación del Daño Sísmico en Estructuras de Albañilería*

- Armada. 5^{as} Jornadas Chilenas de Ing. Antisísmica. Santiago, Chile, agosto, 1989.
4. LÜDERS, C. *Influencia de la Meseta de Fluencia y de la Zona de Endurecimiento de los Aceros de Refuerzo en la Ductilidad de Elementos de Hormigón Armado*. Revista Apuntes de Ingeniería 12, Escuela de Ingeniería. Santiago, Chile, julio, 1983.
 5. PRIESTLEY, N. *Seismic Design Philosophy for Masonry Structures*. Cuartas Jornadas Chilenas de Sismología e Ing. Antisísmica. Viña del Mar. Chile, abril, 1986.
 6. LÜDERS, C., P. HIDALGO. *Ductilidad y Degradación de Rigidez de Muros de Albañilería Armada*. XXIV Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Puerto Alegre, Brasil, junio, 1987.
 7. CRUZ, E., S. COMINETTI. *Análisis no Lineal de edificios Bajo Solicitación Sísmica*. Publicación DIE N° 90-12, Departamento de Ingeniería Estructural, octubre, 1990.