

Análisis del factor de reducción de las fuerzas sísmicas

Roberto Aguiar Falconí¹

Trabalho recebido em 04/05/2006 e aprovado para publicação em 23/10/2006.

Resumen

Se analizan los factores que intervienen en el cálculo del factor de reducción de las fuerzas sísmicas, el mismo que permite pasar del espectro elástico al espectro de diseño inelástico y que se encuentra estipulado en las normativas sísmicas en forma muy general, para varias tipologías estructurales. Para el efecto, se presentan resultados de investigaciones desarrolladas sobre el cálculo de los factores de ductilidad, resistencia y redundancia.

Se presenta el cálculo del factor de ductilidad, sin considerar y considerando el tipo de suelo; para el primer caso se trabaja con 63 acelerogramas de sismos registrados en: Colombia, Perú, Chile y Argentina; para el segundo caso se trabaja con 28 acelerogramas sintéticos que generan los espectros del Código Ecuatoriano de la Construcción, para los cuatro perfiles de suelo.

Por otra parte, se describe la metodología utilizada para el cálculo del factor de resistencia, en 10 edificios de hormigón armado, en la que se obtiene la capacidad al corte de las estructuras, aplicando la Técnica del Pushover y el cortante de diseño, aplicando el Método del Espectro de Capacidad.

Finalmente, el factor de redundancia, se halla en función de dos índices, que son: el de resistencia y el de rótulas plásticas. Para el primer índice se trabaja con la relación momento curvatura y para el segundo índice se toma en cuenta el número de rótulas que se forman en un pórtico y el número de pórticos. Así mismo, se obtiene el factor de redundancia y de ductilidad para los 10 edificios.

Palabras claves: pushover, espectro, redundancia.

¹ Prof. Dr. Ing. Escuela Politécnica del Ejército, Centro de Investigaciones Científicas, Av El Progreso S/N, Valle de los Chillos, Ecuador. E-mail: raguier@espe.edu.ec

1. Introducción

Los mapas de zonificación sísmica, de la mayor parte de países, tienen un período de retorno de 475 años y corresponde a sismos muy intensos. Diseñar, la mayoría de estructuras, para que soporten estos sismos sin ningún daño, es muy costoso y no tiene sentido ya que un sismo intenso se registran con muy poca frecuencia, de tal forma que la probabilidad de que ocurran durante la vida útil de la estructura es muy baja. Por este motivo, se diseñan las estructuras para que trabajen en el rango no lineal, para que disipen la mayor cantidad de energía. Por lo tanto, se espera daño en las mismas pero nunca van a colapsar.

Por este motivo se define un espectro inelástico de diseño, el mismo que se obtiene dividiendo el espectro elástico, para el factor de reducción de las fuerzas sísmicas R , tema que es motivo del presente artículo, ya que en las normativas sísmicas se dan valores generales de R , para una determinada tipología estructural y puede suceder que por desconocimiento del origen de este factor, se estén diseñando las estructuras para fuerzas sísmicas muy bajas o muy altas. Para no alargar la exposición, se indica brevemente lo estipulado por tres normativas sísmicas, la de Colombia, Ecuador y Perú.

En la Norma Colombiana NSR-98 se establecen valores de R para tres casos de disipación de energía, denominados: especial, moderada y mínima; evidentemente los mayores valores se tendrán para el caso de disipación de energía especial. Para cada caso, se tienen requisitos mínimos de diseño, los más exigentes son para el primer caso.

El Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000, al igual que la Norma Técnica de Construcciones de Perú E.030, presentan valores de R para el nivel de diseño sísmico más exigente. Es interesante notar que los valores de R para una misma tipología estructural y para el mismo nivel de diseño, son diferentes en las tres normativas sísmicas, esto en parte se debe a que estos valores tienen más un respaldo cualitativo que cuantitativo, provienen más de la opinión de expertos, Daza (2003).

Si una estructura tiene irregularidades en planta y/o elevación, la norma NSR-98 y el CEC-2000 lo consideran multiplicando el factor R por ϕ_p y ϕ_e , que tienen valores menores a la unidad. En cambio la Norma de Perú E.030 multiplica R por 0.75 cuando existen irregularidades en planta o elevación.

2. Espectro inelástico

A manera de ejemplo y para profundizar un poco más en el tema, la curva superior de la figura 1, corresponde al espectro elástico y la curva inferior al espectro inelástico, del CEC-2000. Nótese que se pasa del espectro elástico al inelástico dividiendo por $R\phi_p\phi_e$. Si la estructura es regular en planta y elevación los factores ϕ_p y ϕ_e valen la unidad.

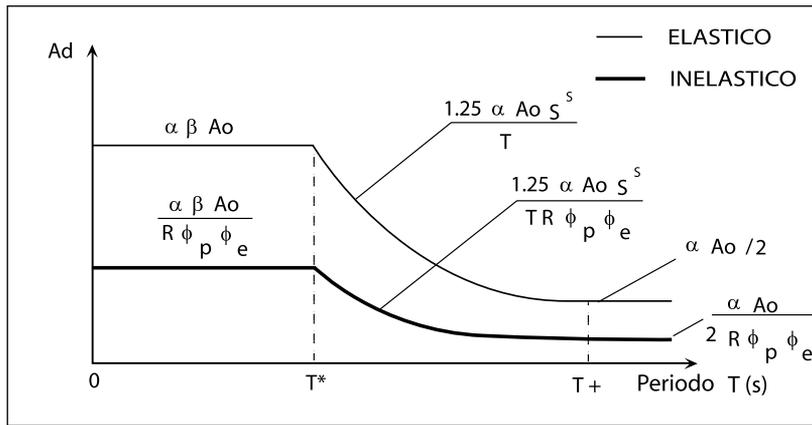


Figura 1: Espectros Elástico e Inelástico del CEC-2000

En la Figura 1, se tiene que α es el factor de importancia de la estructura, A_0 es la aceleración máxima en roca, determinada en el mapa de zonificación sísmica del Ecuador, T es el período de la estructura, β , S , T^* , T^+ se encuentran tabulados en función del perfil de suelo, ϕ_p , ϕ_e son factores que toman en cuenta las irregularidades en planta y elevación, respectivamente.

3. Componentes del factor R

En la década de los años 80 del siglo pasado, se realizaron estudios experimentales, en la Universidad de Berkeley, California, tendientes a encontrar el factor de reducción de las fuerzas sísmicas R y es así (Whittaker et al. 1987) como proponen la siguiente relación.

$$R = R_\mu R_S R_\xi \tag{1}$$

Donde R_μ es el factor de ductilidad, R_S es el factor de resistencia y R_ξ es el factor de amortiguamiento. En los estudios experimentales que realizaron en estructuras de acero encontraron que el factor R varía entre 4.5 y 6.0

Posteriormente, el ATC - 1995 cambia el factor de amortiguamiento R_ξ de la Ecuación (1) por el factor de redundancia R_R , quedando:

$$R = R_\mu R_S R_R \tag{2}$$

En Whittaker et al. (1999) se presentan varios trabajos de investigación que se han realizado a nivel mundial, para determinar los factores que intervienen en el cálculo del factor de reducción de las fuerzas sísmicas R y a continuación se presentarán el resultado de los estudios realizados en el Centro de Investigaciones Científicas, CEINCI, de la Politécnica del Ejército.

4. Factor de ductilidad

Sea Δ_i el desplazamiento máximo inelástico en un sistema de 1 gdl., y sea Δ_e el desplazamiento máximo elástico en un sistema de 1 gdl. La relación entre estas dos variables, viene dada por la siguiente ecuación.

$$\Delta_i = \frac{\mu}{R_\mu} \Delta_e \quad (3)$$

Siendo μ la ductilidad del sistema de 1 gdl., y R_μ el factor de ductilidad. De tal manera que la relación Δ_i / Δ_e representa la relación μ / R_μ . Existen varios trabajos para calcular esta relación sin tener en cuenta el tipo de suelo, como son los desarrollados por Nassar y Krawinkler (1991), Miranda (2000). De igual forma hay investigaciones en las cuales se considera el tipo de suelo, entre ellas se tienen las efectuadas por Ordaz y Pérez (1999), Ruiz-García y Miranda (2005), Chopra (2006), entre otros.

4.1 Factor R_μ sin considerar tipo de suelo

En base al análisis de 63 registros sísmicos, con aceleración máxima del suelo mayor al 10% de la aceleración de la gravedad, Aguiar y Guerrero (2006) encuentran relaciones para Δ_i / Δ_e con las cuales se obtiene R_μ . Los sismos de análisis fueron registrados en Colombia, Perú, Chile y Argentina pero no se clasificaron de acuerdo al tipo de suelo debido a que no se conoce con certeza esa información.

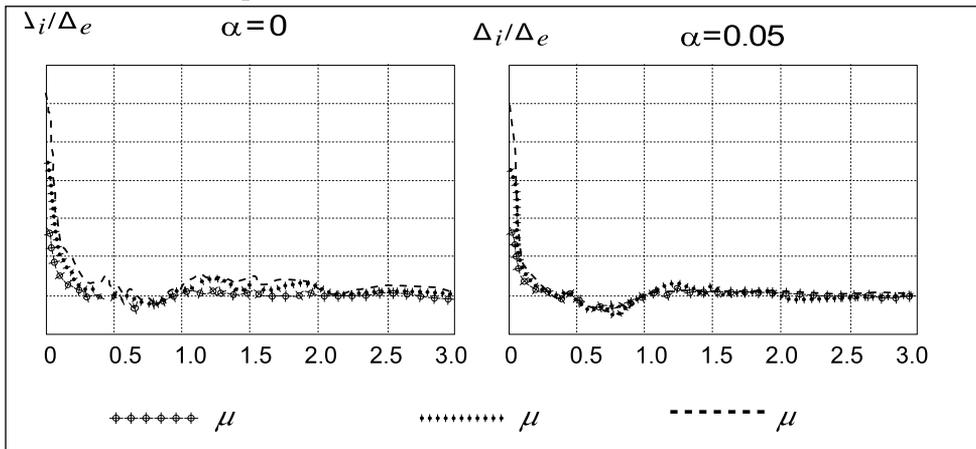


Figura 2: Relación Δ_i / Δ_e para dos modelos de plasticidad.

En la Figura 2, se presentan las curvas de valores medios encontrados en el estudio, de la relación Δ_i / Δ_e , para $\alpha = 0$ y $\alpha = 0.05$. Siendo α la relación entre la rigidez inelástica con respecto a la rigidez elástica. $\alpha = 0$, corresponde a un modelo elasto perfectamente plástico y $\alpha = 0.05$ a un modelo bilineal que contempla incremento de

resistencia en el rango inelástico. Se presentan curvas para ductilidades de 2, 3 y 4.

Para $\alpha = 0$, se aprecia en la figura 2 que para períodos mayores a 1 s., la relación Δ_i / Δ_e es ligeramente superior a la unidad. En cambio para $\alpha = 0.05$, se tiene que para períodos comprendidos entre 0.5 y 1.0 s., la relación es menor a la unidad y para períodos mayores a 1 s., la relación es prácticamente la unidad.

Para el ajuste de las curvas, se consideró la forma de la ecuación propuesta por Nassar y Krawinkler (1991) y se halló, los siguientes resultados:

$$\Delta_i / \Delta_e = \frac{\mu}{[c(\mu - 1) + 1]^{1/c}} \quad (4)$$

$$c = \frac{T^{2.07}}{1 + T^{2.07}} + \frac{0.381}{T} \quad \text{para } \alpha = 0 \quad (5)$$

$$c = \frac{T^{1.247}}{1 + T^{1.247}} + \frac{0.248}{T} \quad \text{para } \alpha = 0.05 \quad (6)$$

De la ecuación (4) se obtiene el factor de ductilidad R_μ , que es el siguiente:

$$R_\mu = [c(\mu - 1) + 1]^{1/c} \quad (7)$$

Los valores de c están indicados en las ecuaciones (5) y (6) para $\alpha = 0$ y $\alpha = 0.05$, respectivamente.

4.2 Factor R_μ considerando el tipo de suelo

Lamentablemente no se dispone, en el Ecuador, de acelerogramas de eventos sísmicos fuertes, clasificados de acuerdo al tipo de suelo. Razón por la cual, se procedió a obtener registros artificiales con las siguientes características: i) la duración de los eventos sísmicos varía entre 20 y 50 s., ii) la fase intensa del sismo es de 10 s., iii) los acelerogramas que se obtuvieron generan en forma aproximada los espectros elásticos del CEC-2000 para los perfiles de suelo S1 (suelo duro), S2 (suelo de dureza intermedia), S3 (suelo blando) y S4 (suelo muy blando) y iv) los acelerogramas encontrados generan espectros asociados a un valor $A_0 = 0.4$ g. Para cada perfil de suelo se obtuvo siete acelerogramas sintéticos, que están descritos en Aguiar (2006).

Con cada uno de los sismos artificiales, se obtuvieron espectros para un valor de amortiguamiento $\xi = 0.05$; se hallaron espectros inelásticos de desplazamiento, para ductilidades de 2, 3 y 4. Se consideró un modelo elasto perfectamente plástico. Por otra parte, se obtuvo los respectivos espectros de respuesta elástico y se halló la relación entre el máximo desplazamiento inelástico con respecto al máximo desplazamiento elástico, Δ_i / Δ_e .

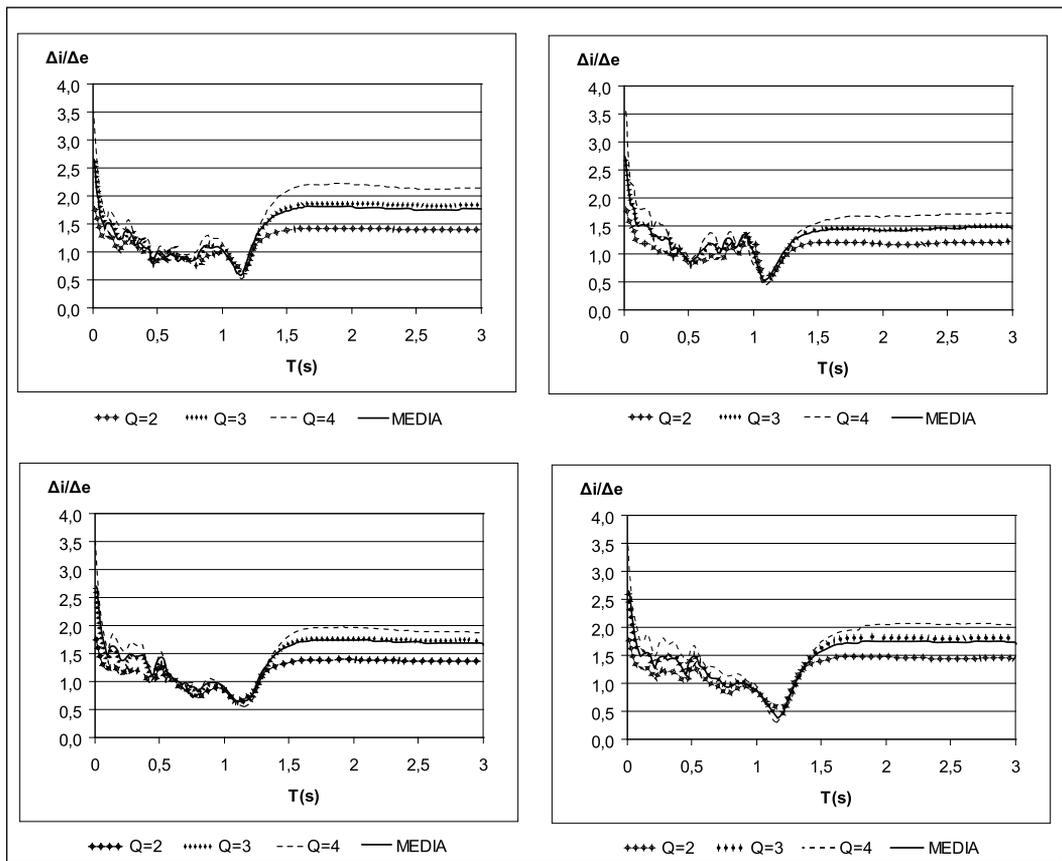


Figura 3: Relación Δ_i / Δ_e para los cuatro perfiles de suelo.

En la Figura 3, se presentan los valores medios encontrados en cada perfil de suelo y para las demandas de ductilidad de 2 a 4. La curva superior corresponde a ductilidad igual a 4 y la curva inferior a ductilidad igual a 2. Se indica también la curva media para cada perfil de suelo.

La forma de la ecuación, que se utilizó para ajustar las curvas es parecida a la propuesta por Chopra y Chintanapakde (2004) y es la que se indica a continuación.

$$\Delta_i / \Delta_e = 1 + \left[\left(\frac{a}{\mu^b} + c \right) \left(\frac{T}{T^*} \right)^d \right]^{-1} \quad (8)$$

donde: a , b , c , d son constantes que se deben determinar en base a las curvas medias indicadas en la figura 3. Por otro lado, T^* es el período característico del suelo, que en el estudio se ha considerado igual al período donde la aceleración deja de ser constante y empieza la rama descendente. Los valores de T^* se indican en la tabla 1 y son los del CEC-2000.

Los valores de las variables a , b , c , d que se obtuvieron del ajuste, se indican en la tabla 2, Aguiar y González (2006).

Tabla 1: Valores de T^* considerados en el estudio.

Perfil de Suelo	T^* (s)
S1	0.50
S2	0.52
S3	0.82
S4	2.00

Tabla 2: Valores de a, b, c, d encontrados en el estudio.

Perfil de Suelo	a	b	c	d
S1	30.00	1.34	-1.49	0.60
S2	71.80	2.00	-1.50	0.50
S3	81.04	2.00	-2.55	0.50
S4	86.00	2.10	-2.60	0.48

Con la Ecuación (3) y con la (8) se halla el factor de ductilidad R_μ , que es la siguiente:

$$R_\mu = \frac{\mu}{1 + \left[\left(\frac{a}{\mu^b} + c \right) \left(\frac{T}{T^*} \right)^d \right]^{-1}} \quad (9)$$

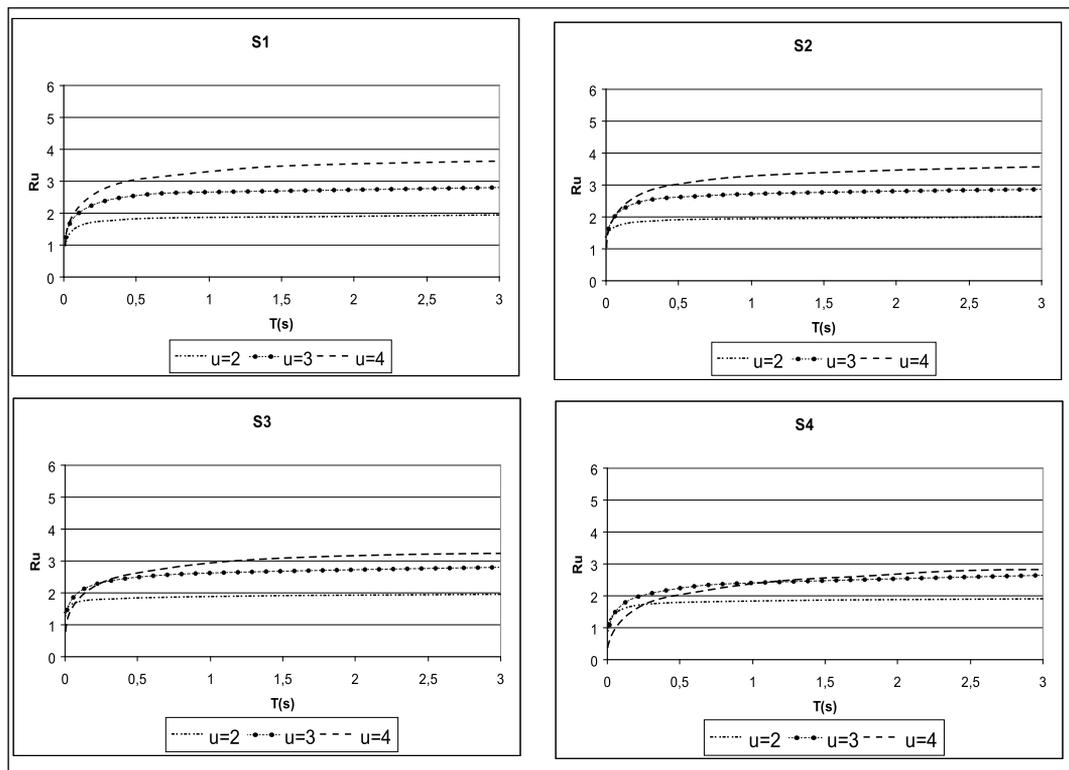


Figura 4: Valores de R_μ para los cuatro perfiles de suelo del CEC-2000.

En la Figura 4 se indican los valores del factor de ductilidad R_μ que se obtienen con las ecuaciones halladas en el estudio, para los cuatro perfiles de suelo del CEC-2000. La curva superior de cada una de las gráficas corresponde a una ductilidad de 4, la intermedia a una ductilidad de 3 y la inferior a una ductilidad de 2.

Los valores más altos de R_μ se obtienen en el perfil de suelo S1, luego vienen los del perfil de suelo S2, S3 y S4, en ese orden. De tal manera que ha medida que la capacidad resistente del suelo disminuye el valor de R_μ disminuye. Esto es muy importante, ya que no se puede pensar en tener el mismo valor de reducción de las fuerzas sísmicas R , de dos estructuras, de las mismas características, si la una esta situada sobre un perfil de suelo S1 y la otra sobre un perfil de suelo S4; la primera estructura tendrá un mayor valor de R .

5. Factor de resistencia

Se define el factor de resistencia R_s como la relación entre el cortante basal último V_U^* con relación al cortante basal de diseño V_0 . Si las estructuras son diseñadas para el sismo estipulado en las normativas sísmicas, el factor de resistencia R_s es mayor a la unidad debido a que el cortante basal último es mayor que el cortante basal de diseño V_0 ; debido a que en el diseño se realiza una serie de controles, como por ejemplo el control de las conexión viga columna; controles que conducen a un incremento de las dimensiones de los elementos estructurales y la armadura de los mismos.

$$R_s = \frac{V_U^*}{V_0} \quad (10)$$

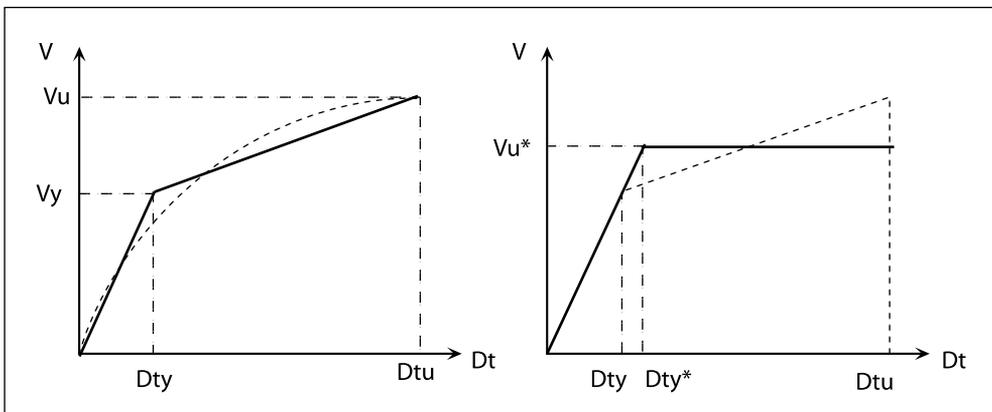


Figura 5 Descripción del modelo utilizado para calcular V_U^* .

En la figura 5, se indica la forma como se obtuvo el cortante basal último V_U^* ; a la izquierda con líneas entrecortadas se tiene la curva de capacidad resistente, que rela-

ción el cortante basal V con el desplazamiento lateral máximo en el tope del edificio D_t la misma que se halla aplicando la técnica del pushover. A partir de esta curva se obtiene un modelo bilineal, que está con línea continua en el gráfico de la izquierda. En el modelo bilineal el punto de fluencia, que determina el límite del rango elástico, tiene las siguientes coordenadas: D_{ty} que es el desplazamiento a nivel de fluencia y V_y que es el cortante a nivel de fluencia. El punto de fluencia se halla aplicando el criterio de iguales áreas y teniendo en cuenta que la rigidez elástica pase por el punto 0.6 de V_y (Aguiar 2003).

El fallo de la estructura se consideró cuando el desplazamiento lateral máximo en el tope del edificio es aproximadamente igual al 2% de la altura global del edificio y está definido por las coordenadas D_{tu} y V_u . Ahora bien, en el gráfico de la derecha de la Figura 6, se aprecia con líneas entrecortadas el modelo bilineal y con línea continua el modelo elasto perfectamente plástico, el mismo que tiene un cortante V_U^* que es igual a la suma del cortante de fluencia y del cortante último dividido para dos. El nuevo límite de fluencia, tiene las siguientes coordenadas.

$$V_U^* = \frac{V_y + V_u}{2} \quad D_{ty}^* = \frac{V_U^*}{V_y} D_{ty} \quad (11)$$

El cortante de diseño V_0 se obtuvo aplicando el Método del Espectro de Capacidad, cuya forma de cálculo se ilustra en la Figura 6. Para el efecto, el espectro de diseño sísmico que relaciona, período con aceleraciones S_a se pasa al espectro de demanda que relaciona desplazamiento espectral S_d con la aceleración espectral S_a . De igual manera la curva de capacidad sísmica de la estructura que relaciona el desplazamiento lateral máximo con el cortante basal, se pasa al espectro de capacidad que relaciona S_d con S_a .

El espectro de capacidad se halló en tres dimensiones, procediendo de la siguiente manera: en primer lugar se encontró la curva de capacidad sísmica resistente de cada uno de los pórticos, en dos dimensiones, de esta curva se determinó la rigidez elástica y plástica de un modelo bilineal. Luego el modelo numérico de cálculo, para hallar la curva de capacidad sísmica en tres dimensiones, considera tres grados de libertad en total, dos desplazamientos horizontales en las direcciones principales y un giro de torsión; en este modelo cada uno de los pórticos se considera un elemento.

Con la curva de capacidad sísmica en tres dimensiones se halla el espectro de capacidad y al tener el espectro de demanda en el mismo formato se aplica el Método del Espectro de Capacidad, ATC-40 (1996), Chopra y Goel (1999, 2000) y se halla el punto de desempeño, se halla el desplazamiento lateral máximo d_t , que está indicado en la Figura 6. Los espectros inelásticos se obtienen dividiendo el espectro elástico para la ductilidad. Todo el cálculo está sistematizado en el programa de ordenador denominado CEINCI3 (Aguiar 2003).

Se destaca que el concepto de espectro está relacionado a un sistema de un grado de libertad, por lo tanto el desplazamiento d_t que se encuentra con el Método del Espectro de Capacidad, es para un grado de libertad. Para hallar el desplazamiento lateral máximo de la estructura en el tope del edificio D_t se debe utilizar la siguiente ecuación.

$$D_t = \beta_1 d_t \quad (12)$$

donde β_1 es el factor de amplificación que permite encontrar el desplazamiento lateral máximo en el tope del edificio a partir del desplazamiento lateral máximo en un sistema de un grado de libertad. La ecuación que se utilizó para calcular β_1 fue la propuesta por Algan (1982) y está en función del número de pisos N .

$$\beta_1 = \frac{3 N}{2 N + 1} \quad (13)$$

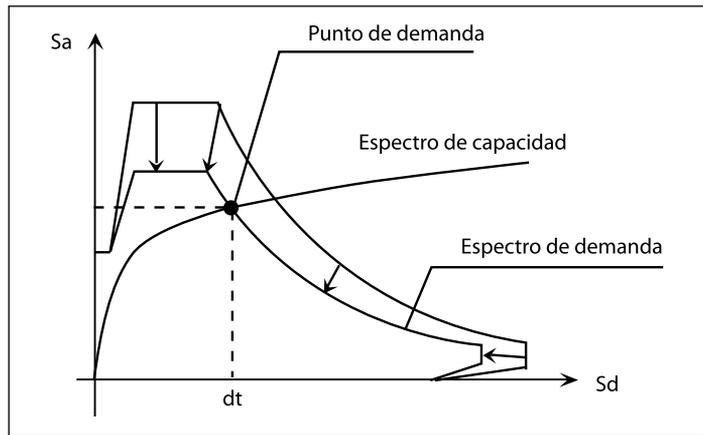


Figura 6 Descripción del Método del Espectro de capacidad.

El modelo numérico de cálculo del programa CEINCI3 es válido para estructuras simétricas en las cuales se cumple que el desplazamiento lateral máximo de la estructura que se ha denominado D_t es igual al desplazamiento lateral máximo de cada uno de los pórticos, que se encuentran en la dirección de análisis sísmico.

Una vez que se tiene el desplazamiento lateral máximo de cada marco, se ingresa a la curva de capacidad sísmica del pórtico y se determina en primer lugar el cortante de diseño V_0 y en segundo lugar el factor de resistencia R_s utilizando la Ecuación (10). Nótese que se trabaja con V_U^* , si se habría trabajado con V_U en lugar de V_U^* los factores de resistencia R_s serían más altos; en todos los casos el valor sería mayor o igual a la unidad y el valor medio es 1.07

Como aplicación de la metodología presentada, se halló el factor de resistencia de 10 edificios de hormigón armado, de 2 a 6 pisos que se hallan ubicados en una zona cuya peligrosidad sísmica está determinada por $A_0 = 0.25 g.$, son estructuras compuestas por vigas y columnas, sin muros de corte. La mayor parte de estos edificios se hallan sobre un perfil de suelo S2 (semiduro) pero también existen edificios que se encuentran en un perfil S3 (blando) y S4 (muy blando).

En la tabla 3 se indican los resultados obtenidos del punto de demanda y el factor de resistencia. De la tercera a la quinta columna se presentan los cortantes basales, V_y , V_u y V_u^* con la nomenclatura indicada en la figura 5. En la sexta columna se muestra el valor del desplazamiento de fluencia del modelo elasto perfectamente plástico.

Tabla 3: Resumen del cálculo del factor de Resistencia

Edif.	Port.	V_y (T.)	V_u (T.)	V_u^* (T.)	D_{ty}^* (m.)	d_t (m.)	β_1	D_t (m)	V_0 (T.)	R_s
1	1	104.89	118.00	111.45	0.032	0.113	1.20	0.136	117.00	0.953
1	B	38.67	42.00	40.34	0.023	0.095	1.20	0.114	40.00	1.008
2	3	14.91	18.00	16.46	0.014	0.115	1.364	0.157	17.00	0.968
2	B	34.65	38.00	36.32	0.033	0.094	1.364	0.129	36.00	1.009
3	2	63.76	70.00	66.88	0.039	0.087	1.385	0.120	65.00	1.029
3	B	58.63	70.00	64.31	0.031	0.087	1.385	0.120	62.00	1.037
4	2	25.92	55.00	40.46	0.079	0.256	1.364	0.349	55.00	0.736
4	B	40.73	54.00	47.37	0.110	0.236	1.364	0.320	50.00	0.947
5	2	69.50	80.00	74.75	0.085	0.106	1.333	0.141	55.00	1.359
5	C	22.74	24.90	23.82	0.051	0.135	1.333	0.180	24.00	0.993
6	2	8.14	12.7	10.42	0.094	0.180	1.364	0.245	11.80	0.883
6	B	7.87	9.30	8.58	0.084	0.187	1.364	0.255	8.70	0.986
7	2	11.27	14.3	12.79	0.030	0.125	1.333	0.166	13.00	1.585
7	B	11.59	16.5	14.05	0.046	0.115	1.333	0.152	15.00	1.030
8	3	5.26	5.40	5.33	0.034	0.109	1.286	0.140	5.33	1.000
8	B	9.11	13.00	11.05	0.036	0.156	1.286	0.201	12.90	0.857
9	2	4.21	6.00	5.11	0.048	0.182	1.286	0.234	5.50	0.929
9	B	2.82	4.50	3.66	0.042	0.182	1.286	0.234	4.50	0.813
10	3	10.04	10.40	10.22	0.094	0.156	1.333	0.208	10.05	1.017
10	B	13.69	17.50	15.34	0.065	0.156	1.333	0.208	16.00	0.959

De las columnas siete a la nueve se presentan los valores del desplazamiento lateral máximo en un grado de libertad, el factor de paso para un sistema de múltiples grados de libertad y el desplazamiento lateral máximo en el tope del edificio D_t . Con este último valor se ingresó a la curva de capacidad sísmica resistente, en dos dimensiones, y se halló el cortante basal de diseño V_0 .

Finalmente en la última columna de la Tabla 3, se presenta el factor de resistencia que se obtiene con la Ecuación (10) dividiendo la quinta columna para la décima columna. Se aprecia que la mayor parte de valores oscila alrededor de la unidad.

Se destaca que las estructuras tienen ductilidad pero no tienen resistencia ya que a duras penas soportan el sismo estipulado en el Código Ecuatoriano de la Construcción, CEC-2000. Si se habría dividido V_u para V_0 el valor de R_s sería en todos los casos mayor a la unidad pero se trabajó con V_u^* para tener un modelo elasto perfectamente plástico.

6. Factor de redundancia

Cuando la estructura ingresa al rango no lineal es importante que la mayor parte de elementos soporte las fuerzas sísmicas, para que así se de una redistribución de esfuerzos en la estructura. El factor de redundancia, es el parámetro que permite calificar la redistribución de esfuerzos en la estructura cuando esta incursiona en el rango no lineal (Guendelman 2000).

El factor de redundancia R_R depende de que resistencia adicional tengan los elementos cuando han llegado a la fluencia. En efecto, habrá elementos que han llegado a la fluencia y otros no pero si los primeros tienen todavía una capacidad de soportar más fuerzas sísmicas o tienen una gran ductilidad, esto obligará a que los elementos que están menos solicitados absorban mayores cargas y deformaciones, de esta forma se disipará la mayor cantidad de energía sísmica.

El factor de redundancia también es función del número de elementos que tenga el pórtico y del número de pórticos que tenga la estructura, ya que a mayor cantidad de elementos se tendrá una mayor cantidad de rótulas plásticas. Pero no es función únicamente del número de rótulas plásticas el factor de redundancia si no también de que tanto permite esa rótula plástica incursionar en el rango no lineal, de tal manera que R_R se puede calcular en base al número de rótulas plásticas y a la capacidad de incursionar en el rango inelástico los elementos.

Hay varios modelos de cálculo del factor de redundancia R_R , uno de ellos es el propuesto por Tsopelas y Husain (2004), que depende de dos índices, el uno es un índice de redundancia por resistencia, r_s y el otro es un índice de redundancia por formación de rótulas plásticas, r_v , definido de la siguiente manera:

$$R_R = r_s \left(\frac{1 - 0.12 r_v}{0.88} \right) \quad (14)$$

Los coeficientes 0.12 y 0.88 consideran aspectos estadísticos. El índice de redundancia por resistencia r_s relaciona la resistencia media última, $\overline{S_U}$ con respecto a la resistencia media de fluencia $\overline{S_Y}$.

$$r_s = \frac{\overline{S_U}}{\overline{S_Y}} \quad (15)$$

En este trabajo se obtuvo el índice r_s relacionando la capacidad de momento último M_U con respecto al momento de fluencia M_Y . Para el efecto se obtuvo la relación momento curvatura en cada uno de los elementos de la estructura y en cada elemento se halló esta relación en el nudo inicial, en el centro de luz y en el nudo final; se obtuvo la relación momento curvatura para una forma de flexión cóncava y para una forma de flexión convexa.

De tal manera que en cada elemento se encontraron 6 valores de la relación de M_U para M_Y . De estos 6 valores se encontró un valor promedio para el elemento. Finalmente el factor r_s se halló hallando el promedio de los valores medios de cada elemento de la estructura.

Para el cálculo de la relación momento curvatura se empleó un modelo trilineal para definir el comportamiento del acero y el modelo de Park et al (1982) para el comportamiento del hormigón confinado. Todo esto utilizando el programa CEINCI 3, Aguiar (2003).

Tabla 4: Resumen del cálculo del factor de redundancia R_R

Edificio	Pórtico	Sentido	r_S	n	m	r_V	R_R
1	1	X	1.352	9	3	0.240	1.492
1	B	Y	1.600	7	7	0.150	1.785
2	3	X	1.416	15	4	0.150	1.580
2	B	Y	1.416	20	3	0.160	1.578
3	2	X	1.414	18	3	0.170	1.574
3	B	Y	1.379	21	3	0.150	1.539
4	2	X	1.290	25	3	0.141	1.441
4	B	Y	1.284	17	4	0.140	1.435
5	2	X	1.260	30	4	0.105	1.413
5	C	Y	1.390	29	5	0.090	1.562
6	2	X	1.180	16	3	0.180	1.312
6	B	Y	1.240	12	4	0.170	1.380
7	2	X	1.419	16	4	0.144	1.585
7	B	Y	1.380	16	4	0.143	1.541
8	3	X	1.520	10	5	0.160	1.694
8	B	Y	1.426	14	3	0.190	1.583
9	2	X	1.523	12	3	0.204	1.688
9	B	Y	1.523	10	3	0.224	1.684
10	3	X	1.450	32	6	0.079	1.632
10	B	Y	1.250	38	4	0.094	1.404

Para el cálculo del índice de redundancia por la formación de rótulas plásticas r_V se obtuvo la curva de capacidad sísmica resistente empleando la técnica del pushover, utilizando el programa CEINCI 3. La ecuación de cálculo es la siguiente:

$$r_V = \sqrt{\frac{1}{n} \frac{1}{m-1}} \quad (16)$$

donde n es el número de rótulas plásticas que se forman en un pórtico y m es el número de pórticos que existen en la dirección de análisis.

Se obtuvo el factor de redundancia de las 10 estructuras de hormigón armado de 2 a 6 pisos, compuestas por vigas y columnas, que fueron analizadas en el apartado anterior y que están descritas en Aguiar et al (2006) empleando el modelo numérico de Tsopelas y Husain (2004) con la variante de cálculo del índice r_S ya indicado. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 4.

En la Tabla 4 se aprecia, que la mayoría de edificios analizados en una dirección tienen 3 ejes de columnas $m = 3$ y el ATC-34 (1995) a estas estructuras les asigna el

valor $R_R = 0.86$, para las estructuras que tienen 4 ejes de columnas el ATC-34 le da un valor de 1. De tal manera, que los valores de R_R obtenidos en el estudio y que se indican en la última columna de la Tabla 4 son altos con relación a los propuestos por el ATC-34, que penaliza a las estructuras que tienen menos de 4 ejes de columnas.

Tabla 5: Resumen del cálculo del factor R

Edif.	Port.	Perfil de Suelo	Período (s)	R_μ	R_S	R_S	$R_\mu R_S R_R$
1	1	S2	0.26	2.70	0.953	1.492	3.839
1	B	S2	0.47	2.95	1.008	1.785	5.308
2	3	S2	0.63	3.07	0.968	1.580	4.695
2	B	S2	0.45	2.94	1.009	1.578	4.681
3	2	S2	0.51	2.98	1.029	1.574	4.827
3	B	S2	0.38	2.87	1.037	1.539	4.580
4	2	S4	0.52	2.09	0.736	1.441	2.217
4	B	S4	0.89	2.34	0.947	1.435	3.180
5	2	S2	0.36	2.85	1.352	1.413	5.445
5	C	S2	0.38	2.86	0.993	1.562	4.436
6	2	S2	0.69	3.10	0.883	1.312	3.591
6	B	S2	0.57	3.03	0.986	1.380	4.123
7	2	S2	0.24	2.69	1.585	1.585	6.758
7	B	S2	0.38	2.87	1.030	1.541	4.555
8	3	S3	0.46	2.62	1.000	1.694	4.438
8	B	S3	0.42	2.58	0.857	1.583	3.500
9	2	S2	0.50	2.98	0.929	1.688	4.673
9	B	S2	0.52	2.99	0.813	1.684	4.094
10	3	S2	0.37	2.86	1.017	1.632	4.747
10	B	S2	0.39	2.88	0.959	1.404	3.878

7. Resultados del factor de reducción

Cuatro de los edificios analizados fueron construidos en el período 1992-1999 y los 6 restantes en el presente siglo, de tal manera que son construcciones modernas pero son bastante flexibles y bastante regulares en planta y elevación.

En la Tabla 5, se indica el perfil de suelo en el cual se encuentran, de acuerdo a la clasificación del CEC-2000. También se indica el período fundamental elástico, de las estructuras en cada dirección de análisis, con estos dos datos se halló el factor de ductilidad R_μ aplicando la Ecuación (9) con los valores de la Tabla 2, encontrados en el estudio. Se obtuvo R_μ para una demanda de ductilidad de 4, ya que al aplicar el Método del Espectro de Capacidad, se encontró que los valores de ductilidad están alrededor del valor indicado.

En la última columna de la Tabla 5 se indican los valores del factor de reducción de las fuerzas sísmicas, encontradas en el estudio, los mismos que varían entre 2.2 y 6.7. Para este tipo de estructuras el CEC-2000 establece un valor de $R = 10$, que se considera bastante alto.

8. Conclusiones

Se ha analizado los factores de: ductilidad, resistencia y redundancia, con los cuales se calcula el factor de reducción de las fuerzas sísmicas, que se utiliza para pasar del espectro elástico al espectro de diseño inelástico.

Se han obtenido ecuaciones para definir el factor de ductilidad de dos maneras. La primera sin clasificar, de acuerdo al tipo de suelo, los 63 registros utilizados en el estudio y la segunda en base a 28 acelerogramas sintéticos, clasificados de acuerdo a los cuatro perfiles de suelo del CEC-2000. Se encontró el factor de ductilidad para cada perfil de suelo y se halló que los mayores valores se tienen en el perfil de suelo duro y van decayendo conforme la resistencia del suelo es menor.

Se ha propuesto el cálculo del factor de resistencia, a partir de la curva de capacidad sísmica resistente, que relaciona el cortante basal con el desplazamiento lateral máximo en el tope del edificio, encontrando primero una relación bilineal y luego un modelo elasto perfectamente plástico en el que se determina la capacidad máxima de cortante basal de la estructura. Para hallar el cortante basal de diseño se recomienda que se lo obtenga empleando el Método del Espectro de Capacidad.

Para la determinación del factor de redundancia se ha seguido la metodología propuesta por Tsopelas y Husain pero con una variante en el cálculo del índice de redundancia debido a que se considera más apropiado calcularlo a partir de la relación entre el momento último con respecto al momento de fluencia en cada uno de los elementos.

Como aplicación práctica se ha encontrado el factor de reducción de las fuerzas sísmicas en 10 edificios de hormigón armado de 2 a 6 pisos situados en una zona sísmica caracterizados por una aceleración máxima del suelo del 25% de la aceleración de la gravedad, encontrando en estos edificios que el factor de reducción varía entre 2.2 y 6.7. En el estudio se encontró que la mayor parte de estructuras analizadas tienen ductilidad pero no tienen resistencia.

El Código Ecuatoriano de la Construcción CEC-2000, para las estructuras analizadas, estipula un factor de reducción de las fuerzas sísmicas de 10 valor que se lo considera muy alto por lo que se está subestimando la determinación de las fuerzas estáticas equivalentes debido a sismo. Este es un tema que debe seguir investigándose pero a la luz de los resultados encontrados se puede indicar que el factor de reducción de las fuerzas sísmicas para estructuras conformadas únicamente por vigas y columnas no puede ser más de 8, como lo estipulan los códigos de países vecinos.

Referencias

- Aguiar, R. (2003). *Análisis Sísmico por Desempeño*, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 342 p, Quito, Ecuador.
- Aguiar, R. and Guerrero, P. (2006). Relación entre el desplazamiento máximo inelástico con respecto al desplazamiento máximo elástico para evaluar la vulnerabilidad sísmica. *XXXII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural*. Universidad Estatal de Campinas, 10 p, Brasil.
- Aguiar, R. and González, A. (2006). Influencia del suelo en el cálculo de la relación entre el desplazamiento máximo inelástico a elástico. *II Congreso de Ingeniería Estructural y Puentes*, 10 p, Lima.
- Aguiar, R.; Barreiro, F. and López, P. (2006). Factor de redundancia y de resistencia en edificios de hormigón armado. *XVIII Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural*. Escuela Politécnica del Ejército, 11 p., Quito.
- Algan, B. (1982). *Drift and damage considerations in earthquake resistant design of reinforced concrete buildings*. Ph.D thesis, University of Illinois, Urbana, Illinois.
- Applied Technology Council (ATC) (1995). *Structural response modification factors*. Rep. N. ATC-19, Redwood City, California.
- Applied Technology Council (ATC) (1995). *A critical review of current approaches to earthquake-resistant design*. Rep, N. ATC-34, Redwood City, California.
- Applied Technology Council (ATC) (1996). *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*. Rep, N. ATC-40, Redwood City, California.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (1998). *Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente*. NSR-98. Tomo 1, Bogota.
- Chopra, A. and Goel, R. (1999). *Capacity-demand-diagram methods for estimating deformation of inelastic structures: SDF systems*. Pacific Earthquake Engineering Research Center, Rep. No PEER-1999/02, University of California, Berkeley, California.
- Chopra, A. and Goel, R. (2000). Evaluation of NSP to estimate seismic deformation: SDF systems. *Journal of Structural Engineering ASCE*, 126 (4), 482-490.
- Chopra, A. (2005). Estimating seismic demands for performance-based engineering of buildings. *Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Antisísmica. IX Jornadas*, 34 p, Concepción, Chile.
- Chopra, A. and Chintanapakdee, C. (2004). Inelastic deformation ratios for design and evaluation of structures: single-degree-of-freedom bilinear systems. *Journal of Structural Engineering, ASCE*, 130 (9), 1309-1319.
- Código Ecuatoriano de la Construcción (2000), *Capítulo 1: Peligro sísmico, espectros de diseño y requisitos de cálculo para diseño sismo resistente*. XIII Jornadas Nacionales de Ingeniería Estructural, Pontificia Universidad Católica del Ecuador, 325-350, Quito.
- Daza, L. (2003). Nuevo enfoque para determinar el factor de modificación de respuesta. *Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 3 (1), 33-48, Puerto Rico.
- Guendelman, T. (2000). Perfil Bio-Sísmico de edificios: un instrumento de calificación sísmica. *Bit. La Revista Técnica de la Construcción*, 17. Internet: www.revistabit.cl
- Miranda, E. (2000), Inelastic displacement ratios for structures on firm sites, *Journal of Structural Engineering*, 126 (10), 1150-1159.
- Nassar, A. and Krawinkler, H. (1991). *Seismic demands for SDOF and MDOF systems*. John

Blume Earthquake Engineering. Ctr. Dept. of Civil Engineering, Rep. 95, Stanford University, Stanford, California.

Ordaz, M. and Pérez, L. (1999). *Estimación de espectros de respuesta elastoplástica*. Centro Nacional de Prevención de desastres, CENAPRED, Cuaderno de Investigación 48, 29 p, México.

Park, R.; Priestley, M. and Gill, W. (1982). Ductility of square confined concrete columns. *Journal of Structural Division ASCE*, 108 (4), 929-950.

Ruiz-García, J. and Miranda, E. (2003). Inelastic displacement ratios for evaluation of existing structures. *Earthquake Engineering Structural Dynamic*, 31, 1237-1258.

Servicio Nacional de Normalización, Capacitación e Investigación para la Industria de la Construcción (2003) *Reglamento Nacional de Construcciones. Norma Técnica de Edificación. Diseño Sismorresistente*. E.030. 38 p., Lima.

Tsopelas, P. and Husain, M. (2004). Measures of Structural Redundancy in Reinforced Concrete Buildings. II: Redundancy Response Modification Factor R_R . *Journal of Structural Engineering*. ASCE, 130 (11), 1659-1666.

Whittaker, A.; Uang, C. and Bertero, V. (1987). *Earthquake simulation tests and associated studies of a 0.3-scale model of a six story eccentrically braced steel structure*. University of California, Berkeley, Rep. N. UCB/EERC-87/02, California.

Whittaker, A.; Hart, G. and Rojahn, C. (1999). Seismic response modification factors. *Journal of Structural Engineering*, 125 (4), 438-444.

Reduction factor analysis for seismic forces

Abstract

The elements that take part in the calculation of the reduction factor for seismic forces are analyzed; it allows to switch from an elastic to a nonelastic design spectrum, which is specified in general form in seismic codes, for various structure types. For such purpose, research results on the calculation of ductility, strength and redundancy factors are presented.

The calculation of the ductility factor is described, without considering and considering the type of ground. In the first case, 63 accelerograms are used; they were registered in: Colombia, Peru, Chile and Argentina. In the second case, 28 synthetic accelerograms are employed; they generate the spectra for the Ecuadorian Code for Construction, for four ground profiles.

On the other hand, the methodology employed for the calculation of the strength factor is described; it was employed in 10 reinforced concrete buildings, where the shear capacity of structures is obtained, applying the Pushover Technique and the design shear, and using the Capacity Spectrum Method.

Finally, the redundancy factor is based on two indices that are: the strength index and the plastic hinge index. The first index is based on the moment-curvature relationship, and the second index takes into account the number of hinges in every frame, and the number of frames.

Key words: ?????