

# Evaluación del coeficiente de disipación de energía, $R$ , para algunos tipos de estructuras de acero

## Evaluating response modification factor ( $R$ ) for some types of steel structure

Doralba Valencia Restrepo<sup>1</sup> y Gabriel Valencia Clement<sup>2</sup>

### RESUMEN

En el presente artículo se cuestiona la validez del uso del coeficiente de disipación de energía tabulado en las Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismorresistente, NSR-98, en la evaluación de las sollicitaciones generadas por la acción del sismo de diseño en las estructuras de acero y las inconsistencias que se presentan al dimensionar la estructura para que cumpla derivas del 1%. Con tal fin se diseñan 45 pórticos del sistema de resistencia sísmica de cinco edificios: 15 pórticos resistentes a momento (PRM), 15 pórticos arriostrados concéntricamente (PAC) y 15 pórticos arriostrados excéntricamente (PAE). El diseño se realiza de acuerdo con los requisitos de las NSR-98 en cuanto a sollicitaciones (evaluación de cargas y combinaciones) y rigidez (1% de deriva) y a los requisitos de las provisiones sísmicas de AISC-2005 en cuanto a resistencia. Se evalúa el coeficiente de disipación de energía de los 45 pórticos para diferentes niveles de desempeño, por medio de plastificación progresiva modal, encontrándose que tal coeficiente no es constante para ninguno de los tres sistemas estructurales estudiados (PRM, PAC y PAE), tal como lo sugieren las NSR-98, y además los valores del coeficiente de disipación de energía hallados en la presente investigación son mucho menores a los tabulados en dichas normas, que rigen la práctica común del diseño estructural, provocando graves errores en la evaluación de las sollicitaciones de diseño, tanto de la estructura como de los elementos de soporte (placas de base, fundaciones, pantallas) y estructuras adosadas a los pórticos del sistema de resistencia sísmico.

**Palabras clave:** coeficiente de disipación de energía, ductilidad, jerarquía de plastificación, respuesta elástica, respuesta inelástica, mecanismo de plastificación.

### ABSTRACT

Response modification factor ( $R$ ), tabulated in the Colombian Design Code as NSR-98, is used in this paper for evaluating internal member forces produced by design earthquake action on steel structures and the inconsistencies present when designing structures when 1% drift limits must be complied with. The article presents the design of 45 frames corresponding to the seismic resistance system of 5 buildings: 15 special moment frames (SMF), 15 special concentrically-braced frames (CBF) and 15 eccentrically-braced frames (EBF). External loads and their combination were used in estimating internal loads and rigidity demands (1% drift) were evaluated in line with NSR-98 requirements. Member strength requirements were evaluated by using the AISC-2005 seismic provisions for steel structured buildings. Modal pushover analysis was used for evaluating the response modification factor for the 45 given frames at different structural performance levels. It was found that this factor was not constant for any of the three structural systems (SMF, CBF and EBF) suggested by NSR-98 and that the values of the response modification factor found in the present investigation were smaller than those tabulated in this design code governing everyday structural design. This would lead to significant errors being made in evaluating design forces, not only in the structures but in the support elements (base-plates, foundations, shear walls) and any structures attached to buildings constructed in line with the seismic resistance system.

**Keywords:** response modification factor, ductility, the strong-column weak-beam concept, elastic response, inelastic response, plastic mechanism.

Recibido: diciembre 10 de 2007

Aceptado: febrero 28 de 2008

### Introducción

Diseñar las estructuras para que respondan en el rango elástico bajo la acción del sismo de diseño, resulta ser muy costo-

so, ineficiente, y hasta inconveniente; por eso los diferentes códigos de diseño, incluyendo las NSR-98 (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 1998) permiten diseñar las edificaciones para una carga sísmica menor a la que actuaría

<sup>1</sup> M.Sc., en estructuras, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. dvalenciar@unal.edu.co

<sup>2</sup> Ingeniero civil. Especialización, en estructuras de acero. Profesor titular, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. Gerente de TECMO S.A. gvalenciac@unal.edu.co

sobre el edificio si la respuesta fuese totalmente elástica, cuando se presenta el sismo de diseño, teniendo en cuenta que los sismos son los que causan mayores efectos adversos a la estructura pero que no son eventos determinísticos dentro de la vida útil de la misma; así mismo, si la estructura resiste, en un rango de respuesta inelástica, unas sollicitaciones menores que las causadas por el sismo de diseño, puede deformarse inelásticamente, sin que ello implique un colapso.

Los códigos introducen entonces el coeficiente de disipación de energía,  $R$ , de tal manera que al dividir la carga sísmica elástica ( $F$ ) por él, se obtiene la fuerza sísmica reducida de diseño ( $E$ ), que se usa en todas las combinaciones para diseño y que permite en principio diseñar estructuras más económicas. Este coeficiente depende de la ductilidad del sistema estructural y de la demanda sísmica a la que se espera que estará sometida la estructura. Las NSR-98 definen ese coeficiente en función de: el sistema de resistencia sísmica, el sistema de resistencia para cargas verticales, el grado de irregularidad de la edificación, la zona de amenaza sísmica y las conexiones.

Adicionalmente a los requisitos de resistencia que involucran el coeficiente de disipación de energía, los códigos de diseño, incluyendo las NSR-98, han adoptado criterios de rigidez cada vez más exigentes; tales requisitos impiden definir de antemano el nivel de carga sísmica reducida donde el comportamiento inelástico se presenta y por lo tanto los valores propuestos para el  $R$ , predefinidos en los códigos, entrarán en contradicción con los niveles de ductilidad que se pueden alcanzar con las estructuras diseñadas para cumplir esos requisitos de rigidez.

A pesar de que algunos códigos como las previsiones sísmicas de la AISC (American Institute of Steel Construction, 2005) obligan (aunque no en forma explícita) al diseñador a obtener las sollicitaciones que realmente se espera que actuarán en los elementos y en las conexiones, no exigen evaluar las que se transmiten a las cimentaciones, a las pantallas y muros de corte, si los hay, y a los elementos no estructurales, cuando se presenta el sismo de diseño en la estructura que cumple los requisitos de rigidez exigidos. Es por eso que en la presente investigación se pretende determinar el valor teórico del coeficiente " $R$ " para varios tipos de estructuras de acero y establecer si existen patrones de comportamiento; para poder estimar con una mejor aproximación las sollicitaciones presentes en la estructura durante el sismo de diseño y compararlas con las que se determinan usando nuestro código (NSR-98).

En este artículo se presenta un marco teórico, en donde se aborda el comportamiento inelástico de los pórticos de acero y los métodos de evaluación del coeficiente de disipación de energía usados en la investigación; posteriormente se describen brevemente los pórticos estudiados, las cargas para las que fueron diseñados y los tipos de perfiles y aceros usados en el diseño; además se despliegan los resultados obtenidos para el coeficiente de disipación de energía,  $R$ , para tres objetivos de desempeño (OI, ocupación inmediata; LS, segu-

ridad de vidas; CP, prevención de colapso) y para los tres métodos de evaluación planteados, y por último, se dan las conclusiones y recomendaciones más relevantes de la investigación.

## Comportamiento inelástico de los pórticos de acero

Al diseñar el sistema de resistencia sísmico de los edificios de acero para una carga sísmica menor a la crítica, ( $F/R$ ), se entiende que cuando el sismo de diseño actúa plenamente en la edificación, en ella se presentan deformaciones inelásticas y plastificación de algunas secciones, es decir, la estructura deja de comportarse linealmente para presentar un comportamiento no lineal. En la Figura.1 se representa este comportamiento.

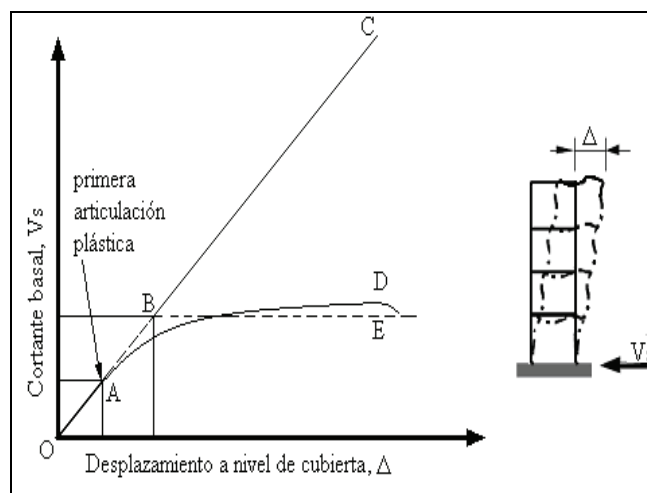


Figura 1. Comportamiento inelástico de una estructura solicitada por una fuerza horizontal (Valencia-Clement, 2005).

La línea OC muestra el comportamiento elástico de la estructura, en la que los desplazamientos se suponen proporcionales a la magnitud de la fuerza horizontal aplicada, el punto A representa la aparición de la primera articulación plástica, a partir del cual el comportamiento deja de ser lineal, y en la medida en que se presentan más articulaciones, este comportamiento tiende a ser el que muestra la curva OAD, el cual suele simplificarse con la curva idealizada OBE.

Para determinar el comportamiento inelástico de los pórticos de acero (curva de capacidad) se requiere realizar un análisis no lineal que tenga en cuenta tanto la no linealidad geométrica (efectos  $P-\Delta$ ) como la no linealidad del material (curva esfuerzo frente a deformación), para así poder predecir el mecanismo de falla del pórtico y determinar su comportamiento bajo la acción del sismo de diseño (desempeño).

Las propuestas en el ATC 40 (Applied Technology Council, 1995) y FEMA 273/356 (Federal Emergency Management Agency, 1996; Federal Emergency Management Agency, 2000), comúnmente conocidas como pushover (plastificación progresiva), consisten en realizar sobre la estructura un análisis pseudoestático no lineal, donde se considera el comportamiento de los elementos estructurales una vez superan

su capacidad elástica; estas metodologías son aproximadas y parten de suponer el mecanismo de falla de cada tipo de pórtico, sin embargo permiten tener una visión del comportamiento general de la estructura en el rango inelástico.

El Modal Pushover Analysis (MPA) desarrollado por Goel y Chopra (2004) resulta ser un procedimiento más avanzado que los expuestos en ATC40 y FEMA 273/356, ya que tiene en cuenta la contribución de modos diferentes al fundamental.

### El coeficiente de disipación de energía "R"

Casi todos los valores propuestos por los códigos de diseño sísmico para el factor R se basaron en la propuesta de Newmark y Hall (1973). La Figura.2 ilustra esta propuesta, en donde para periodos largos (a), se supone que si la estructura se comportase elásticamente bajo la acción de una fuerza FE, sufriría un desplazamiento ΔE, mientras que si su comportamiento fuera plástico idealizado, se alcanzaría el mismo desplazamiento para una fuerza reducida FE/R. Para periodos cortos, la propuesta se basa en la igualdad de energías (b), suponiendo que la energía del sistema elástico (área del triángulo OAB) es igual a la energía del sistema plástico (área del trapecio AECD).

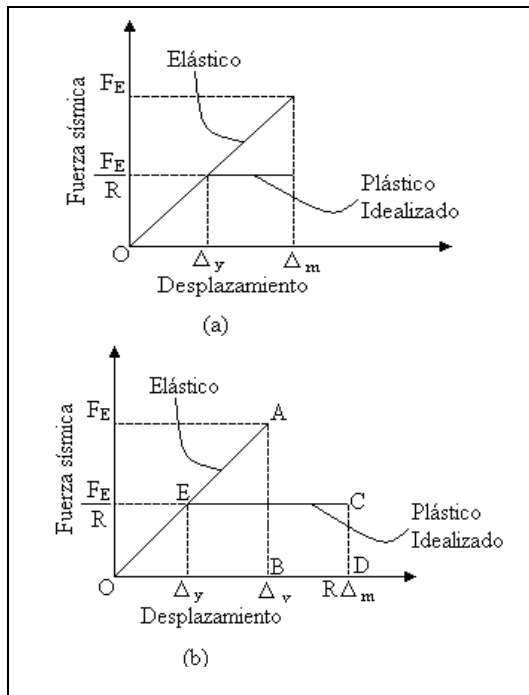


Figura. 2. Determinación del "R", según Newmark y Hall, para estructuras de periodos cortos y largos (Valencia Clement, 2005).

De la Figura. 2(a), la ductilidad ( $\mu$ ) definida en función de desplazamientos, es:

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} = R$$

De la Figura. 2(b), igualando las energías, se obtiene:

$$\mu = \frac{\Delta_m}{\Delta_y} = \frac{R^2 + 1}{2}$$

De las anteriores expresiones parten las que definen el R en varios de los códigos de diseño, incluyendo las NSR-98:

Periodos largos,  $T > 0.5$  s  $R = \mu$   
 Periodos cortos,  $T \leq 0.5$  s  $R = \sqrt{2\mu - 1}$

En la investigación que se resume en el presente artículo se evaluó el R siguiendo tres procedimientos:

-Según la propuesta original de Newmark y Hall (1973), ajustando la curva de capacidad o el espectro de capacidad a una curva bilineal plástica idealizada, véase la Figura. 2.

-Según la propuesta de NEHRP 2003 (Federal Emergency Management Agency, 2003), que calcula el R, comparando el comportamiento elástico de la edificación con el punto donde se presenta la primera articulación plástica, ver la Figura. 3.

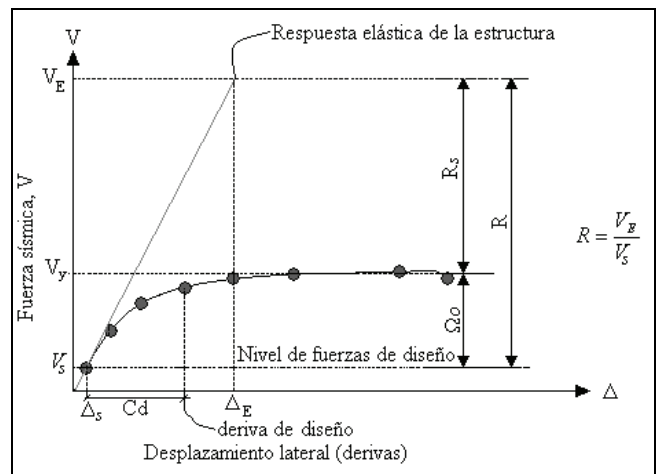


Figura. 3. Determinación del "R", según NEHRP (FEMA 450, 2003)

Donde:

VE: Cortante elástica máxima que depende del nivel de amenaza sísmica considerado cuando el sistema se comporta elásticamente.

Vs: Cortante elástica que actúa cuando se presenta la primera articulación plástica.

-Ajustando la curva de capacidad o el espectro de capacidad a una curva bilineal idealizada, que tiene en cuenta la demanda (punto de desempeño), ver la Figura. 4.

Donde:

VE: Cortante elástica máxima que depende del nivel de amenaza sísmica considerado cuando el sistema se comporta elásticamente.

Vy: Cortante elástica en el punto de intersección de la bilineal.

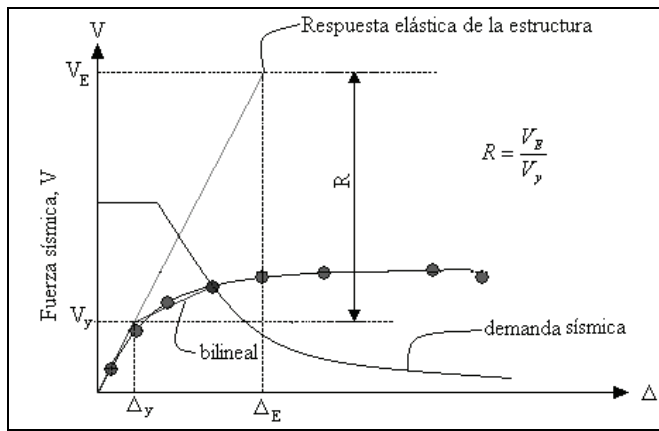


Figura 4. Determinación del "R", teniendo en cuenta el desempeño

### Pórticos estudiados

Se diseñaron los pórticos del sistema de resistencia sísmico para cinco edificios, a saber: cuatro, ocho, doce, dieciséis y veinte pisos, variando la cantidad de vanos sísmicos, el tipo de pórtico (PRM, PAC y PAE) y el número de luces (dos, tres y cuatro), para cumplir con el mínimo nivel de redundancia requerido.

Se usaron los siguientes valores para las cargas de servicio: carga muerta = 6.3 kN/m<sup>2</sup> y carga viva = 2.5 kN/m<sup>2</sup>.

La carga sísmica se determinó con el espectro de diseño de las NSR-98, para las siguientes características:

Ubicación: Región 7 Aa=0,30  
 Grupo de uso I: I=1,00  
 Tipo de Suelo, S3: S=1,50

Los perfiles utilizados en las vigas y columnas fueron tipo W, y los usados en las riostras, tubos cuadrados de referencia norteamericana HSS (para los PAC y los PAE). Se diseñaron con acero A572 grado 50 las vigas y columnas y A500 grado C las riostras.

### Evaluación del coeficiente de disipación de energía, R

A continuación se presentan los resultados de la evaluación de R para los 45 pórticos estudiados. Se contemplaron 3 objetivos de desempeño; OI, ocupación inmediata; LS, seguridad de vidas; CP, prevención de colapso.

-PRM: en las Figura. 5 a 13 se presenta el resumen de los resultados del análisis de los PRM.

-PAE: en las Figura. 14 a 22 se presenta el resumen de los resultados del análisis de los PAE.

-AC: en las Figuras. 23 a 31 se presenta el resumen de los resultados del análisis de los PAC.

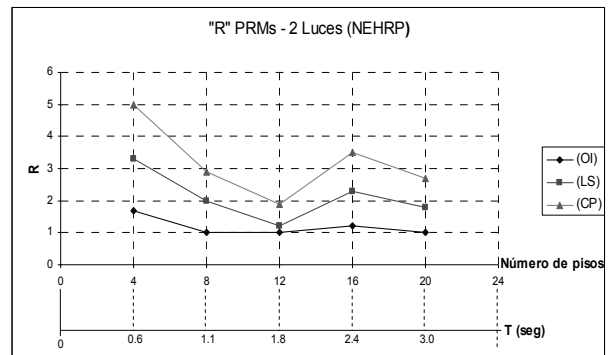


Figura 5. R, según NEHRP, PRM- 2L

Tabla 1. Códigos de los diferentes pórticos a diseñar. (NºL = número de luces y NºP = número de pisos)

CÓDIGO	Nº L	Nº P
PRM-1	2	4
PRM-2	3	4
PRM-3	4	4
PRM-4	2	8
PRM-5	3	8
PRM-6	4	8
PRM-7	2	12
PRM-8	3	12
PRM-9	4	12
PRM-10	2	16
PRM-11	3	16
PRM-12	4	16
PRM-13	2	20
PRM-14	3	20
PRM-15	4	20
PAE-1	2	4
PAE-2	3	4
PAE-3	4	4
PAE-4	2	8
PAE-5	3	8
PAE-6	4	8
PAE-7	2	12
PAE-8	3	12
PAE-9	4	12
PAE-10	2	16
PAE-11	3	16
PAE-12	4	16
PAE-13	2	20
PAE-14	3	20
PAE-15	4	20
PAC-1	2	4
PAC-2	3	4
PAC-3	4	4
PAC-4	2	8
PAC-5	3	8
PAC-6	4	8
PAC-7	2	12
PAC-8	3	12
PAC-9	4	12
PAC-10	2	16
PAC-11	3	16
PAC-12	4	16
PAC-13	2	20
PAC-14	3	20
PAC-15	4	20

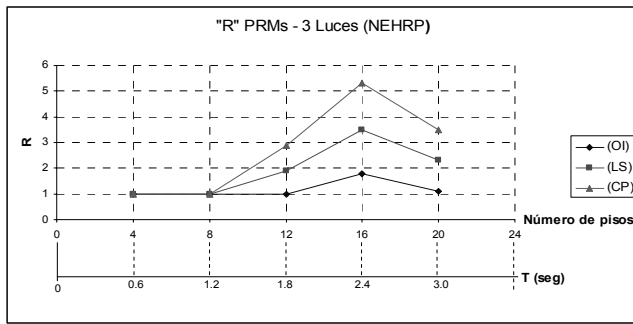


Figura 6. R, según NEHRP, PRM - 3L

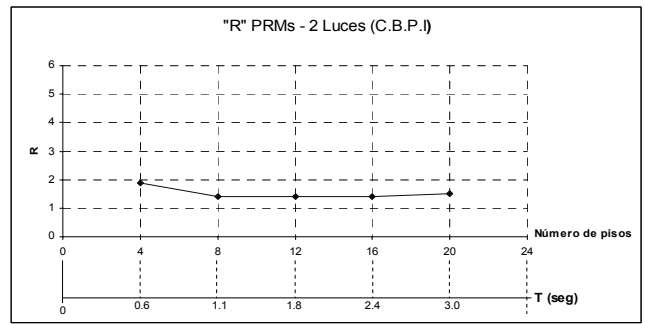


Figura 11. R según la bilineal plástica, PRM -2L

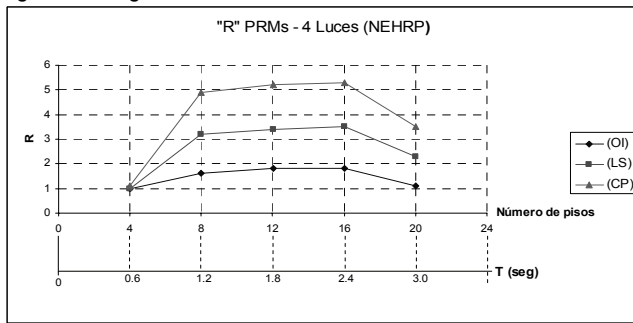


Figura 7. R, según NEHRP, PRM - 4L

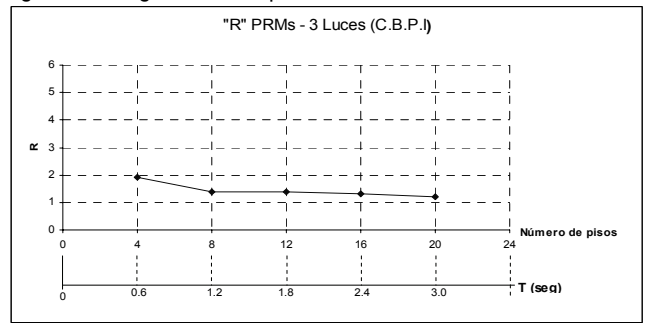


Figura 12. R según la bilineal plástica, PRM -3L

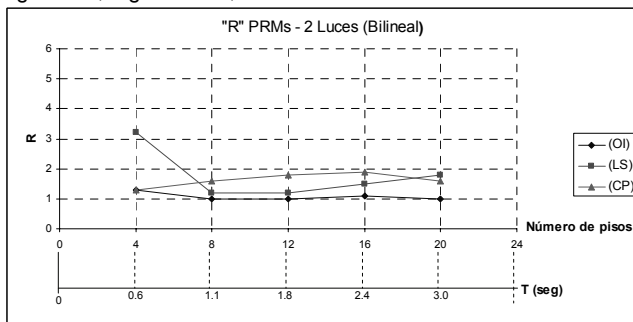


Figura 8. R, según la bilineal, PRM - 2L

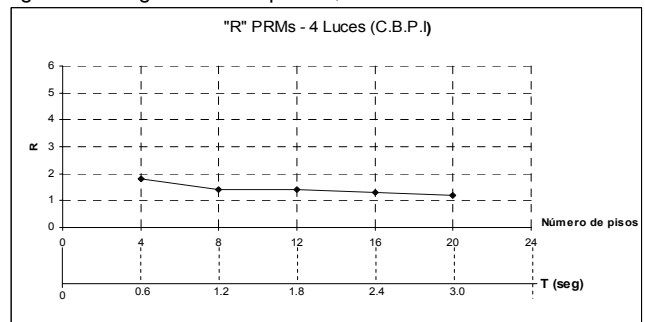


Figura 13. R según la bilineal plástica, PRM -4L

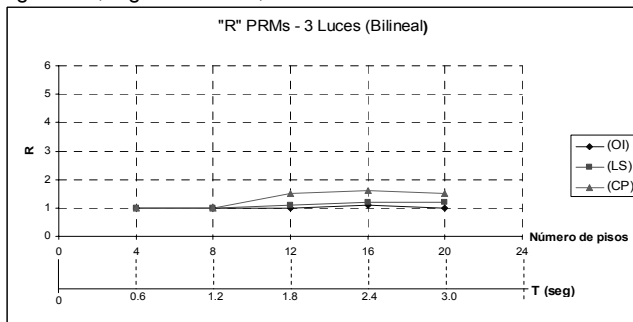


Figura 9. R, según la bilineal, PRM - 3L

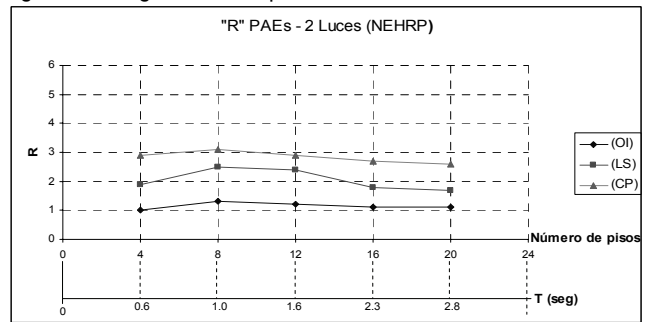


Figura 14. R, según NEHRP, PAE -2L

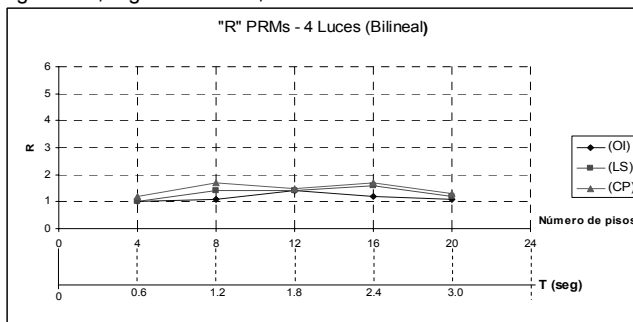


Figura 10. R, según la bilineal, PRM - 4L

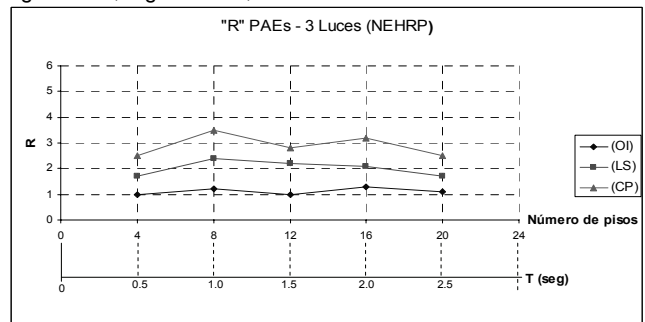


Figura 15. R, según NEHRP, PAE -3L

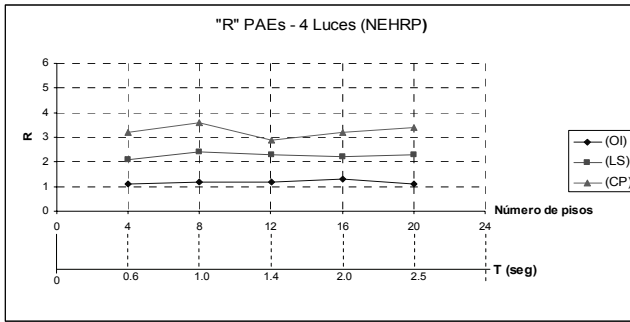


Figura 16. R, según NEHRP, PAE -4L

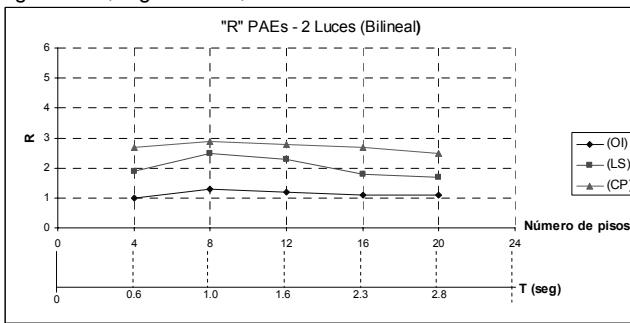


Figura 17. R, para la bilineal, PAE -2L

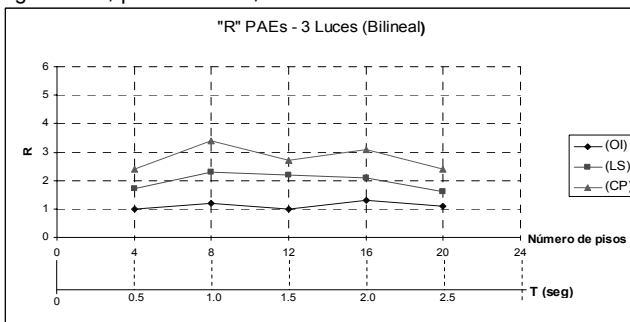


Figura 18. R, para la bilineal, PAE -3L

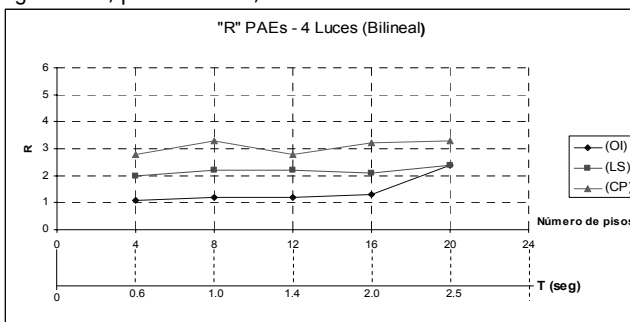


Figura 19. R, para la bilineal, PAE -4L

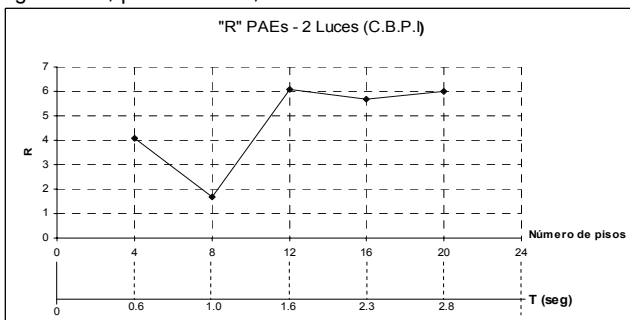


Figura 20. R, para la bilineal plástica, PAE -2L

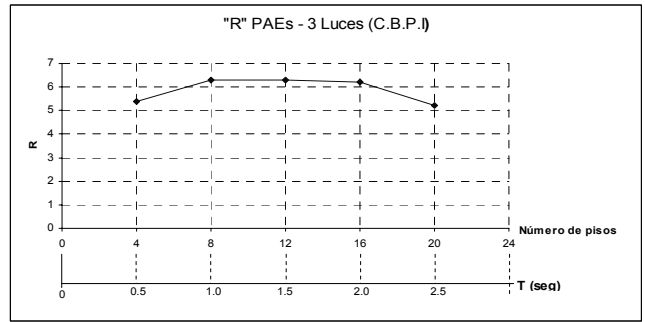


Figura 21. R, para la bilineal plástica, PAE -3L

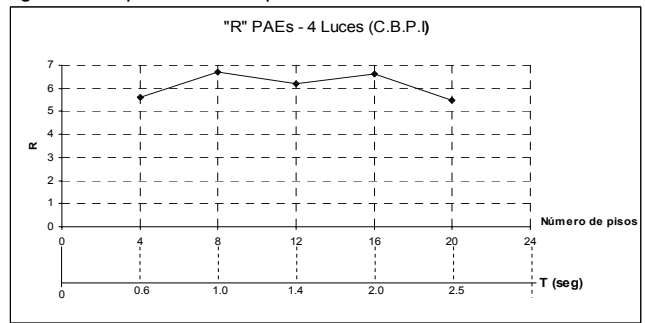


Figura 22. R, para la bilineal plástica, PAE -4L

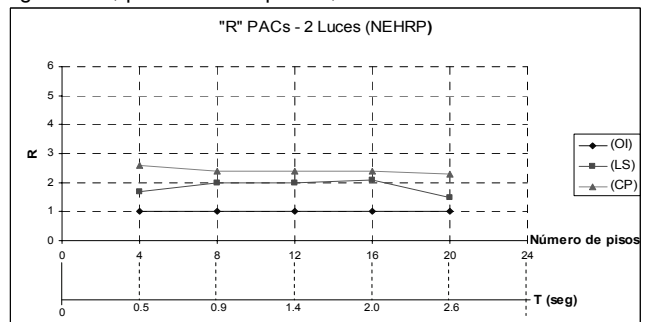


Figura 23. R, según NEHRP, PAC -2L

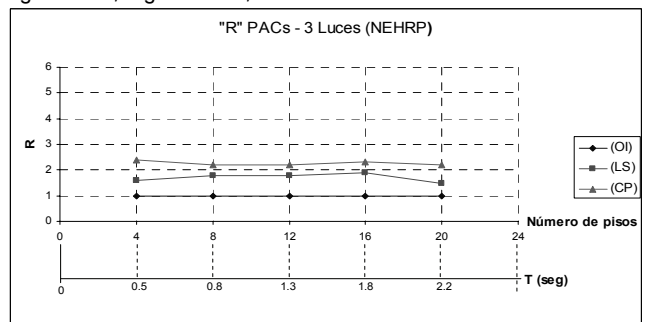


Figura 24. R, según NEHRP, PAC -3L

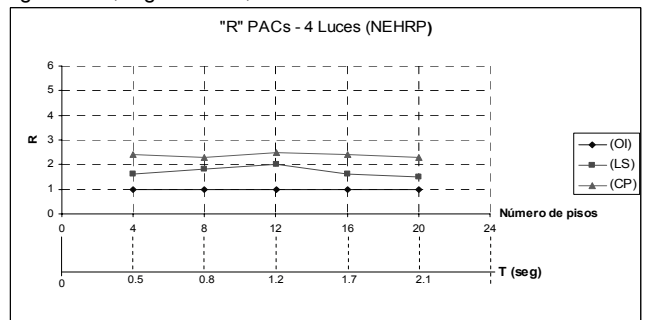


Figura 25. R, según NEHRP, PAC -4L

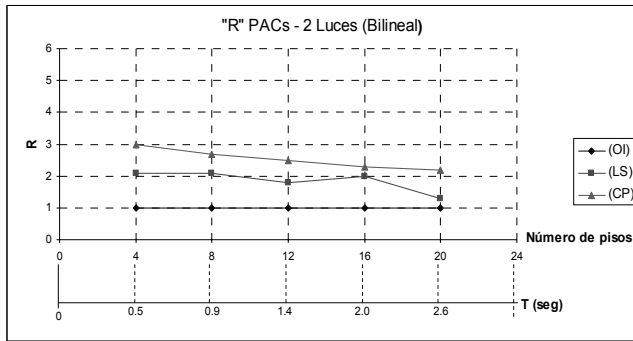


Figura 26. R, para la bilineal, PAC -2 L

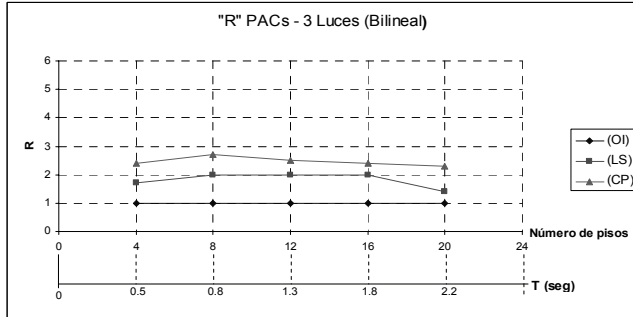


Figura 27. R, para la bilineal, PAC -3 L

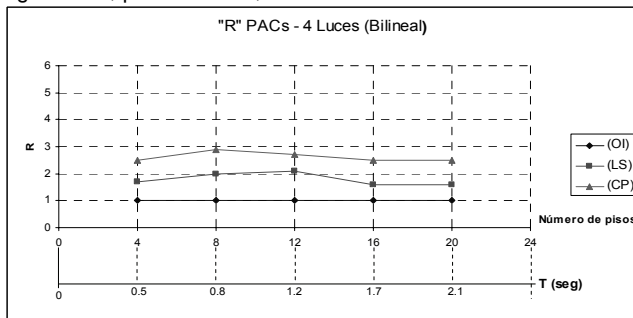


Figura 28. R, para la bilineal, PAC -4 L

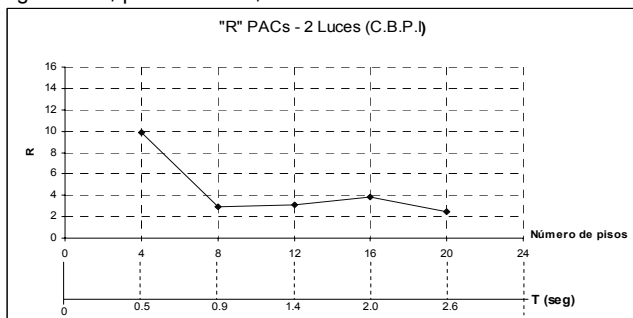


Figura 29. R, para la bilineal Plástica, PAC -2L

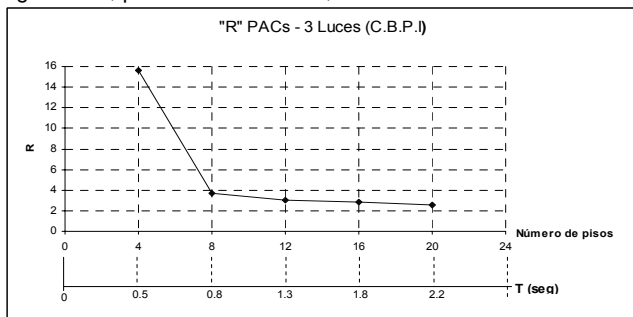


Figura 30. R, para la bilineal Plástica, PAC -3L

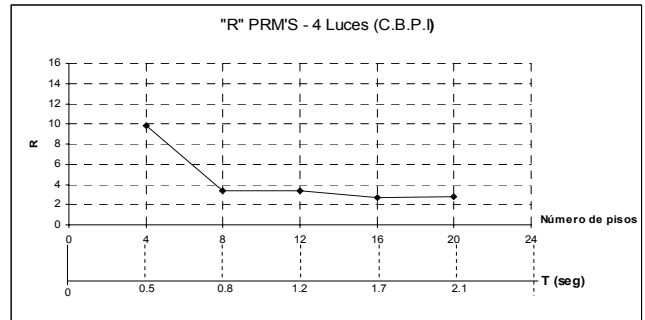


Figura 31. R, para la bilineal Plástica, PAC -4 L

## Conclusiones y recomendaciones

No se deberían diseñar los pórticos de acero, cualquiera que sea su configuración (PRM, PAE o PAC) con las solicitaciones halladas mediante un análisis elástico con las combinaciones de carga que incluyen la demanda sísmica, dividida por R ( $E = F/R$ ). Se han de diseñar para las solicitaciones que liberan los elementos que plastifican, teniendo en cuenta la fluencia esperada ( $R_yF_y$ ) y el endurecimiento por deformación.

Los lineamientos de diseño para pórticos de acero, pertenecientes a un sistema de resistencia sísmico, presentados en las NSR-98 (título F.3), son muy limitados y no toman en cuenta factores tan importantes en el comportamiento plástico, como la fluencia esperada ( $R_yF_y$ ) y el endurecimiento por deformación, y no es clara la revisión de las jerarquías de plastificación en los diferentes tipos de pórticos. Por ese motivo se recomienda diseñar los elementos siguiendo las ESPECIFICACIONES de códigos más actualizados como las previsiones sísmicas de AISC-2005.

Si los pórticos de acero se diseñan con las solicitaciones halladas mediante un análisis elástico, con las combinaciones de carga que incluyen la demanda sísmica dividida por R, pero al tiempo se cumplen los exigentes requisitos de las provisiones sísmicas de AISC-2005, no resultan pórticos inseguros, pues el factor R deja de tener relevancia. Revisando los datos de la tabla 2, todos los PRM se comportan elásticamente para el objetivo de desempeño de seguridad de vidas; los PAC y PAE sí entran en el rango inelástico (ver Tablas 3 y 4), sin embargo eso ocurre para una cortante basal mucho mayor que la prevista por medio de " $V/R$ ".

Esto implica que las solicitaciones liberadas por los PRM, PAE y PAC son bastante mayores que las previstas con las combinaciones estipuladas en las NSR-98, y que las estructuras que reciben esas solicitaciones, como son las placas de base, las cimentaciones, los muros de carga, elementos no estructurales y otros elementos ligados a la estructura, resultarían inseguras si se diseñan para las combinaciones de carga que incluyen la acción sísmica, tal como lo estipulan las NSR-98.

Los valores obtenidos para el coeficiente de disipación de energía, R, son en cualquiera de los casos, mucho menores que los presentados en las NSR-98.

El coeficiente de disipación de energía depende de la demanda sísmica y no se entiende por qué en las NSR-98 fijan

un valor que depende básicamente del sistema estructural usado.

Tabla 2. Relación entre el cortante en el punto de desempeño y el cortante basal dividido R, para los PRM.

PÓRTICO	CORTANTE EN LA BASE		V <sub>A-D</sub> /R (R=7)	V <sub>D</sub> / (V <sub>A-D</sub> /R)
	V <sub>D</sub> (kN)	V <sub>A-D</sub> (kN)		
PRM-1	8609	8639	1234	7.0
PRM-2	10817	10809	1544	7.0
PRM-3	14418	14411	2059	7.0
PRM-4	11428	11706	1672	6.8
PRM-5	14348	14599	2086	6.9
PRM-6	19190	19448	2778	6.9
PRM-7	11488	11808	1687	6.8
PRM-8	14724	14932	2133	6.9
PRM-9	19665	19860	2837	6.9
PRM-10	11952	12524	1789	6.7
PRM-11	15130	15575	2225	6.8
PRM-12	20020	20548	2935	6.8
PRM-13	12128	12691	1813	6.7
PRM-14	15333	15651	2236	6.9
PRM-15	20461	20649	2950	6.9

Donde:

V<sub>D</sub> = Cortante basal en el punto de desempeño.

V<sub>A-D</sub> = Cortante basal del análisis dinámico.

Los valores obtenidos para el coeficiente de disipación de energía varían notablemente, dependiendo del método de cálculo usado. Para todos los PRM y PAE, el método planteado por NEHRP da valores más altos o iguales a los que presenta el método de la bilineal; esto es lo que se espera para una curva de capacidad estable; sin embargo, para los PAC esto no ocurre, pues su curva de capacidad pasa a la parte inelástica de una manera brusca debido al pandeo de sus riostras.

La configuración de los pórticos también influye en el valor de R. Como se muestra en la sección 5, para un mismo rango de períodos la tendencia del valor encontrado para R, en los PRM, es muy diferente para los pórticos de 2, 3 y 4 luces. Para los PAC y PAE tal influencia es menos evidente.

El método de la bilineal plástica idealizada no se considera apropiado en la evaluación del coeficiente de disipación de energía porque no tiene en cuenta la demanda sísmica.

En los PRM, el máximo R obtenido para el objetivo de desempeño de seguridad de vidas es de 3,5; se podría pensar que si se considera el factor de sobrerresistencia  $\Omega_0 = 3$  (véase la Figura. 3) en la evaluación de las fuerzas internas de los elementos, se estaría trabajando por el lado de la seguridad; sin embargo, hay algunos PRM que se mantienen elásticos incluso para el objetivo de desempeño de prevención de colapso, y para estos casos el  $\Omega_0$  sería insuficiente.

Tabla 3. Relación entre el cortante en el punto de desempeño y el cortante basal dividido R, para los PAE.

PÓRTICO	CORTANTE EN LA BASE		V <sub>A-D</sub> /R (R=6)	V <sub>D</sub> / (V <sub>A-D</sub> /R)
	V <sub>D</sub> (kN)	V <sub>A-D</sub> (kN)		
PAE-1	5523	9219	1536	3.6
PAE-2	7412	11332	1889	3.9
PAE-3	8539	13240	2207	3.9
PAE-4	6186	11333	1889	3.3
PAE-5	8849	16526	2754	3.2
PAE-6	11667	22555	3759	3.1
PAE-7	7397	12547	2091	3.5
PAE-8	10175	17539	2923	3.5
PAE-9	13586	23830	3972	3.4
PAE-10	7847	12424	2071	3.8
PAE-11	11451	18164	3027	3.8
PAE-12	15000	24332	4055	3.7
PAE-13	9869	13647	2274	4.3
PAE-14	12198	18415	3069	4.0
PAE-15	19570	25136	4189	4.7

Tabla 4. Relación entre el cortante en el punto de desempeño y el cortante basal dividido R, para los PAC.

PÓRTICO	CORTANTE EN LA BASE		V <sub>A-D</sub> /R (R=5)	V <sub>D</sub> / (V <sub>A-D</sub> /R)
	V <sub>D</sub> (kN)	V <sub>A-D</sub> (kN)		
PAC-1	4854	9271	1854	2.6
PAC-2	6476	11671	2334	2.8
PAC-3	8598	15599	3120	2.8
PAC-4	7481	14872	2974	2.5
PAC-5	10422	21224	4245	2.5
PAC-6	13972	28975	5795	2.4
PAC-7	8287	14835	2967	2.8
PAC-8	11846	20882	4176	2.8
PAC-9	15191	28614	5723	2.7
PAC-10	9675	15115	3023	3.2
PAC-11	12771	20680	4136	3.1
PAC-12	16147	28488	5698	2.8
PAC-13	10181	14742	2948	3.5
PAC-14	12952	21440	4288	3.0
PAC-15	17244	29301	5860	2.9

En los PAE, el valor de R, para el objetivo de desempeño de seguridad de vidas, varía entre 2,0 y 2,5, valores bastante alejados del 6,0 que plantean las NSR-98, lo que significa que al diseñar siguiendo las pautas de las NSR-98 se están empleando fuerzas sísmicas entre 2,5 y 3 veces menores que las que realmente podrían presentarse.

En los PAC, para el objetivo de desempeño de seguridad de vidas, que corresponde al sismo de diseño, todos los valores de R hallados son menores o iguales a 2,1.

De acuerdo con lo anterior, se sugiere que las NSR-98 incluyan una aclaración en cuanto a la aplicación del R, pues en la práctica del diseño estructural se siguen al pie de la letra las indicaciones del código y se diseñan todos los elementos, incluyendo los de soporte, para las fuerzas reducidas, las que, como se acaba de demostrar, están muy por debajo de



las que harán plastificar la estructura y por lo tanto se generarán fallas frágiles que pueden ocasionar el colapso.

Varios de los programas de uso común en ingeniería, traen herramientas que permiten evaluar en forma relativamente fácil la curva de capacidad de la estructura y su desempeño ante determinada demanda sísmica. Se sugiere que se usen estas herramientas para evaluar las solicitaciones que liberan los pórticos, y que se usen esos resultados no solo para evaluar el desempeño, sino para el diseño de los elementos de soporte y estructuras ligadas al pórtico.

Otra alternativa es diseñar en los pórticos los elementos diferentes al que plastifica y los elementos de soporte para las acciones liberadas por estos en el mecanismo, teniendo en cuenta el endurecimiento por deformación y la fluencia esperada. Esto puede ser un método conservador, pues permite hallar las máximas solicitaciones que se pueden presentar en la estructura, independiente de la demanda sísmica.

Cumplir con los requisitos de diseño de las previsiones sísmicas del AISC-2005 y el uso de conexiones precalificadas mejoran el comportamiento global de los pórticos de acero diseñados usando las fuerzas reducidas mediante  $R$ , entre otras razones porque en realidad se obvia la influencia del  $R$  como resultado de la filosofía general de diseño que tales previsiones predicen, así no se diga explícitamente en ellas que tal factor no se está considerando, por esto se recomienda diseñar de acuerdo con las recomendaciones de tales previsiones.

## Nomenclatura

PRM: pórticos resistentes a momento

PAC: pórticos arriostrados concéntricamente

PAE: pórticos arriostrados excéntricamente

$R$ : coeficiente de disipación de energía

$F$ : carga sísmica elástica [kN]

$E$ : fuerza sísmica reducida de diseño [kN]

$T$ : periodo fundamental de la estructura [seg]

$\mu$ : ductilidad

$V_E$ : cortante elástica máxima que depende del nivel de amenaza sísmica considerado cuando el sistema se comporta elásticamente [kN]

$V_S$ : cortante elástica que actúa cuando se presenta la primera articulación plástica [kN]

$V_y$ : cortante elástica en el punto de intersección de la bilineal [kN]

$A_a$ : coeficiente que representa la aceleración pico efectiva, para diseño

$I$ : coeficiente de importancia

$S$ : coeficiente de sitio

OI: objetivo de desempeño de ocupación inmediata

LS: objetivo de seguridad de vidas

CP: objetivo de prevención de colapso

$R_y$ : relación entre el esfuerzo de fluencia esperado y el esfuerzo mínimo de fluencia especificado

$F_y$ : Esfuerzo de fluencia mínimo especificado para cada tipo de acero [MPa]

$V_D$ : cortante basal en el punto de desempeño [kN]

$V_{A,D}$ : cortante basal del análisis dinámico [kN]

$\Omega_0$ : factor de sobrerresistencia

## Bibliografía

American Institute of Steel Construction., Seismic Provisions for Structural Steel Buildings. Chicago, EU, 2005.

Applied Technology Council., Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. ATC-40, California, EU, 1995.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica., Normas Colombianas de Construcción y diseño Sismorresistente, Bogotá, 1998.

Federal Emergency Management Agency., NEHRP Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA-273, Building Seismic Safety Council (BSSC), Washington, EU, 1996.

Federal Emergency Management Agency., Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Buildings. FEMA-356, Federal Emergency Management Agency, Washington, EU, 2000.

Federal Emergency Management Agency., NEHRP Recommended Provisions for Seismic Regulation for New Buildings and other Structures, Part I: Provisions, Part 2: Commentary. FEMA-450, Building Seismic Safety Council (BSSC), Washington, EU, 2003.

Goel, R., Chopra, A. Evaluation of modal and FEMA pushover analyses: SAC Buildings. Earthquake Spectra, California, EU, 2004.

Newmark, N., Hall, W., Seismic Design Criteria for Nuclear Reactor Facilities, Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, U.S., Department of Commerce, Reporte N° 46, Washington, 1973.

Valencia Clement, G., Notas de clase del curso Diseño Sismorresistente de Estructuras de Acero., Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, 2005.

Valencia Clement, G., Consideraciones Sobre el Empleo del Coeficiente de Disipación de Energía,  $R$ , en el Análisis de las Estructuras de Acero. III Congreso Colombiano de Ingeniería Sísmica, Cali, Colombia, 2005.