

## Combination criteria for responses to two seismic components

Oscar A. López y Julio J. Hernández

IMME, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Apartado 50361, Caracas 1050-A, Venezuela. E-mail: julher@cantv.net, oslopez@reacciun.ve.

### Abstract

An evaluation of the SRSS, 30%, 40% y SRSS-S rules for multicomponent seismic analysis of structures subjected to two horizontal ground components is presented. The evaluation is developed by means of comparing the rule responses with the critical response  $r_{cr}$  obtained with the recently proposed CQC3 method that takes into account the different direction of the ground components with respect to the structural axes, and is more reliable. For realistic values of the spectrum intensity ratio between 0.5 and 0.85, the response  $r_e$  lies between  $0.79 r_{cr}$  and  $1 r_{cr}$  for the SRSS rule, between  $1 r_{cr}$  and  $1.26 r_{cr}$  for the SRSS-S rule, between  $0.99 r_{cr}$  and  $1.25 r_{cr}$  for the 40% rule, and between  $0.92 r_{cr}$  and  $1.16 r_{cr}$  for the 30% rule. These conclusions are valid for any structure and any response spectrum. It is recommended that the critical response be adopted in design codes.

**Key words:** CQC3, critical response, SRSS response, 30% rule, 40% rule.

## Criterios para combinar respuestas ante dos componentes sísmicas

### Resumen

Se presenta una evaluación de los criterios SRSS, 30%, 40% y SRSS-S comúnmente utilizados en las normas sismorresistentes para el cálculo de la respuesta de estructuras ante la acción de dos componentes horizontales del movimiento sísmico. La evaluación se hace tomando como referencia la respuesta crítica  $r_{cr}$  de sistemas elásticos obtenida con el método CQC3 propuesto recientemente, el cual toma en cuenta las diferentes direcciones de incidencia del movimiento sísmico con respecto a los ejes de la estructura y es considerado de mayor confiabilidad. Para valores realistas de la relación  $\gamma$  de espectros horizontales comprendidos entre 0,5 y 0,85, se tiene que la respuesta calculada con el criterio SRSS está comprendida entre  $0,79 r_{cr}$  y  $1 r_{cr}$ , con el criterio SRSS-S entre  $1 r_{cr}$  y  $1,26 r_{cr}$ , con el criterio del 40% entre  $0,99 r_{cr}$  y  $1,25 r_{cr}$  y con el criterio del 30% entre  $0,92 r_{cr}$  y  $1,16 r_{cr}$ . Estas conclusiones son válidas para cualquier estructura y cualquier espectro. Se recomienda incorporar el cálculo de  $r_{cr}$  en las normas de diseño.

**Palabras clave:** CQC3, respuesta crítica, respuesta SRSS, criterio 30%, criterio 40%.

### Introducción

El diseño estructural requiere la consideración de la acción simultánea de las diferentes componentes que constituyen el movimiento sísmico. En el caso de edificios, las normas de diseño [1-3] suelen recomendar el análisis dinámico calculando separadamente la máxima respuesta ante cada una de las dos componentes horizonta-

les, actuando según unas direcciones fijas que se hacen coincidir con los ejes de la estructura. Estas respuestas individuales son combinadas de alguna forma a fin de estimar la máxima respuesta ante la acción simultánea de ambas componentes. Los criterios de combinación tradicionales ignoran la correlación entre las componentes sísmicas según los ejes estructurales, conduciendo a cierto error. Entre los criterios de combinación

mas utilizados se pueden citar la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados [1, 3], y las reglas del 30% [1, 2, 3] y del 40% basadas en los trabajos pioneros de Newmark [4] y Rosenblueth y Contreras [5]. Estos criterios se comparan en la Ref. [6].

Recientemente se ha propuesto el criterio de combinación denominado CQC3 el cual permite determinar la máxima respuesta estructural ante dos componentes sísmicas horizontales de diferente intensidad que inciden con un ángulo de inclinación arbitrario con respecto a los ejes de la estructura [7, 8, 9]. El criterio CQC3 permite también la determinación del ángulo crítico de incidencia que da lugar a la mayor respuesta estructural o respuesta crítica. Una fórmula explícita para el cálculo de la respuesta crítica ha sido propuesta recientemente [10]. El criterio CQC3 ha sido propuesto [9] como sustituto de los criterios SRSS, 30% y 40%; la comparación entre ellos ha estado limitada a una sola estructura con parámetros fijos [9]. Este trabajo tiene como objetivo la evaluación de los criterios normativos para la combinación de las respuestas a las componentes horizontales del movimiento sísmico, bajo el marco de referencia del método CQC3 considerado como de mayor confiabilidad, considerando espectros horizontales proporcionales con intensidades relativas típicas de registros sísmicos.

## Respuesta Estructural ante dos Componentes Sísmicas

### Movimiento sísmico

El movimiento sísmico horizontal en un punto puede describirse obviamente mediante dos componentes ortogonales de dirección cualesquiera. En general los movimientos ortogona-

les están correlacionados. Sin embargo existen dos direcciones principales 1 y 2 (Figura 1), una de ellas apuntando hacia el epicentro del sismo, las cuales no están correlacionadas y tienen respectivamente las intensidades máxima y mínima medibles entre el conjunto de todas las direcciones del plano horizontal [11]. Las componentes sísmicas definidas según otros ejes, como pueden ser los ejes X y Y de la estructura (Figura 1), se obtienen por proyección de las componentes 1 y 2, y quedan correlacionadas entre sí. Los ejes 1 y 2 forman un ángulo  $\theta$  con los ejes X y Y (Figura 1). Las componentes sísmicas se definen en términos de sus espectros de pseudoaceleraciones: A es el espectro de la componente mayor en dirección 1, y  $\gamma A$  es el de la componente menor en dirección 2, donde  $\gamma \leq 1$  se define como el cociente de espectros.

### Respuesta estructural en función del ángulo de incidencia del sismo

Dado que al diseñar una estructura no conocemos las direcciones principales 1 y 2 que tendrá un movimiento sísmico, consideraremos todas las posibilidades de su incidencia según un ángulo arbitrario  $\theta$  (Figura 1). Para un cierto valor de  $\theta$ , la respuesta máxima probable  $r(\theta)$  a la acción simultánea de las componentes sísmicas, está dada por el criterio CQC3 [7, 8, 9]:

$$r(\theta) = \left\{ \left[ r_x^2 + (\gamma r_y)^2 \right] \cos^2 \theta + \left[ (\gamma r_x)^2 + r_y^2 \right] \sin^2 \theta + 2(1 - \gamma^2) r_{xy} \sin \theta \cos \theta \right\}^{1/2} \quad (1)$$

$$r_k = \left[ \sum_i \sum_j \rho_{ij} r_{ki} r_{kj} \right]^{1/2}, \quad k = x, y; \\ r_{xy} = \sum_i \sum_j \rho_{ij} r_{xi} r_{yj} \quad (2)$$

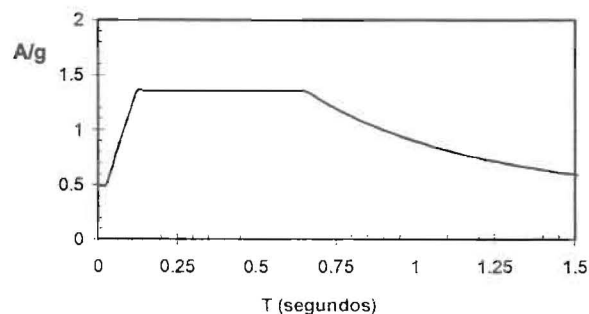
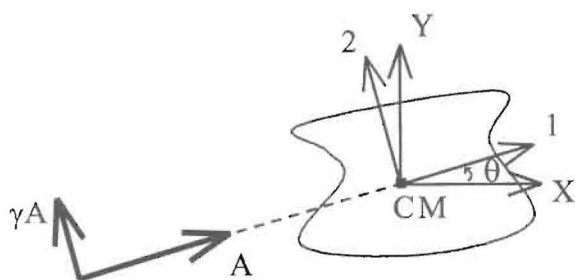


Figura 1. Ejes principales del sismo (1, 2) y de la estructura (X,Y), y espectro de diseño.

donde  $r_x$  y  $r_y$  son los valores máximos probables de  $r$  cuando una única componente sísmica definida por su espectro  $A$  se aplica según el eje X y según el eje Y, respectivamente. El valor de  $r_k$  ( $k = x, y$ ), Ec. 2, está dado por el conocido criterio CQC de combinación de las respuestas en cada modo de vibración [13], donde  $r_{ki}$  es la respuesta de mayor valor absoluto, tomada con su signo correspondiente, en el modo  $i$  de vibración y  $\rho_{ij}$  es el coeficiente de correlación entre los modos  $i$  y  $j$ . El término  $r_{xy}$  (Ec. 1 y 2) es un término que mide la correlación [10] entre las respuestas  $r_x$  y  $r_y$ .

**Respuesta crítica**

La respuesta crítica  $r_{cr}$  se define por la mayor entre las respuestas  $r(\theta)$  dada por la Ec. 1 considerando todos los ángulos ( $\theta$ ) posibles de incidencia del sismo. Se puede demostrar [10] que  $r_{cr}$  está dada por:

$$r_{cr} = \left[ (1 + \gamma^2) \left( \frac{r_x^2 + r_y^2}{2} \right) + (1 - \gamma^2) \sqrt{\left( \frac{r_x^2 - r_y^2}{2} \right)^2 + r_{xy}^2} \right]^{1/2} \tag{3}$$

la cual se obtiene para el ángulo  $\theta = \theta_{cr} = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[ \frac{2r_{xy}}{r_x^2 - r_y^2} \right]$ .

**Criterios de Combinación de Respuestas a Varias Componentes Sísmicas**

Los criterios que siguen fueron propuestos antes de establecerse el cálculo exacto de la respuesta crítica, dado por la Ec. 3.

**Criterio SRSS-S**

Este criterio [1, 3], descrito por sus siglas en inglés, utiliza la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados para combinar las respuestas individuales, adoptando el mismo espectro para las dos componentes sísmicas actuando según X y Y. Puede ser interpretado como una versión simplificada del criterio más general (SRSS) que se expone posteriormente, razón por la cual lo deno-

minamos SRSS-S. Éste estima la respuesta máxima como:

$$r_e = [r_x^2 + r_y^2]^{1/2} \tag{4}$$

Obsérvese que la Ec. 4 se puede obtener de la Ec. 1 para cualquier  $\theta$ , haciendo  $\gamma = 1$ , de donde se observa que este resultado no toma en cuenta la dirección del sismo.

**Criterio del 30%**

Recomendado en diversas normas [1, 2, 3] este criterio fue propuesto originalmente por Rosenblueth y Contreras en 1977 [5], suponiendo que ambas componentes sísmicas están descritas por procesos gaussianos de igual intensidad. Determina la respuesta combinada a partir de la suma del 100% de la respuesta a sismo en una dirección mas el 30% de la respuesta a sismo en la dirección ortogonal. La combinación que de lugar a la mayor respuesta es la que se usa en el diseño:

$$r_e = \text{mayor de } \left\{ \begin{matrix} 0,3r_x + r_y \\ r_x + 0,3r_y \end{matrix} \right\} \tag{5}$$

**Criterio del 40%**

Propuesto originalmente por Newmark [4] intenta dar siempre una estimación conservadora de la respuesta y supone componentes sísmicas horizontales de igual intensidad ( $\gamma = 1$ ):

$$r_e = \text{mayor de } \left\{ \begin{matrix} 0,4r_x + r_y \\ r_x + 0,4r_y \end{matrix} \right\} \tag{6}$$

**Criterio SRSS**

Este criterio consiste en calcular la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las respuestas individuales ante las componentes sísmicas 1 y 2 actuando según los ejes X y Y, reconociendo la diferencia de intensidad entre dichas componentes ( $\gamma < 1$ ) pero suponiendo que no están correlacionadas. Puesto que la mayor componente sísmica puede actuar según X o Y, es necesario examinar ambas posibilidades para efectos de diseño:

$$r_e = \text{mayor de } \left\{ \begin{matrix} [r_x^2 + (\gamma r_y)^2]^{1/2} \\ [(\gamma r_x)^2 + r_y^2]^{1/2} \end{matrix} \right\} \tag{7}$$

Tabla 1  
Cociente  $r_e/r_{cr}$  para los diferentes criterios de combinación

SRSS-S	30%	40%	SRSS
	Mayor de:	Mayor de:	Mayor de:
$(1+\beta^2)^{1/2} / f(\alpha,\beta,\gamma)$	$(1+0,3\beta) / f(\alpha,\beta,\gamma);$ $(0,3+\beta) / f(\alpha,\beta,\gamma)$	$(1+0,4\beta) / f(\alpha,\beta,\gamma);$ $(0,4+\beta) / f(\alpha,\beta,\gamma)$	$[1+(\gamma\beta)^2]^{1/2} / f(\alpha,\beta,\gamma);$ $[\gamma^2+\beta^2]^{1/2} / f(\alpha,\beta,\gamma)$

Nótese que la Ec. 7 se puede obtener de la Ec. 1: el primer término de la Ec.7 se obtiene haciendo  $\theta = 0^\circ$  en la Ec 1 y el segundo término haciendo  $\theta = 90^\circ$ .

### Comparación entre las Respuestas Estimadas ( $r_e$ ) y la Respuesta Crítica ( $r_{cr}$ )

Para una mejor comprensión de la relación entre  $r_e$  y  $r_{cr}$ , es conveniente expresar  $r_{cr}$  en términos de parámetros adimensionales; tomando  $r_x \neq 0$  como factor común, la Ec. 3 se puede reescribir como:

$$r_{cr} = r_x \left[ (1 + \gamma^2) \left( \frac{1 + \beta^2}{2} \right) + (1 - \gamma^2) \sqrt{\left( \frac{1 - \beta^2}{2} \right)^2 + (\alpha\beta)^2} \right]^{1/2} = r_x f(\alpha, \beta, \gamma) \quad (8)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de correlación entre las respuestas  $r_x$  y  $r_y$ , y  $\beta$  es el cociente entre las respuestas  $r_y$  y  $r_x$ :

$$\alpha = \frac{r_{xy}}{r_x r_y}; \quad \beta = \frac{r_y}{r_x} \quad (9)$$

En caso que  $r_y = 0$ , puede definirse  $\alpha = 0$ . Los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  dependen de las características del sistema estructural y de la forma del espectro A. Sin embargo, se puede demostrar [10] que  $\alpha$  cumple con:  $-1 \leq \alpha \leq +1$ . El coeficiente de correlación  $\alpha$  depende específicamente de la cercanía entre los periodos de vibración de los modos que más contribuyen a la respuesta para sismo X, y aquellos que más contribuyen para sismo Y [10]. Por otro lado,  $\beta$  es un número positivo que puede adoptar valores entre 0 e  $\infty$ , aun cuando veremos que es suficiente con variarlo solamente entre 0 y 1. Conociendo los rangos de  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ , es

posible determinar los rangos de los cocientes  $r_e/r_{cr}$ . Utilizando las ecuaciones 4 a 9 el cociente  $r_e/r_{cr}$  se puede escribir tal como se indica en la Tabla 1.

Los cocientes  $r_e/r_{cr}$  dados en la Tabla 1 son válidos para cualquier estructura y cualquier forma del espectro A, y sólo dependen de los tres parámetros adimensionales  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$ . Se puede comprobar que el valor de  $r_e/r_{cr}$  para un valor dado de  $\beta$ , es igual al valor de  $r_e/r_{cr}$  para el inverso de  $\beta$ ; por tanto, para examinar el rango de valores que puede adoptar el cociente  $r_e/r_{cr}$ , es suficiente con variar  $\beta$  entre 0 y 1.

Las Figuras 2 y 3 muestran la variación de  $r_e/r_{cr}$  con  $\alpha$  y  $\beta$  para los diferentes criterios y para valores de  $\gamma = 0, 0,5, 0,75$  y 1. Valores de  $\gamma$  comprendidos entre 0,5 y 0,85 se pueden considerar como representativos de los sismos en un rango amplio de periodos [12]. Se puede demostrar [14] que las cotas superior e inferior del cociente  $r_e/r_{cr}$  están dadas por los valores de la Tabla 2, y son válidas para cualquier estructura y cualquier espectro.

De la Figura 2-a se puede observar que el criterio SRSS-S es conservador, pues siempre sobrestima la respuesta crítica. Esto se debe a que la Ec. 4 es el máximo valor posible de la Ec. 1 para todo  $\theta$  y  $\gamma$ . Se exceptúa el caso de espectros con igual intensidad ( $\gamma = 1$ ) cuando da lugar a una respuesta  $r_e$  idéntica a  $r_{cr}$  para cualquier valor de  $\alpha$  y de  $\beta$ . Las mayores sobreestimaciones ocurren cuando  $\alpha = 0$  y  $\beta = 1$ , las cuales son función de  $\gamma$ . En el rango de los valores típicos de  $\gamma$  comprendidos entre 0,5 y 0,85, tenemos que el cociente  $r_e/r_{cr}$  está acotado entre 1 y 1,265 (Tabla 2).

La respuesta  $r_e$  obtenida con el criterio del 30% puede sobrestimar o subestimar la respuesta crítica  $r_c$ , dependiendo de los valores de  $\alpha$  y  $\beta$ , tal como se indica en la Figura 2-b. Para  $\beta$  fijo, el

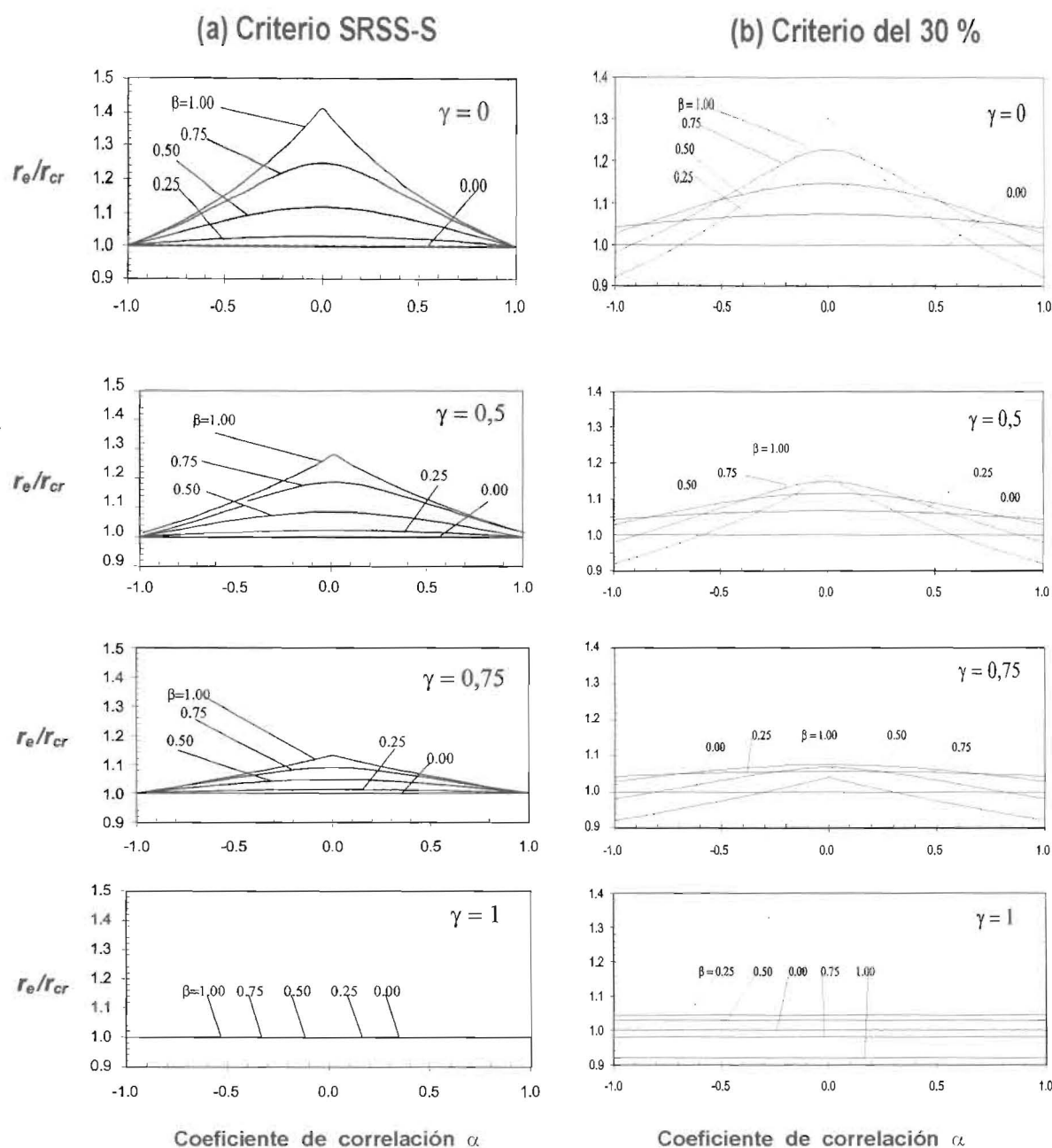


Figura 2. Variación de  $r_e/r_{cr}$  con  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\gamma$  para los criterios SRSS-S y 30%.

máximo  $r_e/r_{cr}$  se alcanza cuando  $\alpha = 0$ , y su valor es función de  $\beta$  y  $\gamma$ . El mínimo de  $r_e/r_{cr}$  es 0,919 y se alcanza cuando  $|\alpha| = 1$  y  $\beta = 1$ , independientemente de  $\gamma$ . De la Tabla 2 obtenemos las cotas de  $r_e/r_{cr}$ : para  $\gamma$  entre 0,5 y 0,85 se tiene  $r_e/r_{cr}$  que está limitado entre 0,919 y 1,163.

La variación del cociente  $r_e/r_{cr}$  con el criterio del 40% se muestra en la Figura 3-a. Prácticamente en la totalidad de los casos la regla del 40%

sobrestima la respuesta crítica, con pequeñas excepciones observables y de poco valor en los extremos de los gráficos. Para un valor fijo de  $\beta$ , el máximo de  $r_e/r_{cr}$  ocurre cuando  $\alpha = 0$ . Entre todos los valores posibles de  $\beta$  y  $\gamma$ , el máximo de  $r_e/r_{cr}$  es igual a 1,40, para el caso de  $\beta = 1$  y  $\gamma = 0$ . De la Tabla 2 concluimos que para  $\gamma$  entre 0,5 y 0,85 se tiene que  $r_e/r_{cr}$  está acotado entre 0,990 y 1,252.

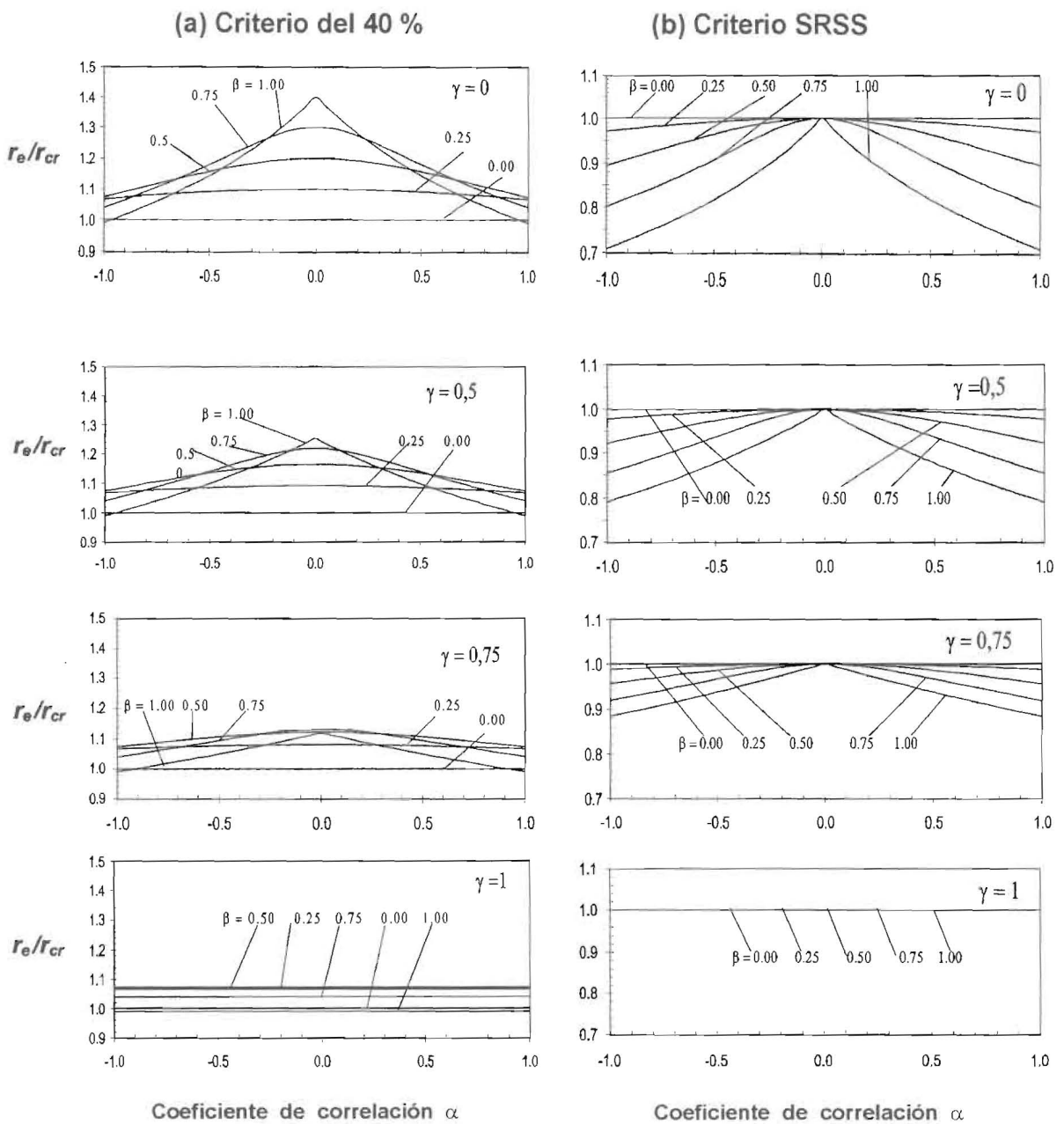


Figura 3. Variación de  $r_e/r_{cr}$  con  $\alpha, \beta$  y  $\gamma$  para los criterios del 40% y el SRSS.

La Figura 3-b indica que la respuesta  $r_e$  calculada con el criterio SRSS siempre subestima la respuesta crítica  $r_{cr}$ . Esto se debe a que para  $\alpha$  y  $\beta$  fijos existe un ángulo  $\theta$  que conduce a una respuesta  $r_{cr}$  mayor o igual a las respuestas asociadas a  $\theta = 0^\circ$  y  $\theta = 90^\circ$  que son las definidas en  $r_e$  (Ec. 7). Para un  $\gamma$  fijo, el mínimo de  $r_e/r_{cr}$  está asociado a valores de  $|\alpha| = 1$  y  $\beta = 1$ . Entre todos los valores de  $\gamma$ , el mínimo de  $r_e/r_{cr}$  es 0,707 asociado a

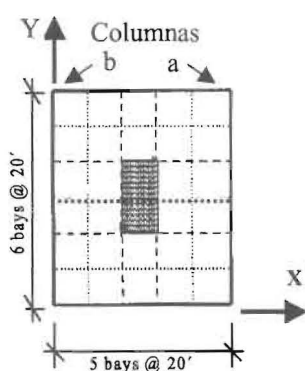
$\gamma = 0$ . Para  $\gamma$  entre 0,5 y 0,85 se tiene que  $r_e/r_{cr}$  está comprendido entre 0,791 y 1 (Tabla 2).

### Ejemplos

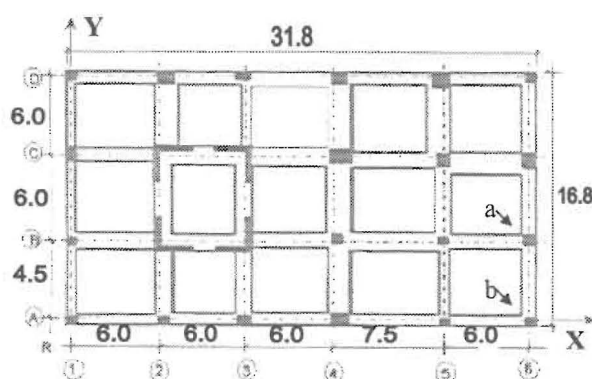
La Figura 4 muestra las plantas de los Edificios 1 y 2; el Edificio 1 es un edificio de acero de 20 pisos, simétrico según sus ejes X y Y, diseñado según el UBC 1994 para el Proyecto SAC [15]. Los

Tabla 2  
Cotas superior e inferior del cociente  $r_e / r_{cr}$  para los criterios de combinación

Cotas	SRSS-S	30%	40%	SRSS
Superior	$\left(\frac{2}{1+\gamma^2}\right)^{1/2}$	$\frac{1,3}{\sqrt{1+\gamma^2}}; 0 \leq \gamma \leq \sqrt{0,3}$ $\sqrt{1+\left(\frac{0,3}{\gamma}\right)^2}; \sqrt{0,3} \leq \gamma \leq 1$	$\frac{1,4}{\sqrt{1+\gamma^2}}; 0 \leq \gamma \leq \sqrt{0,4}$ $\sqrt{1+\left(\frac{0,4}{\gamma}\right)^2}; \sqrt{0,4} \leq \gamma \leq 1$	1
Inferior	1	$\frac{1,3}{\sqrt{2}} = 0,919$	$\frac{1,4}{\sqrt{2}} = 0,990$	$\left(\frac{1+\gamma^2}{2}\right)^{1/2}$



(a) Edificio 1



(b) Edificio 2

Figura 4. Plantas del Edificio 1 (Ref. [15], en pies) y del Edificio 2 (Ref. [16], en metros).

períodos de sus dos primeros modos son  $T_x = 4,1$  s y  $T_y = 3,7$  s. El Edificio 2 es de concreto armado, asimétrico, de 9 pisos, cuyas propiedades completas están en la Ref. [16]; sus tres primeros períodos son 1,03 s, 0,55 s y 0,46 s, correspondientes a modos con movimiento simultáneo de traslaciones X, Y y rotación en planta. El amortiguamiento en todos los modos de ambos edificios es de 5%. Los espectros para la mayor y la menor componente sísmica horizontal están definidos por A (Figura 1) y 0,65A, respectivamente. Los parámetros de respuesta seleccionados son la fuerza axial en las columnas a y b en la planta baja del Edificio 1, y la fuerza axial y las fuerzas cortantes en las columnas a y b en la planta baja del Edificio 2. Debido a la simetría del Edificio 1, los cocientes  $r_e / r_{cr}$  son iguales a uno para las fuerzas cortantes y momentos flectores a lo largo de los ejes X y Y; la simetría conduce a que para esas solicitaciones  $r_{cr} = r_x$  ó  $r_y$  por tanto sólo se presentan resultados para la fuerza axial.

**Análisis de resultados**

En la Tablas 3 y 4 se muestran los resultados para ambos edificios. Las respuestas  $r_x$ ,  $r_y$  y el término de correlación  $r_{xy}$  (Ec. 2) se calcularon utilizando resultados de SAP2000 [17]. Los coeficientes  $\alpha$  y  $\beta$  (Ec. 9), la respuesta crítica  $r_{cr}$  (Ec. 3) y las respuestas  $r_e$  para cada criterio de combinación (Ecs. 4-7) se determinaron y se presentan en la Tablas 3 y 4. Aun cuando los términos  $r_{xy}$  de las columnas a y b del Edificio 1 tienen signos distintos, las respuestas  $r_e$  y  $r_{cr}$  y por tanto los cocientes  $r_e / r_{cr}$  en la columna a son idénticos a los de la columna b debido a la simetría en la ubicación de estas columnas (Figura 4). Para el Edificio 1 (Tabla 3) el criterio SRSS subestima la respuesta crítica  $r_{cr}$  en 7%, mientras que los criterios SRSS-S, 30% y 40% la sobrestiman en menos del 9%. Aunque estas diferencias son relativamente pequeñas, debe señalarse que diferencias mayores, del orden de 19% de sobreestimación y 16% de subestimación, pueden ocurrir en

Tabla 3  
Valores para la fuerza axial en las columnas del Edificio 1

Columna	$r_x$ (Ton)	$r_y$ (Ton)	$r_{xy}$ (Ton <sup>2</sup> )	$\alpha$	$\beta$	$r_{cr}$ (Ton)	$r_e$ (Ton)				$r_e / r_{cr}$			
							S-SRSS	30%	40%	SRSS	S-SRSS	30%	40%	SRSS
a	1184,94	1071,44	0,66x10 <sup>6</sup>	0,52	0,90	1484,58	1597,63	1506,37	1613,52	1374,26	1,08	1,01	1,09	0,93
b	1184,94	1071,44	-0,66x10 <sup>6</sup>	-0,52	0,90	1484,58	1597,63	1506,37	1613,52	1374,26	1,08	1,01	1,09	0,93

Tabla 4  
Valores para las fuerzas en las columnas del Edificio 2

Columna	Fuerza	$r_x$ (Ton)	$r_y$ (Ton)	$r_{xy}$ (Ton <sup>2</sup> )	$\alpha$	$\beta$	$r_{cr}$ (Ton)	$r_e$ (Ton)				$r_e / r_{cr}$			
								S-SRSS	30%	40%	SRSS	S-SRSS	30%	40%	SRSS
a	axial	256	135	3960	0,11	0,53	271	290,0	297,0	310,0	271,0	1,07	1,10	1,14	1,00
a	corte-x	28,5	13,5	44,3	0,12	0,47	29,8	31,5	32,5	33,9	29,8	1,06	1,09	1,14	1,00
a	corte-y	7	61,3	-425,0	-0,99	8,76	61,7	61,7	63,4	64,1	61,5	1,00	1,03	1,04	0,99
b	axial	90,9	93,1	-774	-0,09	1,02	112	130,1	120,3	129,5	110,3	1,16	1,07	1,16	0,98
b	corte-x	10,6	12,7	-14,2	-0,11	1,20	14,5	16,5	15,9	16,9	14,5	1,14	1,10	1,17	1,00
b	corte-y	3,16	27,7	-86,7	-0,99	8,77	27,9	27,9	28,6	28,9	27,8	1,00	1,03	1,04	0,99



las fuerzas axiales en columnas de edificios simétricos con periodos más cercanos en sus direcciones principales X y Y [10]. Los resultados para el Edificio 2 (Tabla 4) indican que el mayor valor del cociente  $r_e/r_{cr}$  es 1.17 correspondiente a la fuerza cortante X de la columna b para el criterio del 40%.

Conviene destacar que todos los valores de  $r_e/r_{cr}$  mostrados en las Tablas 3 y 4 satisfacen las cotas indicadas en la Tabla 2 para los diferentes criterios de combinación.

### Conclusiones y Recomendaciones

1. Se analizaron expresiones que suministran las cotas superior e inferior de la respuesta  $r_e$  calculada según los diferentes criterios normativos, con relación a la respuesta crítica  $r_{cr}$  obtenida con el método CQC3, para sistemas elásticos. De allí se infiere que para valores realistas de la relación  $\gamma$  de espectros horizontales comprendidos entre 0,5 y 0,85, se tiene que la respuesta calculada con el criterio SRSS-S está comprendida entre 1 y 1,26 veces la respuesta crítica  $r_{cr}$ , la calculada con el criterio SRSS entre  $0,79 r_{cr}$  y  $1 r_{cr}$ , la obtenida con el criterio del 40% entre  $0,99 r_{cr}$  y  $1,25 r_{cr}$  y la calculada con el criterio del 30% entre  $0,92 r_{cr}$  y  $1,16 r_{cr}$ . Estas cotas son válidas para cualquier estructura y para espectros horizontales proporcionales entre sí, con cualquier forma espectral.

2. Se presentaron ejemplos de respuestas de edificios reales que se comportan entre los límites máximos y mínimos obtenidos para los cocientes  $r_e/r_{cr}$  para los diferentes criterios de combinación.

3. Aun cuando los criterios evaluados dan lugar a diferencias con el CQC3 que pueden juzgarse no excesivos, debemos destacar que este último conduce a diseños con una confiabilidad más uniforme en los valores de respuesta. Debe señalarse que el CQC3 es fácilmente implementable debido a que la respuesta crítica se puede obtener utilizando una fórmula explícita a partir de los mismos valores de respuesta modal obtenidos regularmente en el bien conocido método de análisis espectral.

### Agradecimiento

Este trabajo fue realizado gracias al financiamiento del Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela.

### Referencias Bibliográficas

1. International Conference of Building Officials (ICBO), "Uniform Building Code", Volume 2, Structural Engineering Design Provisions, Whittier, CA (1997).
2. FEMA-BSSC, "NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings, edition" (1998). FEMA302, B.S.S.C., Washinton D.C. (1997).
3. COVENIN, "Edificaciones Sismorresistentes", COVENIN 1756, Venezuela (1998).
4. Newmark, N.M., "Seismic Design Criteria for Structures and Facilities, Trans-Alaska pipeline system", U.S. National Conf. on Earthq. Engin., p. 94-103 (1975).
5. Rosenblueth, E. and Contreras, H., "Approximate Design for Multicomponent Earthquakes", Journal of Engineering Mechanics Division ASCE, 103, p. 895-911 (1977).
6. Clough, R., and Penzien, J., "Dynamics of Structures", 2<sup>nd</sup> Ed., McGraw-Hill (1993).
7. Smeby, W. and Der Kiureghian, A., Modal Combination Rules for Multicomponent Earthquake Excitation, Earthq. Engrg. & Struct. Dyn., 13, p. 1-12 (1985).
8. Lopez, O. A., and Torres, R., "The critical angle of seismic incidence and the maximum structural response." Earthq. Engrg. and Struct. Dyn., 26, 881-894 (1997).
9. Menun, C. and Der Kiureghian, A., "A Replacement for the 30%, 40% and SRSS Rules for Multicomponent Seismic Analysis", Earthquake Spectra, 14, N° 1 (1998).
10. López O. A., Chopra A. K. and Hernández J. J., "Critical response of structures to multicomponent earthquake excitation", Earthq. Engrg. and Struct. Dyn, Vol. 29, N° 12, 1759-1778 (2000).

11. Penzien, J. and Watabe, M., "Characteristics of 3-dimensional earthquake ground motion", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 3, p. 365-374 (1975).
12. López O. A. y Hernández J. J. "Response spectra for two horizontal seismic components and application of the CQC3-rule". 7<sup>th</sup> U.S National Conference in Earthquake Engineering, July 21-25, 2002, Boston (a ser publicado).
13. Wilson, E. L., Der Kiureghian, A. and Bayo, E.P., "A replacement for the SRSS method in seismic analysis", *Earthq. Engrg. and Struct. Dyn.*, 9, p. 187 - 194 (1981).
14. López, O. A., Chopra, A. K. and Hernández J. J. "Evaluation of combination rules for maximum response calculation in multicomponent seismic analysis", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics* Vol. 30, 1379-1398 (2001).
15. Krawinkler, H., "SAC Phase 2 Steel Project: System performances", Final Report to SAC Steel Program, California (1998).
16. Grases, J., López O. A. y Hernández J. J., "Edificaciones Sismorresistentes", Fundación J. J. Aguerrevere, 2<sup>a</sup> Edición, Caracas (1987).
17. Computers and Structures, Inc., "SAP2000", Berkeley, California (1997).

Recibido el 25 de Septiembre de 2000

En forma revisada el 10 de Julio de 2001