

EFFECTO DE LAS DIFERENTES COMPONENTES SÍSMICAS DE MOVIMIENTO SOBRE LAS NAVES INDUSTRIALES DE GRANDES LUCES

Daniel Ruiz¹

Alberto Sarria²

Resumen

Mediante análisis dinámicos contra el tiempo y análisis de "Pushover" se estudió el efecto de los sismos sobre las armaduras y demás elementos estructurales de las naves industriales de grandes luces. Se encontró que para este tipo de estructuras la componente sísmica vertical podría llegar a tener una importancia relativa en el campo cercano de los sismos. Así mismo se determinó que este tipo de estructuras presenta amortiguamientos con respecto al crítico y valores de R relativamente bajos. Finalmente se estableció que la variabilidad espacial de la onda sísmica representa una combinación de carga importante para este tipo de estructuras.

Palabras clave

Estructuras de grandes luces, análisis sísmico, campo sísmico cercano, componente sísmica vertical, amortiguamiento, coeficiente de reducción sísmica.

1. INTRODUCCIÓN

Las normas de diseño y construcción sismo resistente, fueron concebidas y elaboradas para el diseño de estructuras convencionales. Sin embargo las grandes construcciones elaboradas con elementos metálicos y que sirven de soporte a instalaciones, equipos y maquinaria netamente industriales no tienen un código de diseño específico. Por otro lado las normas de diseño sismo resistente, en la parte sísmica, consideran que las construcciones deben ser diseñadas generalmente para soportar las demandas que la componente sísmica horizontal genera sobre las construcciones civiles. Sin embargo existen evidencias, de acuerdo con los recientes terremotos de Kobe y de Northridge, que debe prestarse una mayor atención a la com-

ponente vertical de los sismos (Referencia [1]). En cuanto a la componente horizontal, es probable que las grandes luces que deben salvar las estructuras industriales generen problemas de altas distorsiones geométricas en la estructura metálica. Si a lo anterior se suma la posibilidad de que el coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico de estas instalaciones sea menor al utilizado convencionalmente (5 %), puede acarrear aspectos de análisis y diseño que no son tenidos en cuenta en el caso de estructuras convencionales.

2. COMPONENTE VERTICAL DE LOS SISMOS Y SU EFECTO EN LAS ESTRUCTURAS

En los últimos años se han presentado una serie de sismos (en especial el sismo de Northridge

¹ M.Sc Ing. Civil, Profesor Catedrático Dpto. Ing. Civil y Ambiental, Uniandes.

² Ingeniero Civil y Profesor Emérito de la Universidad de los Andes.

de 1994 y el sismo de Kobe) cuyos registros de aceleración vertical han presentado valores de aceleración bastante superiores a lo que tradicionalmente se había considerado. De acuerdo con la referencia [2] en el sismo de Northridge se presentaron aceleraciones verticales en el terreno de hasta 85% de la aceleración de la gravedad. Los espectros de respuesta de los sismos están relacionados con la distancia desde el epicentro hasta el punto donde se registra el acelerograma. De acuerdo con lo anterior, pueden establecerse tres campos de influencia de los sismos: campo cercano, campo intermedio y campo lejano. Cuando al anterior análisis se suma un análisis espectral tanto para pseudo-aceleración vertical como para pseudo-aceleración horizontal en función de la distancia, se puede elaborar un estudio detallado de la respuesta de las estructuras, tanto para el efecto vertical como horizontal, de la acce-

ción de los sismos teniendo en cuenta los campos cercano, lejano e intermedio. De acuerdo con lo anterior se realizó un análisis de los sismos más importantes de los últimos años en el mundo con mediciones realizadas en el campo cercano los cuales se presentan en las Figuras 1 y 2. En la Figura 1 se presenta el espectro de pseudoaceleración vertical y en la Figura 2 se presenta una relación entre el espectro de pseudoaceleración vertical (V) y el espectro de pseudoaceleración horizontal (H). Como puede observarse en algunos casos la aceleración espectral vertical llega a ser hasta 2 y 3 veces más grande que la aceleración espectral horizontal. Esto debe compararse con las recomendación de los códigos de diseño en los que se establece que la componente sísmica vertical debe aproximarse como los 2/3 de la aceleración espectral horizontal.

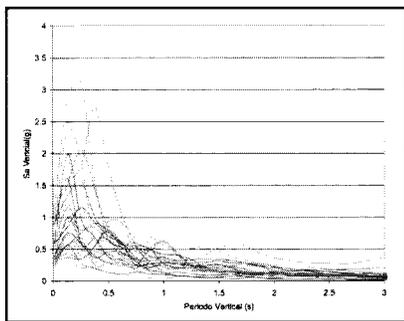


Figura 1. Espectros de aceleración vertical para los 30 sismos más fuertes de los últimos años en roca (Fuente NISEE)

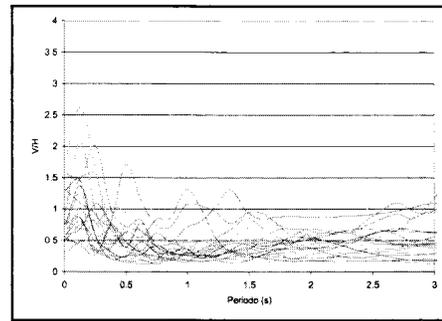


Figura 2. Espectros del cociente V/H en dirección Este-Oeste para los 30 sismos más fuertes de los últimos años. (Fuente NISEE)

Teniendo en cuenta que las naves industriales pueden presentar periodos de vibración vertical entre 0.1 y 0.5 segundos es probable que este tipo de estructuras puedan caer en el rango de la máxima amplificación del espectro de aceleración vertical.

3. AMORTIGUAMIENTO Y DISIPACIÓN DE ENERGÍA EN ESTRUCTURAS METÁLICAS SOMETIDAS A LA ACCCIÓN DE CARGAS DINÁMICAS

Después de la falla de diversas conexiones en estructuras metálicas durante el terremoto de

Northridge, los estudios e investigaciones fueron dirigidos a incrementar la capacidad rotacional de las conexiones parcialmente restringidas y de esta manera aumentar la capacidad de disipación de energía de los pórticos de acero. La energía impartida a una estructura por un terremoto es absorbida y disipada a través de diferentes mecanismos entre los cuales no se contaba la disipación generada por las conexiones parcialmente restringidas. De acuerdo con la referencia [3] se ha observado que las conexiones parcialmente restringidas son otra importante fuente de disipación de

energía. El término de disipación de energía asociado con este tipo de conexiones puede expresarse como se ilustra en la Ecuación 1.

$$E_C = \sum_{j=1}^k \int_{\theta_j}^{\theta_f} M d\theta \quad \text{Ecuación 1 [3]}$$

en donde M es el momento que se presenta en la conexión, θ corresponde a la rotación de la conexión y K es el número total de conexiones parcialmente restringidas. De acuerdo con lo anterior la referencia [3] encontró que las conexiones parcialmente restringidas eran capaces de disipar energía (amortiguamientos del orden de 1% o 2% con respecto al crítico) siempre y cuando se presentaran grandes deformaciones en el pórtico de acero. Otro aspecto importante está asociado con el coeficiente de reducción de la Fuerza Sísmica “ R ”. Teniendo en cuenta únicamente el valor al R asociado con el colapso de la estructura y usando lo expuesto en la referencia [4], la evaluación del R de sistemas depende de tres factores que tienen en cuenta tres diferentes contribuciones como se expresa en la ecuación 2:

$$R = R_s R_\mu R_\xi \quad \text{Ecuación 2 [4]}$$

en donde R_s = Factor de resistencia y se calcula como el máximo cortante basal dividido por el cortante basal de diseño a un nivel dado de esfuerzo, R_μ = Factor de ductilidad y se calcula como el cortante basal para una respuesta netamente elástica dividido por el máximo cortante basal y R_ξ = Factor de amortiguamiento que depende del amortiguamiento elástico esperado.

4. GRANDES ESTRUCTURAS INDUSTRIALES SUJETAS A MOVIMIENTOS EN LA BASE VARIABLES CON LA POSICIÓN

De acuerdo con la referencia [5], “las ondas sísmicas transmiten un estado de esfuerzos mediante complicadas trayectorias de las partículas del medio transmisor”. Estas ondas sísmicas presentan una variabilidad en función de la posición y del tiempo. No obstante es posible sim-

plificar el problema suponiendo que puede modelarse el fenómeno sísmico como una onda monocromática que cumple lo establecido en la Ecuación 3, en donde l corresponde a la longitud de onda, f corresponde a la frecuencia de vibración y V corresponde a la velocidad de onda.

$$V = \lambda f \quad \text{Ecuación 3}$$

Las velocidades más importante para el presente análisis corresponden a las velocidades de la onda de corte del suelo y las frecuencias corresponden al inverso de los periodos dominantes del estrato de suelo sobre el que se ubica la obra civil. Si una estructura tiene dimensiones en planta en el orden de magnitud de la longitud de onda de las ondas sísmicas es posible que se presente el fenómeno que se pretende esquematizar en la Figura 3, en donde algunos elementos estructurales están sometidos a movimientos sísmicos de igual magnitud pero de dirección contraria lo cual conlleva a efectos que poco o nada se han tenido en cuenta en el pasado.

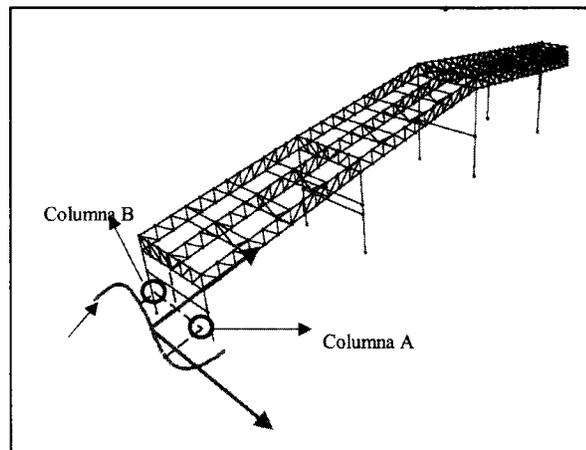


Figura 3. Efecto de la Variabilidad espacial de las ondas sísmicas sobre estructuras de grandes dimensiones en planta

5. ESTUDIO EN CASO: PLANTA INDUSTRIAL

La estructura Industrial que será estudiada fue diseñada por consultores internacionales y revisada por consultores nacionales de reconocida reputación. La planta estará ubicada en Bogotá. En la Figura 3 se presenta un módulo de tres cerchas típicas del sistema estructural. La

cercha fue diseñada originalmente considerando cargas sísmicas, cargas vivas, cargas muertas además de granizo y viento. La estructura está conformada por una serie de armaduras de acero espaciadas entre sí aproximadamente 12 metros. Cada una de las armaduras salva una luz total aproximada de 100 metros con luces intermedias de 25 metros de longitud aproximadamente. La planta tiene una longitud total de 204 metros y su punto más alto se encuentra a 18 metros del piso.

6. MODELACIÓN ANALÍTICA

El modelo analítico fue elaborado en el programa de análisis y diseño por elementos finitos

SAP 2000 Nonlinear. Algunos elementos fueron modelados de tal manera que fuesen capaces de transmitir el momento en sus extremos como es el caso de las columnas y el cordón superior e inferior de las cerchas de cubiertas mientras que otros elementos estructurales fueron modelados de tal manera que tomaran únicamente fuerza axial. Debe mencionarse que para los análisis dinámicos efectuados se consideró un amortiguamiento con respecto al crítico de 2% que puede llegar a corresponder al de este tipo de estructuras. Adicionalmente fueron consideradas las cargas que se presentan en la Tabla 1.

Tipo de Carga	Carga (kg/m ²)
Peso Propio	22.5
Peso de cubierta	17.5
Muerta (peso propio, cubierta y carga muerta)	60
Viva	50
Granizo	60

Tabla 1 Cargas aplicadas al modelo analítico computacional

7. CARGA SÍSMICA

Para el caso de la carga sísmica se llevaron a cabo dos tipos de análisis: en primer lugar se llevó a cabo un análisis espectral considerando el espectro de diseño (amortiguamiento de 5% con respecto al crítico) para cargas horizontales desarrollado específicamente para la Planta Industrial y con el cual fue diseñado por los consultores internacionales. Este espectro presenta una rampa con un valor de aceleración espectral de 0.65 g y se presenta en la Figura 4.

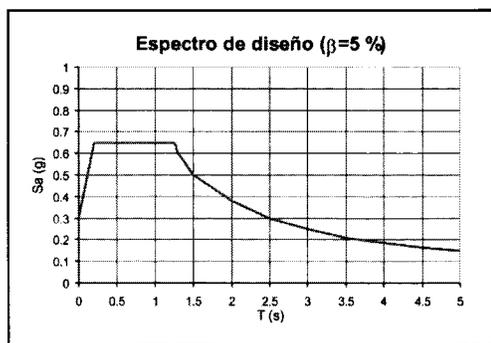


Figura 4. Espectro utilizado en el diseño de la estructura bajo estudio

En segundo lugar se realizó un análisis dinámico lineal en función del tiempo para lo cual se utilizaron los dos acelerogramas mostrados en la Figura 5 con el fin de representar las características del sismo cercano (vertical y horizontal). Estas señales fueron obtenidas modificando los acelerogramas utilizados en el estudio de Microzonificación Sísmica de la Ciudad de Bogotá (Referencia [6]) para simular el sismo cercano. Debe anotarse que el acelerograma en dirección vertical de la Figura 5 fue obtenido con base en el acelerograma en dirección horizontal modificando para este efecto la amplitud máxima y el contenido frecuencial. En la Figura 6 se presentan los espectros en pseudoaceleración para las anteriores señales.

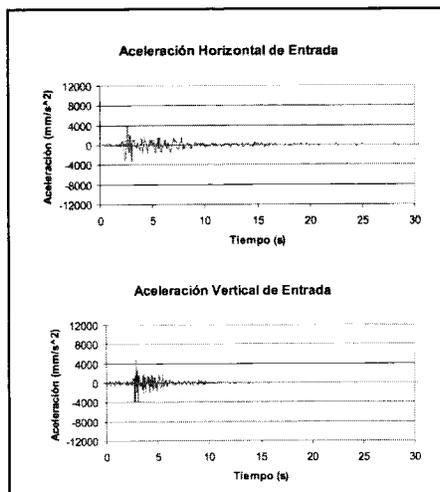


Figura 5. Acelerogramas horizontal y vertical utilizados en la modelación analítica

8. ANÁLISIS NI LINEAL DE «PUSHOVER»

Con el fin de establecer algunos mecanismo de colapso posibles de la estructura estudiada, se elaboró un modelo analítico computacional en el programa SAP 2000 a través de un análisis no lineal de "Pushover" en dirección horizontal. En la Figura 7 se presenta la curva resultante del análisis no lineal de "Pushover" en formato ADRS (Acceleration and Displacement Response Spectra) en el cual se grafica en el eje "Y" el cortante Basal transformado a aceleración espectral y en el eje "X" el desplazamiento máximo de la edificación transformado a desplazamiento espectral. Para el análisis se modelaron una serie de "rótulas plásticas" que estuviesen de acuerdo con el comportamiento estructural y la filosofía de funcionamiento de la estructura metálica considerando rótulas a flexocompresión y rótulas únicamente axiales.

Obsérvese que la estructura se comporta elástica hasta una aceleración espectral del orden de 1.2 g (y un desplazamiento espectral del orden de 100 mm) la cual es bastante superior a la aceleración original de diseño que fue de 0.65 g debido principalmente a que los diseñadores internacionales decidieron mantener índices de sobreesfuerzo bajos. Este aspecto justifica el hecho que se hayan realizado análisis dinámicos ELÁSTICOS de la estructura ante los

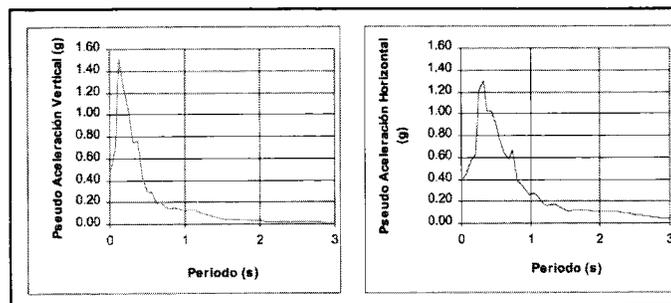


Figura 6. Comparación entre el espectro de pseudo aceleración en dirección horizontal y en dirección vertical

sismos seleccionados como representativos del campo cercano. Adicionalmente con base en el análisis de "Pushover" se estableció que el valor máximo de R de la estructura bajo estudio fue de 2.60. Este valor debe compararse con el valor de 3.65 propuesto por los ingenieros que diseñaron la planta industrial (consultores internacionales) y con el R de los códigos de diseño para pórticos resistentes a momentos (6.0 a 8.0).

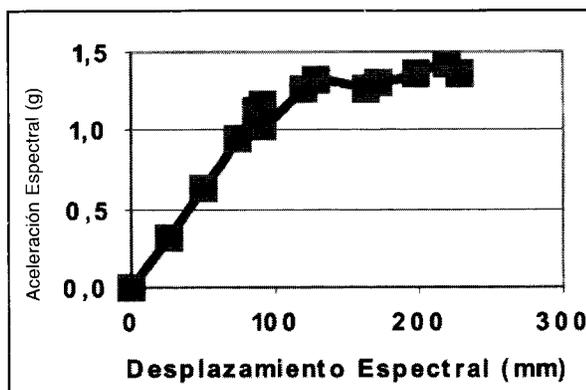


Figura 7. Curva de "Pushover" en formato ADRS

9. ANÁLISIS DE LAS COMBINACIONES DE CARGA

Con el fin de realizar análisis comparativos de las fuerzas de los elementos se consideraron varias combinaciones de carga usando análisis espectrales establecidos en la Norma NSR-98 y la Norma NEHRP así como combinaciones que involucran análisis dinámicos contra el tiempo mediante el uso de los acelerogramas presentados anteriormente. A continuación se pre-

sentan las principales combinaciones usadas para la revisión de las fuerzas internas en los elementos estructurales:

Gravitacional:	$1.2D + 1.6G + 0.5L$
THG:	$1.2D + 0.2G + TH_v + TH_h$
THL:	$1.2D + 0.5L + TH_v + TH_h$
THGSV:	$1.2D + 0.2G + TH_h$
THLSV:	$1.2D + 0.5L + TH_h$
Espectral NSR-98:	$1.2D + 0.2G + ES_v + ES_h$
	$1.2D + 0.5L + ES_v + ES_h$
Espectral NERHP:	$1.2D + 0.4D + ES_h$

En las anteriores combinaciones se tienen las siguientes convenciones:

D:Carga Muerta, G:Granizo, L:Carga Viva, TH_v:Análisis contra el tiempo en dirección Vertical, TH_h:Análisis contra el tiempo en dirección Horizontal, ES_h: Análisis espectral en dirección Horizontal,

ES_v:Análisis espectral en dirección Vertical = $(2/3) * (ES_h)$

En la Figura 8 se presenta una serie de diagramas de barra con los cuales se busca representar y comparar la carga axial generada en algunos de

los elementos estructurales de la estructura industrial bajo estudio. Se observa en general que la combinación de carga gravitacional NO controla el diseño de los elementos estructurales sino que por el contrario el diseño de los elementos estructurales está controlado por las combinaciones sísmicas y en particular por las denominadas THL y THG que corresponden a los sismos seleccionados como representativos del campo cercano. Por otro lado existe una diferencia apreciable entre la fuerza interna de los elementos estructurales cuando se considera sismo vertical en el análisis dinámico (THL o THG) y cuando no se considera la componente del sismo vertical (THLSV o THGSV). Para reafirmar la anterior observación se presenta en la Figura 9 una distribución porcentual para varios elementos estructurales del aporte de cada una de las cargas a la combinación de carga denominada THL que es la que controla en la mayoría de los casos la fuerza axial. Obsérvese que en su mayoría la fuerza está dada por la componente horizontal del sismo seguida de cerca por la componente vertical sísmica.

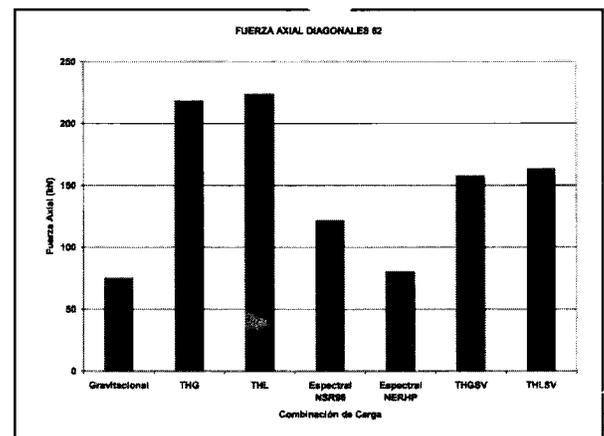
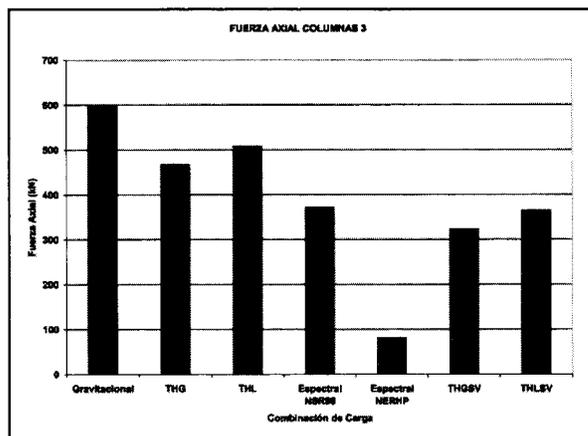


Figura 8. Diagramas de barra para la carga axial de algunos elementos generada por las diversas combinaciones de carga analizadas ($R=1.0$).

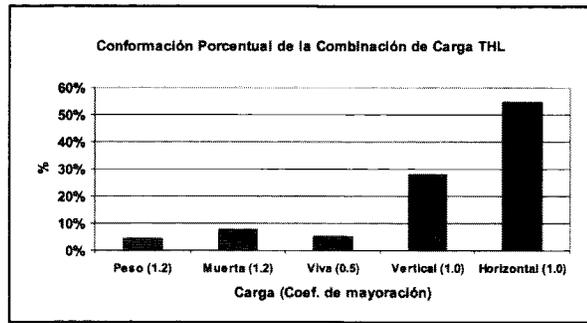
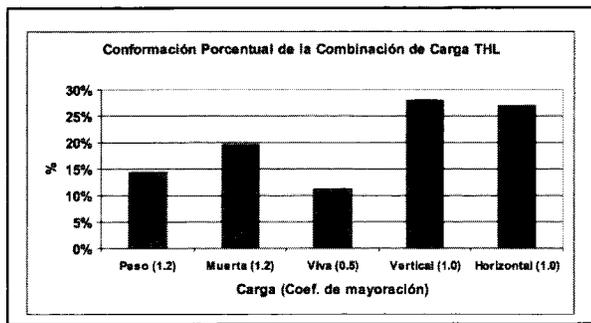


Figura 9. Distribución porcentual para varios elementos estructurales del aporte de cada una de las cargas a la combinación de carga THL (Fuerza Axial) ($R=1.0$)

10. ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA INDUSTRIAL SOMETIDA A MOVIMIENTOS EN LA BASE VARIABLES CON LA POSICIÓN PARA DIFERENTES TIPOS DE SUELO

Teniendo en cuenta que la estructura bajo estudio quedaría ubicada en Bogotá, se realizó un análisis considerando las condiciones del suelo particulares de esta ciudad. De acuerdo con el estudio de Microzonificación sísmica de la ciudad de Bogotá (complementado con información recientemente obtenida), se estableció para cada una de las zonas los espectros de respuesta en aceleración espectral que fueron obtenidos con base en la exploración geotécnica y la caracterización dinámica de los suelos en cada una de las exploraciones realizadas en dicho estudio.

Con base en los espectros de aceleración establecidos anteriormente para cada una de las zonas principales, se estimó el espectro de desplazamientos (S_d) para un amortiguamiento con respecto al crítico de 5% para cada una de

estas zonas mediante la siguiente relación:

$$S_d \approx \frac{S_a}{\omega^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

en donde S_a corresponde al espectro de pseudo aceleración y ω corresponde a la frecuencia angular de vibración del oscilador simple. Debe anotarse que para el análisis que se pretende realizar se necesitan los desplazamientos espectrales para el oscilador simple con un periodo de 0.56 segundos que corresponde al modo fundamental de vibración de la estructura. Así mismo se estableció con base en el mismo estudio los rangos de periodos dominantes de cada una de las zonas y se determinó la velocidad de onda de cortante promedio de cada una de ellas. Finalmente utilizando la ecuación 4 se determinó la longitud de onda promedio de la onda de cortante para cada una de las zonas principales del estudio de Microzonificación. En la Tabla 2 se resumen todos los anteriores aspectos.

ZONA DE LA CIUDAD	RANGO DE PERIODOS	DESPLAZAMIENTO ESPECTRAL PARA $\beta=5\%$ y $T=0.56$ s (cm)	VELOCIDAD DE ONDA "S" PROMEDIO DE LA ZONA (m/s)	LONGITUD DE ONDA PROMEDIO (m)
CERROS	0.30 s - 0.80 s	6.14	101	55
LACUSTRE A	0.70 s - 3.50 s	5.55	169	310
LACUSTRE B	0.70 s - 3.50 s	3.10	185	348
TERRAZAS Y CONOS	0.30 s - 3.00 s	4.99	154	260
PIEDEMONTES	0.40 s - 1.10 s	7.90	223	173

Tabla 2. Parámetros característicos de cada una de las zonas del estudio de Microzonificación para realizar el análisis simplificado de la variabilidad espacial de las ondas sísmicas

En el presente caso se pretende evaluar el efecto que se puede presentar en la estructura bajo estudio cuando una de las columnas de una de las cerchas está sometida a un desplazamiento igual pero de sentido contrario al de la cercha consecutiva tal como se ilustra en la Figura 3. La estructura se verá afectada más notoriamente por el efecto de la variabilidad espacial sísmica cuando la señal del sismo presente zonas en donde el desplazamiento relativo entre dos puntos consecutivos sea máximo lo cual se presenta cuando la longitud de la onda sísmica es mínima. Para las ondas sinusoidales monocromáticas la máxima pendiente relativa entre dos puntos se presenta cuando la onda cruza por cero, en cuyo caso una de las columnas queda sometida a un efecto “positivo” del sismo y la

columna consecutiva queda sometida a un efecto “negativo” del sismo. De acuerdo con lo anterior se presenta en la Tabla 3 los valores relativos de desplazamiento espectral a los que estarían sometidas dos cerchas consecutivas de la estructura industrial bajo estudio teniendo en cuenta que las armaduras están espaciadas entre sí aproximadamente 12 metros. En el presente caso la peor condición, de acuerdo con los análisis efectuados se presenta para la Zona Cerros, en donde se presentan los desplazamientos relativos más altos entre dos columnas separadas entre sí aproximadamente 12 metros como es el caso de la planta industrial bajo estudio. Con base en lo anterior se realizó el análisis estructural matricial de la estructura en cuestión al someter dos cerchas consecutivas a un desplazamiento igual pero de sentido contrario equivalente al que se presenta en la zona de Cerros (+/-3.88 cm). Estos desplazamientos relativos generan efectos de flexión alrededor del eje débil en los elementos que sirven de arriostramiento entre dos cerchas consecutivas.

Tabla 3. Desplazamientos entre dos columnas consecutivas (Ver Figura 3)

ZONA DE LA CIUDAD	DESPLAZAMIENTO COLUMNA A (cm)	DESPLAZAMIENTO COLUMNA B (cm)
CERROS	-3.88	3.88
LACUSTRE A	-0.60	0.60
LACUSTRE B	-0.30	0.30
TERRAZAS Y CONOS	-0.72	0.72
PIEDEMORTE	-1.71	1.71

Para ilustrar el anterior efecto se presenta a manera de comparación en la Figura 10 los índices de sobreesfuerzo generados en estos elementos para la combinación de carga gravitacional y para la combinación de carga que involucra únicamente el desplazamiento relativo de 3.88 cm correspondiente a la zona Cerros de la Microzonificación. En algunos elementos estructurales los índices de sobreesfuerzo para la condición de desplazamientos diferenciales de 3.88 cm fue del orden de 0.6, los cuales son

relativamente altos si se comparan con los índices de sobreesfuerzo para los mismos elementos considerando la condición gravitacional en donde se encuentran sobreesfuerzos del orden de 0.30. El anterior efecto podría llegar a acrecentarse si se tiene en cuenta que el análisis efectuado anteriormente corresponde a desplazamientos espectrales de osciladores simples con 5% de amortiguamiento con respecto al crítico y es probable que la estructura bajo estudio tenga amortiguamientos del orden de 2%.

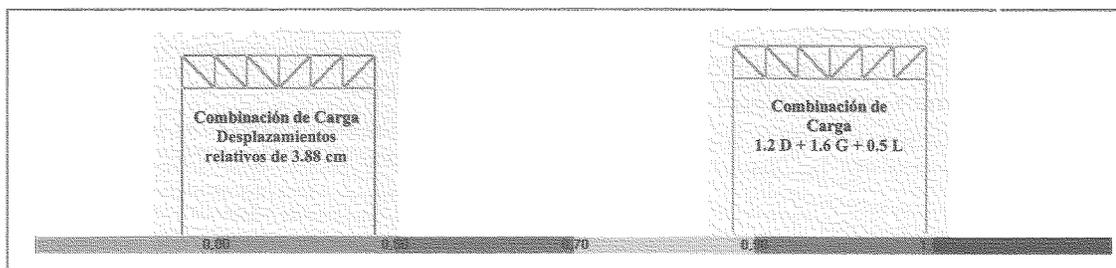


Figura 10. Comparación entre la combinación de carga gravitacional y la combinación de carga asociada con la variabilidad de espacial de las ondas sísmicas

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Para las combinaciones de carga analizadas en donde se consideró un análisis dinámico contra el tiempo, el mayor aporte corresponde a los efectos asociados con el sismo en dirección Horizontal. Sin embargo en segundo lugar y relativamente cercano al anterior se encuentra el efecto del sismo vertical el cual es superior en casi todos los casos al efecto generado por las cargas gravitacionales (peso propio, carga muerta, carga viva, granizo) como se observa en la Figura 11.

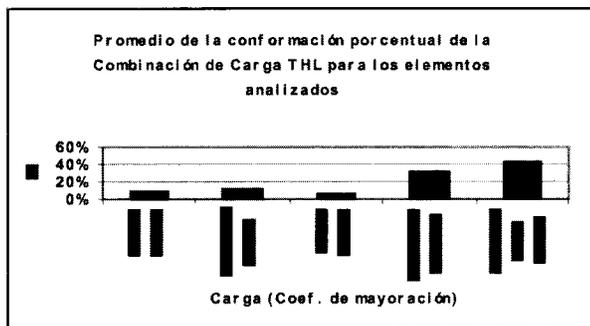


Figura 11. Promedio de la conformación porcentual de la combinación de carga THL

1. Es probable que las estructuras poco convencionales y de grandes dimensiones, poco redundantes, tengan un coeficiente de amortiguamiento con respecto al crítico inferior al 5% (en el orden del 1.5 % al 2 %) dado que la disipación de energía puede verse reducida al aporte de unos pocos elementos.

2. Con base en los análisis de "Pushover" elaborados es probable que el coeficiente de reducción R comúnmente utilizado en el diseño de pórticos resistentes a momentos (R en el orden de 6.0 a 8.0) se reduzca notablemente en el caso de estructuras metálicas industriales poco redundantes (R en el orden de 2.5).

3. El efecto generado por la variabilidad espacial de la onda sísmica, podría llegar a representar una combinación de carga importante para algunos elementos de las estructuras de grandes luces.

12. REFERENCIAS

1. EERI (Earthquake Engineering Research Center). Northridge Earthquake January 17, 1994. Preliminary Reconnaissance Report. 1994
2. BOZORGNIA-Yousef, MANSOUR-Niazi, CAMPBELL Kenneth.. Characteristics of Free-Field Vertical Ground Motion during the Northridge Earthquake. Earthquake Spectra, Volume 11, N° 4, . Noviembre de 1995. Pag 515-525
3. HALDAR Achintya, REYES-SALAZAR Alfredo. Dissipation of Energy in Steel Frames under dynamic Loading. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Paper number 0458.
4. ATC-19 (Applied Technology Council). Structural response modification factors. 1995
5. SARRIÁ Alberto. Ingeniería Sísmica. Ediciones Uniandes, 1995.
6. INGEOMINAS, UPES, UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Microzonificación Sísmica de Santa Fe de Bogotá. 1997.
7. AIS. Normas Colombianas de Diseño y Construcción Sismo Resistente NSR-98.
8. ATC-40, Applied Technology Council. Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. 1996.
9. BOZORGNIA-Yousef, CAMPBELL Kenneth, NIAZI Mansour. Observed Spectral Characteristics of Vertical Ground Motion Recorded During Worldwide Earthquakes from 1957 to 1995. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Paper number 2671
10. BOZORGNIA-Yousef, CAMPBELL Kenneth, MANSOUR-Niazi,. Vertical Ground Motion: Characteristics, Relationship with horizontal component, and Building-Code Implications. Proceedings of the SMIP99 Seminar on Utilization of Strong Motion Data, September 15, 1999, Oakland, Calif, pp. 23-49.
11. BOZORGNIA-Yousef, MAHIN Stephen, BRADY Gerald. Vertical Response of Twelve Structures Recorded during the Northridge Earthquake. Earthquake Spectra, Volume 14, N° 3, . Agosto de 1998. Pag 411-432
12. DAALI Mohamed, URBAN Otakar. Seismic Evaluation and Retrofit of Industrial Buildings. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Paper number 1275.
13. EERI (Earthquake Engineering Research Center). Preliminary Report on the Seismological and Engineering Aspects of January 17, 1994 Northridge Earthquake. Report UCB/EERC-94/01. Enero 1994.

14. EERI (Earthquake Engineering Research Center). The Hyogo-Ken Nanbu Earthquake, January 17, 1995. Preliminary Reconnaissance Report. 1995
15. NEHRP (National Earthquake Hazard Reduction Program). Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings. Part 1 – Provisions. 1994
16. REYES-SALAZAR Alfredo, HALDAR Achintya. Consideration of Vertical Acceleration and Flexibility of Connections on Seismic Response of Steel Frames. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering. Paper number 1171.
17. CSI – Computers and structures, Inc. SAP 2000, Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. 1999.