

Influencia de las aceleraciones sísmicas verticales en superestructuras de puentes de carreteras de luces medianas de hormigón armado

JOSÉ MARÍA RUIZ RUIZ (*) y GUILLERMO GODINEZ MELGARES (**)

RESUMEN En el presente trabajo se realiza un estudio acerca de la influencia de las aceleraciones sísmicas verticales en puentes de vigas continuas de hormigón armado con diafragmas. Se analizaron 24 variantes de puentes, considerando como parámetros variables: combinaciones de luces, número de tramos, cantidad y posición de diafragmas en el puente y la posición de la carga accidental N-30. El análisis fue realizado a través del método de análisis modal simplificado como método del espectro de respuesta y empleando como fórmula de superposición modal la CQC. Para la modelación de las acciones sísmicas horizontales se utilizó el espectro de diseño establecido por la norma sísmica cubana para el tipo suelo S2 y las condiciones de sismicidad de la provincia de Santiago de Cuba y para las verticales el espectro de diseño obtenido según las consideraciones planteadas en el Eurocode 8. Se realizaron comparaciones en términos de magnitudes globales de la respuesta estructural y en términos de características locales de respuesta en elementos aislados. Finalmente se arribó a las conclusiones expresadas en el trabajo.

INFLUENCE OF THE VERTICAL SEISMIC ACCELERATIONS IN SUPER STRUCTURES OF HIGHWAYS BRIDGES OF MEDIUM SPANS OF REINFORCED CONCRETE

ABSTRACT *In this paper is presented a work in which is carried out a study about the influence of the vertical seismic accelerations in bridges of continuous beams of reinforced concrete with diaphragms. 24 variants of bridges were analyzed, considering as variable parameters: combinations of spans, number of bays, quantity and position of diaphragms in the bridge and the position of the live moving load N-30. The analysis was carried out through the method of modal analysis simplified as response spectrum method and using the CQC as modal superposition formula. For the modelling of horizontal seismic loads it was used the design spectrum established by the Cuban seismic code for soil condition S2, and the seismic hazard level given for conditions of Santiago de Cuba region, and for the vertical ones the design spectrum was obtained according to the considerations established by the Eurocode 8. Several comparisons were carried out in terms of global magnitudes of the structural response and in terms of local characteristics of response in isolated elements. Finally are presented the conclusions of the work.*

Palabras clave: Fricción superficial, Rugosidad, Materiales compuestos.

Keywords: Skin friction, Roughness, Composites.

1. INTRODUCCIÓN

Las experiencias vividas en diferentes países a consecuencia de eventos sísmicos de grandes proporciones, han dejado un saldo fatídico evaluado en miles de muertes y daños materiales incalculables, que han obligado al hombre a crear cons-

trucciones cada vez menos vulnerables, de manera que sean capaces de resistir estos movimientos, los cuales se caracterizan por poseer tres componentes principales de acción, dos en el plano horizontal y una en la dirección vertical, la cual en ocasiones toma valores iguales e incluso mayores que las horizontales y que, de no ser consideradas en el análisis y diseño, provocaría daños mayores a las estructuras.

La norma de sísmica cubana (NC 46:1999) tiene en cuenta, al igual que otros códigos de referencia internacional (IBC, 2003), para el análisis y diseño estructural, en general, sólo las componentes horizontales, y considerándose las componentes verticales solamente en algunos casos particulares, como estructuras de grandes luces (mayores de 20m), elementos pretensados horizontales, voladizos y balcones, construcciones en arcos con altas compresiones, columnas de hormigón armado y muros tímpanos de cortantes sometidos a grandes fuerzas cor-

(*) Ingeniero Civil, Profesor Auxiliar. Jefe de Disciplina de Análisis y Diseño de Estructuras. Facultad de Construcciones. Universidad de Oriente. Ministerio de Educación Superior. Calle 3ra No. 404 Altos, e/ G y H. Reparto Sueño. Santiago de Cuba. Cuba. Email: josem@fco.uo.edu.cu

(**) Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular. Facultad de Construcciones. Universidad de Oriente. Ministerio de Educación Superior. Edificio 19-A. Apartamento 2. Micro II. Centro Urbano Abel Santamaría. Santiago de Cuba. Cuba. Email: godinez@fco.uo.edu.cu

tantes, así como en puentes con articulaciones; para cada uno de estos casos se recomienda aplicar fuerzas verticales dispuestas en el sentido y posición más desfavorables con un valor fijo de $0.7 - 1.0 W$, siendo W el peso del elemento analizado. De esta forma las componentes verticales que se utilizan en el diseño, además de considerarse en casos limitados, no se obtienen como resultado del análisis ni son dependientes de la respuesta dinámica de la estructura ni evaluadas a partir de un espectro de diseño para las aceleraciones verticales, lo cual podría conducir a realizar diseños no seguros de las estructuras en general y de los puentes en particular.

Por tanto surgió la necesidad de realizar una investigación en puentes con diafragmas hiperestáticos continuos que permitan evaluar la significación del efecto producido por la componente vertical de las aceleraciones sísmicas en la respuesta estructural y de esta forma garantizar una adecuada seguridad sísmica de la estructura contribuyendo así a evitar grandes pérdidas de vidas humanas y cuantiosos daños económicos con sus desastrosas consecuencias en la sociedad y el medio ambiente.

Por todo lo expresado anteriormente, se propuso en este trabajo como **objetivo general**: evaluar la significación del efecto producido por la componente vertical de las aceleraciones sísmicas en la respuesta estructural, en términos de magnitudes de respuesta globales y en términos de solicitaciones en elementos aislados de la superestructura de puentes de carretera de hormigón armado hiperestáticos continuos con diafragmas, para los niveles de peligro establecidos en el código sísmico cubano para la provincia de Santiago de Cuba.

2. DESARROLLO

Para dar cumplimiento al objetivo propuesto en la presente investigación se establecieron una serie de consideraciones a fin definir las características fijas y variables de las estructuras que conforman la población a estudiar.

Parámetros fijos:

Como parámetros fijos fueron considerados: el material de los elementos estructurales, el uso y tipología de la estructura, longitudes de las luces extremas e intermedias y alturas de

pilas y estribos, nivel de peligrosidad sísmica, tipo de suelo y espectros de diseño (horizontal y vertical). A continuación se detallan cada uno de estos parámetros.

Material:

En todos los casos se consideró que los elementos de la superestructura y de la subestructura son de hormigón armado con una resistencia característica a compresión de 30.0 MPa.

Uso de la estructura:

Se trata de estructuras de puentes de carretera (NC 53-125:1984) de dos sendas de tránsito, se concibe con un fin social, que clasifica en la norma sísmica cubana como obra de importancia media (tipo 3), a las que corresponde un valor de coeficiente de importancia $I=1.0$, coeficiente que tiene en cuenta el riesgo sísmico en función de la importancia de la obra (NC 46: 1999).

Tipología estructural:

La superestructura del puente esta compuesta por vigas continuas de 14 m en luces extremas y 20 m en la luz o luces centrales, sobre la cual se halla la losa de tablero del puente, superficie de rodadura asfáltica y los pretilos, con un ancho de 10 m, carriles de 3.25 m, con diafragmas transversales ubicados en la o las luces centrales. Esta superestructura se apoya sobre pilas y estribos en forma de pórticos conformados por vigas cabezales y columnas cuyas alturas son de 7 m en pilas y 6 m en estribos, los cuales resisten el 100% de la fuerza sísmica horizontal, que determinan que la estructura clasifica como tipo I según el código sísmico cubano.

Nivel de peligrosidad sísmica:

Para fines de aplicación de la norma sísmica cubana, el territorio nacional ha sido dividido en 4 zonas, las cuales se indican en el mapa de zonificación sísmica (Figura 1) con fines de ingeniería que se muestra (NC 46:1999). A cada zona se le asigna un valor de aceleración máxima horizontal, esperada en el sitio, expresada como fracción de la gravedad.

La obra se concibió para ser emplazada en la ciudad de Santiago de Cuba, perteneciente a la zona 3 que clasifica como de alto peligro sísmico, donde se pueden esperar daños graves en las construcciones, debiéndose tomar medidas sis-

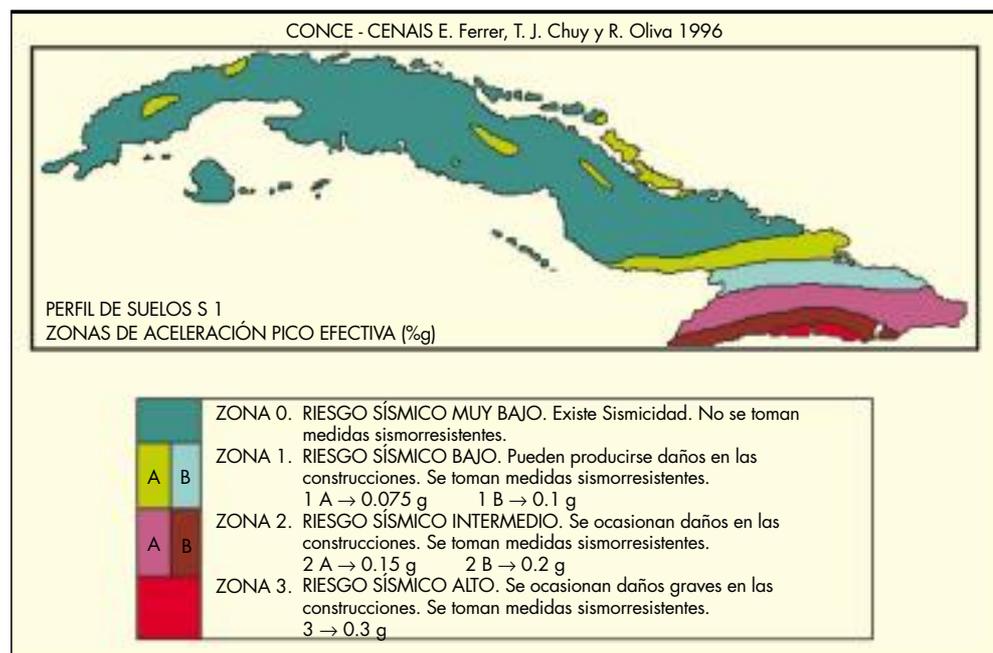


FIGURA 1. Mapa de zonificación sísmica de Cuba con fines de ingeniería.

morresistentes en estructuras y obras en función de la importancia de las mismas. La aceleración horizontal máxima del terreno para el cálculo (A) será de 0.3 g.

Tipo de suelo:

En todos los casos se consideró que el suelo para el cual se realizó el análisis es del tipo S2, que corresponde a suelos constituidos por depósitos estables de suelos no cohesivo o arcillas duras cuando su profundidad hasta la base rocosa excede los 60 m, y los estratos superiores están compuestos por arenas gravas o arcillas duras (este material puede caracterizarse por una velocidad de propagación de la onda de cortante entre 24 y 45 m/seg.), sus períodos están comprendidos entre 0.5 seg y 0.8 seg (NC 46:1999).

Espectros de diseño:

Para la construcción del espectro diseño de aceleraciones horizontales, se tomaron las formulaciones y los valores establecidos para un suelo tipo S2 (NC 46:1999)

El coeficiente sísmico espectral C se determina por la siguiente expresión:

$$C = \frac{1.2AS}{T^{2/3}}$$

Donde:

- A: es la aceleración horizontal máxima del terreno esperada en el sitio de emplazamiento de la obra, expresada como fracción de la gravedad.
- S: es el coeficiente de sitio correspondiente al perfil de suelo en el sitio de emplazamiento de la obra.
- T: es el período correspondiente al modo analizado de la estructura del puente en segundos.

Para la construcción del espectro diseño de aceleraciones verticales, se consideró que: a menos que estudios específicos indiquen lo contrario, la componente vertical de la acción sísmica debe ser representada por el espectro de respuesta definido para la acción sísmica horizontal, pero con las coordenadas reducidas como sigue (Eurocode 8):

- Para períodos de vibración T menores que 0.15 seg la ordenada es multiplicada por el factor (0.7).
- Para períodos de vibración T mayores que 0.5 seg la ordenada es multiplicada por el factor (0.5).
- Para períodos de vibración T entre 0.15 y 0.5 seg debe utilizarse una interpolación lineal.

En la Figura 2, aparecen los gráficos de las funciones correspondientes a estos espectros de aceleraciones de diseño.

Parámetros variables:

Fueron considerados como parámetros variables: la cantidad de luces intermedias, la cantidad y posición de los diafragmas transversales en las luces centrales y las posibles posiciones críticas de la carga accidental móvil N-30.

Fueron considerados dos casos de combinaciones de luces:

- Una luz central de 20.0 m y dos extremas de 14.0 m (N1).
- Dos luces centrales de 20.0 m y dos extremas de 14.0 m (N2).

Posiciones de los diafragmas: Fueron consideradas tres variantes de posiciones:

- En los apoyos (2D).
- En los apoyos y en el centro de la luz o luces (3D).
- En los apoyos, el centro y en el cuarto de la luz o luces (5D).
- En el caso de estudio, es importante señalar que, solamente fue considerada como carga accidental móvil la definida como N30 (NC 125:1984), ya que la combinación con la carga ecológica de sismo constituye una combinación especial, tipo este de combinación que es excluyente para la otra posible carga accidental móvil definida como NK80, la cual sólo admite combinación principal (Valdés, 1990). Fueron consideradas cinco posiciones para las variantes de puentes de una luz intermedia y tres posiciones para las variantes de puentes con dos luces intermedias, estas posiciones se muestran esquemáticamente en la Figura 3.

De la combinación de los diferentes parámetros variables considerados resultan 24 posibles variantes de modelos para el análisis, que son mostradas en la Tabla 1.

Modelo físico para el análisis:

Para el estudio de las variantes se considera un modelo espacial de la estructura que toma en cuenta todas las deformaciones existentes en cada uno de los elementos componentes de la misma y para la modelación de las acciones sísmicas se considera un modelo de masas discretas simulando el efecto de la distribución de estas en la superestructura del puente para la variante en estudio, con tres grados de libertad dinámicos

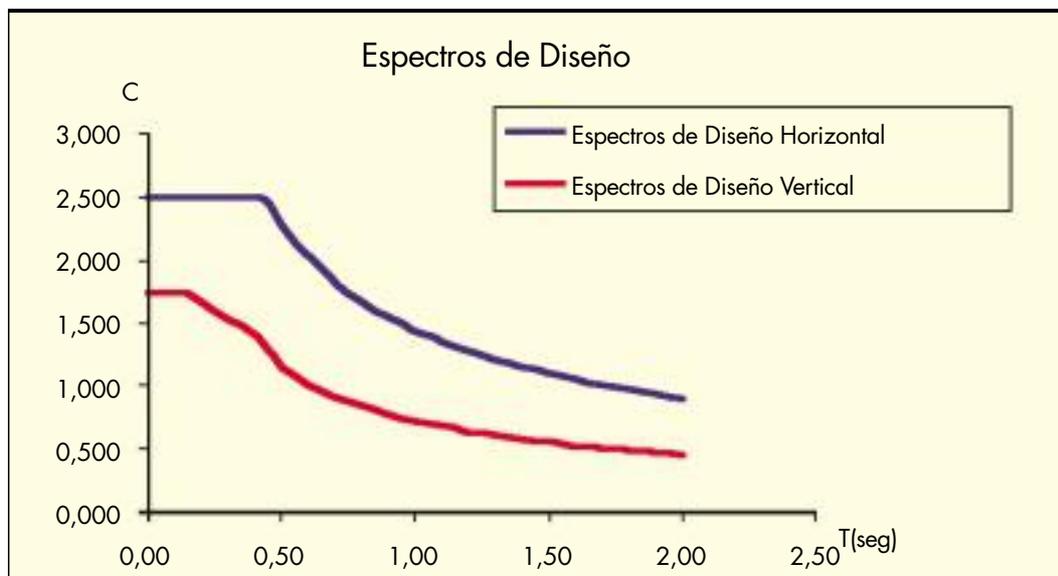


FIGURA 2. Espectros de diseño de aceleraciones horizontales y verticales.

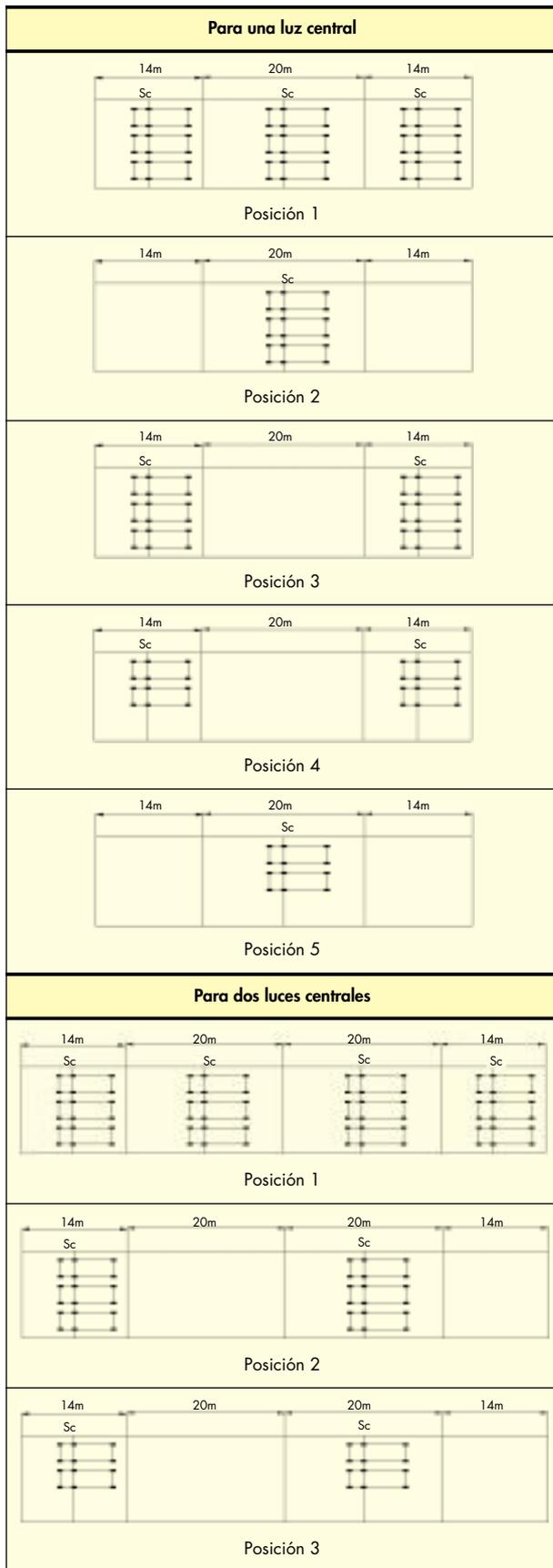


FIGURA 3. Posibles posiciones críticas de la carga N30 consideradas.

No	Luz Inter. (m)	Luz Extrea (m)	Código	Posición Carga N30
1	1(20)	2(14)	L14+20+14(2DN30-1)	1
2	1(20)	2(14)	L14+20+14(3DN30-1)	1
3	1(20)	2(14)	L14+20+14(5DN30-1)	1
4	1(20)	2(14)	L14+20+14(2DN30-2)	2
5	1(20)	2(14)	L14+20+14(3DN30-2)	2
6	1(20)	2(14)	L14+20+14(5DN30-2)	2
7	1(20)	2(14)	L14+20+14(2DN30-3)	3
8	1(20)	2(14)	L14+20+14(3DN30-3)	3
9	1(20)	2(14)	L14+20+14(5DN30-3)	3
10	1(20)	2(14)	L14+20+14(2DN30-4)	4
11	1(20)	2(14)	L14+20+14(3DN30-4)	4
12	1(20)	2(14)	L14+20+14(5DN30-4)	4
13	1(20)	2(14)	L14+20+14(2DN30-5)	5
14	1(20)	2(14)	L14+20+14(3DN30-5)	5
15	1(20)	2(14)	L14+20+14(5DN30-5)	5
1	2(20)	2(14)	L14+20+20+14(3DN30-1)	1
2	2(20)	2(14)	L14+20+20+14(6DN30-1)	1
3	2(20)	2(14)	L14+20+20+14(10DN30-1)	1
4	2(20)	2(14)	L14+20+20+14(3DN30-2)	2
5	2(20)	2(14)	L14+20+20+14(6DN30-2)	2
6	2(20)	2(14)	L14+20+20+14(10DN30-2)	2
7	2(20)	2(14)	L14+20+20+14(3DN30-3)	3
8	2(20)	2(14)	L14+20+20+14(6DN30-3)	3
9	2(20)	2(14)	L14+20+20+14(10DN30-3)	3

TABLA 1. Variantes de modelos para el análisis.

(desplazamiento en X, Y y Z). Las cargas sísmicas fueron calculadas haciendo uso del método de análisis modal simplificado como método del espectro de respuesta y como fórmula de superposición modal la combinación cuadrática completa, conocida como CQC, se consideraron tantos modos como fueron necesarios para asegurar un factor de masa participativa mayor que el 95% (Clough, 1982; Chopra, 1995) en todas las direcciones analizadas en las variantes, es decir, en las dos direcciones horizontales y la dirección vertical, el análisis de las variantes fue resuelto con el empleo del software profesional SAP 2000 versión 8.3.3, el cual es considerado como uno de los líderes a nivel internacional en el campo de la Ingeniería Sísmica (Wilson, 2000). En la Figura 4, se muestra, a modo de ejemplo, el modelo físico de una de las variantes de puentes analizadas en el trabajo.

En la investigación fueron considerados dos grupos de combinaciones de cargas, en el primero se incluyen las cargas gravitatorias (NC 283: 2003) (con los coeficientes correspondientes) (NC 450: 2006) y las cargas debidas a las tres componentes de las aceleraciones sísmicas (vertical y dos horizontales) de manera tal que se supone el 100% de la acción en una de las direcciones y el 30% en las dos restantes (Eurocode 8) y en segundo se incluyen las mismas cargas gravitatorias y las cargas debidas solamente a las componentes horizontales de tal manera que se supone el 100% de la acción en una de las direcciones y el 30% en la otra (NC 46:1999).

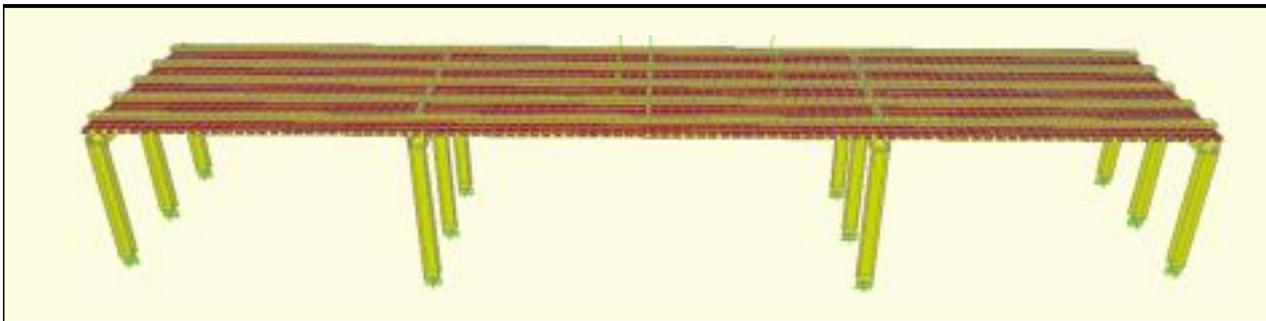


FIGURA 4. Modelo físico para el análisis de una de las variantes estudiadas.

Las magnitudes de respuesta producidas por las combinaciones del primer grupo se identifican en las tablas y figuras de resultados como “Con Az” y las producidas por las combinaciones del segundo grupo se identifican como “Sin Az”, haciendo alusión a la presencia o no en la combinación de las cargas producidas por la componente vertical de las aceleraciones sísmicas.

Análisis de los resultados:

A fin de evaluar la influencia de la componente vertical de las aceleraciones sísmicas en la respuesta estructural en las variantes de puentes estudiadas, se comparó los niveles de demanda sísmica para los dos casos de combinaciones considerados, es decir, con la presencia de las tres componentes de aceleraciones (vertical y las dos horizontales) y con la presencia solamente de las componentes horizontales, seleccionando como magnitudes de respuesta características de la demanda sísmica:

- Momentos flectores y fuerzas cortantes en los apoyos.
- Momentos flectores y fuerzas cortantes correspondientes a la sección crítica de las luces extremas.
- Momentos flectores correspondientes a la sección crítica de la luz o luces intermedias.

Estas magnitudes de respuesta fueron evaluadas en términos globales, es decir, en la sección transversal de puente, y en términos locales para las vigas aisladas solicitadas con valores extremos.

Los resultados obtenidos se sintetizan y son mostrados a continuación en las Tablas 2, 3 y 4 y las Figuras 5, 6 y 7 para las magnitudes de respuesta en términos globales y en las Tablas 5, 6 y 7 y las Figuras 8, 9 y 10 para las magnitudes de respuesta en términos locales.

3. CONCLUSIONES

El hecho de considerar en el análisis sísmico, la presencia de la aceleración vertical conduce a las siguientes conclusiones en las variantes y casos analizados:

1. En términos de solicitaciones globales:
 - a. Se producen incrementos de entre un 39.62% a un 96.14% de los momentos flectores máximos en las secciones transversales analizadas (secciones críticas en el apoyo, en la luz o luces intermedias y en la luz extrema). Observándose que los mayores incrementos de los momentos flectores en el apoyo se producen para las variantes con una sola luz central y dos diafragmas, en el caso de los momentos flectores en la luz central los mayores incrementos se producen cuando existen dos luces centrales y dos diafragmas y para el caso de los momentos flectores en la luz extrema los mayores incrementos se producen para la condición de dos luces centrales y cinco diafragmas.

Variantes	Incrementos de (M) en %	Incrementos de (V) en %
	Con Az/Sin Az	Con Az/Sin Az
2DN1	46.584	48.309
3DN1	46.206	48.337
5DN1	45.816	48.423
2DN2	39.622	34.492
3DN2	39.723	34.633
5DN2	39.730	34.645

TABLA 2. Incremento de solicitaciones en sección crítica del puente. Apoyo.

Variantes	Incrementos de (M) en %	Incrementos de (V) en %
	Con Az/Sin Az	Con Az/Sin Az
2DN1	58.888	60.682
3DN1	60.274	60.223
5DN1	61.873	59.757
2DN2	95.563	60.373
3DN2	95.831	60.448
5DN2	96.142	60.408

TABLA 3. Incremento de solicitaciones en sección crítica del puente. Luz extrema.

Variantes	Incrementos de (M) en %
	Con Az/Sin Az
2DN1	42.868
3DN1	42.429
5DN1	42.754
2DN2	48.513
3DN2	48.423
5DN2	48.356

TABLA 4. Incremento de solicitaciones en sección crítica del puente. Luz central.

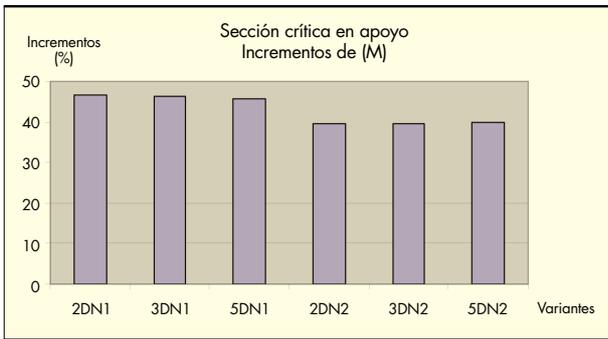


FIGURA 5A.

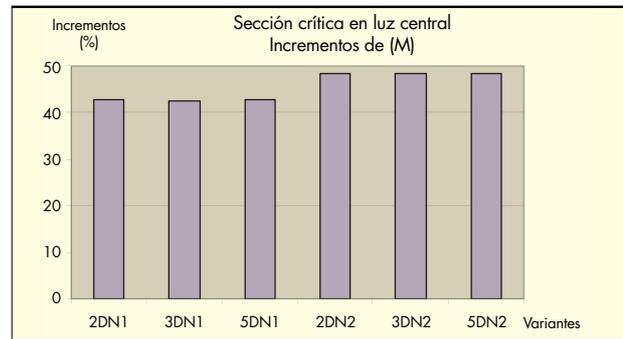


FIGURA 7.

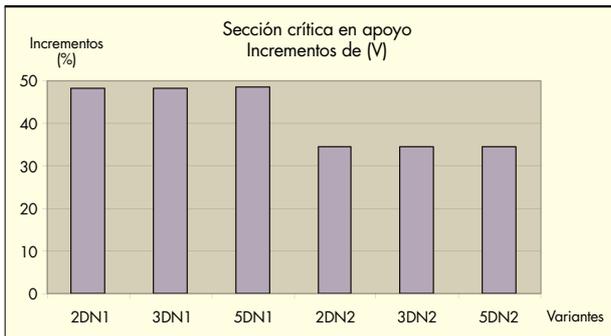


FIGURA 5B.

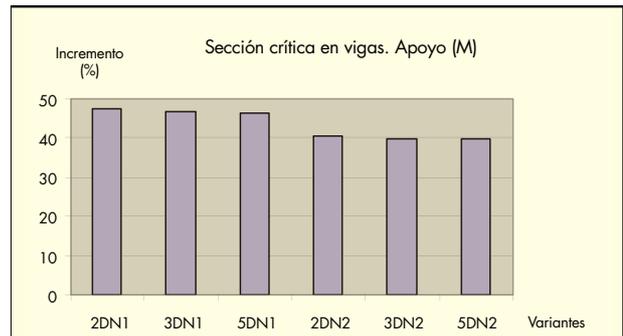


FIGURA 8A.

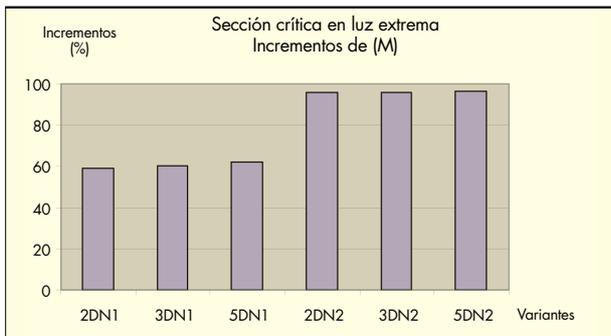


FIGURA 6A.

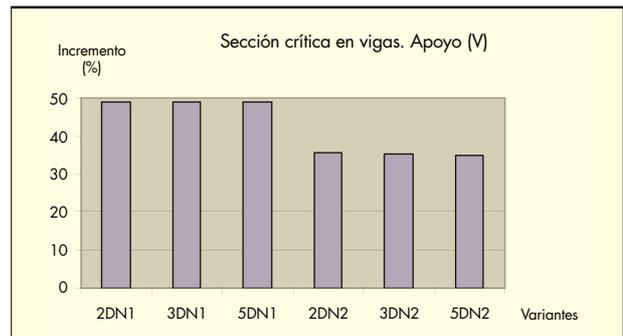


FIGURA 8B.



FIGURA 6B.

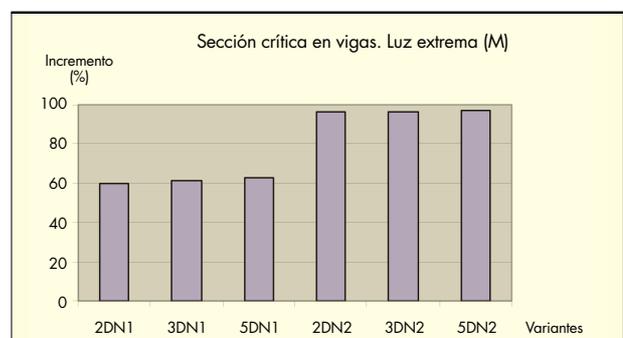


FIGURA 9A.

b. Se producen incrementos de entre un 34.49% a un 60.68% de las fuerzas cortantes máximas en las secciones transversales analizadas (secciones críticas

en el apoyo, y en la luz extrema). Observándose que los mayores incrementos de las fuerzas cortantes en el apoyo se producen para las variantes con una sola

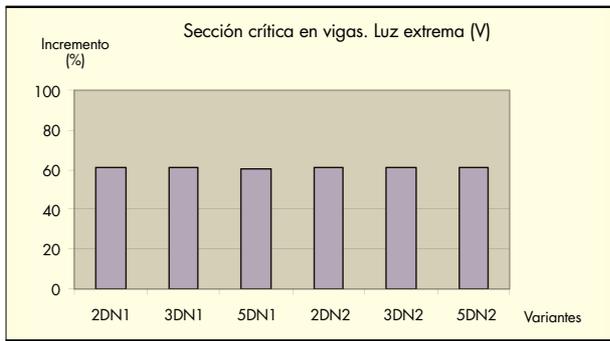


FIGURA 9B.

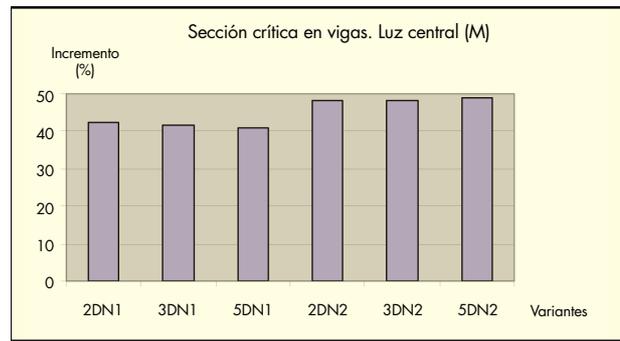


FIGURA 10.

Variantes	Incrementos de (M) en %	Incrementos de (V) en %
	Con Az/Sin Az	Con Az/Sin Az
2DN1	47.502	49.027
3DN1	46.843	48.789
5DN1	46.365	48.752
2DN2	40.482	35.774
3DN2	39.954	35.098
5DN2	39.749	34.800

TABLA 5. Incremento de solicitaciones en sección crítica en vigas. Apoyo.

Variantes	Incrementos de (M) en %
	Con Az/Sin Az
2DN1	42.356
3DN1	41.691
5DN1	40.915
2DN2	48.323
3DN2	48.181
5DN2	48.912

TABLA 7. Incremento de solicitaciones en sección crítica en vigas. Luz central.

Variantes	Incrementos de (M) en %	Incrementos de (V) en %
	Con Az/Sin Az	Con Az/Sin Az
2DN1	60.017	61.469
3DN1	61.354	60.890
5DN1	62.928	60.472
2DN2	96.229	61.044
3DN2	96.553	61.079
5DN2	96.849	61.121

TABLA 6. Incremento de solicitaciones en sección crítica en vigas. Luz extrema.

luz central y cinco diafragmas y para el caso de las fuerzas cortantes en la luz extrema los mayores incrementos se producen para la condición de una luz central y dos diafragmas.

- En términos locales de elementos aislados se observa que los intervalos de incrementos de solicitaciones de momentos flectores y fuerzas cortantes, y las condiciones en que se producen son semejantes a las correspondientes a las obtenidas para las condiciones globales.
- Se evidenció que la cantidad y posición de los diafragmas no modificó significativamente la respuesta estructural en términos globales ni locales en las variantes estudiadas, obteniéndose que las magnitudes de los momentos torsores de los diafragmas son relativamente pequeños, pudiéndose concluir que los diafragmas no están comprometidos de manera significativa en términos de demanda sísmica, sino que su función radica en la adecuada rigidización transversal del puente.

- Como aspecto final se puede concluir, por los niveles de significación obtenidos, que las aceleraciones sísmicas verticales constituyen un factor muy importante que debe ser tenido en cuenta a la hora de realizar el diseño de superestructuras de puentes de luces medianas, aspecto no contemplado en el código cubano vigente.

4. BIBLIOGRAFÍA

Chopra, A. (1995): Dynamics of structures. Theory and applications to earthquake Engineering. Editorial Prentice Hall. USA.

Clough, R.; Penzien, J. (1982): Dynamics of structures. Editorial Mc Graw-Hill. USA.

Eurocode 8. (1998): Design provisions for earthquake resistance of structures. CEE.

International Building Code. (2003): Copyright for: International Conference of Building Officials. USA.

NC 053-125. (1984): Cálculo y ejecución de puentes y alcantarillas. Comité Estatal de Normalización. Cuba.

NC 46. (1999): Construcciones Sismo-resistentes. Requisitos básicos para el diseño y construcción. Comité Estatal de Normalización. Cuba.

NC 283. (2003): Peso de materiales naturales, artificiales y elementos de construcción. Comité Estatal de Normalización. Cuba.

NC 450. (2006): Edificaciones-Factores de carga o ponderación-Combinación. Comité Estatal de Normalización. Cuba.

Valdés, E.; Taylor, G. (1990): Puentes. Editorial Pueblo y Educación. Cuba.

Wilson, E.; Habibullad, A. (2000): SAP 2000. Series of computer programs for the finite element analysis of structures. Structural Analysis User Manual. Editorial Computers & Structures, Inc. USA.