

Influencia del suelo en el diseño sismorresistente de puentes en Cuba

Darío Candebat Sánchez

correo electrónico: dario@cenais.cu

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba

Artículo Original

Guillermo Godínez Melgares

Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba

Luis Felipe Caballero Cornier

correo electrónico: felipe@cenais.cu

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba

Zulima Caridad Rivera Álvarez

correo electrónico: zuli@cenais.cu

Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba

Resumen

Las características ingeniero-geológicas del suelo inciden directamente en el comportamiento sísmico estructural de los puentes. Este trabajo muestra la importancia de profundizar en la determinación del coeficiente de sitio, parámetro que el código de construcciones sismorresistentes cubano establece para la consideración de la influencia del suelo en la respuesta estructural. La investigación se realiza a partir de la aplicación del método geofísico de sísmica de refracción y se toma como caso de estudio un puente ubicado en la carretera Granma de Santiago de Cuba, mostrándose las variaciones presentes en la litología del área, encontrándose suelos de malas características como arcillas arenosas y arenas saturadas. El análisis de estos cambios en la litología superficial demuestra la pertinencia de utilizar la ponderación de las características de cada estrato, mostrándose como incide el resultado en el espectro de respuesta elástica y por ende en el cálculo del cortante para el diseño sísmico.

Palabras claves: suelo, puentes, estructural, sísmico, litología

Recibido: 10 de junio del 2016 Aprobado: 23 de septiembre del 2016

INTRODUCCIÓN

Los puentes son obras de ingeniería que interactúan de manera determinante con el medio ambiente circundante. Un diseño satisfactorio garantiza su supervivencia y evita afectaciones de consideración a la ecología de su zona de emplazamiento.

La actividad sísmica de las últimas décadas ha puesto de manifiesto que los puentes son altamente vulnerables ante la ocurrencia de eventos sísmicos de gran magnitud, motivando a investigadores de todo el mundo a sistematizar el análisis de los problemas existentes y mejorar las normas para garantizar diseños más seguros.

Investigaciones realizadas han permitido identificar los daños que han mostrado estas obras de fábrica debido a

la ocurrencia de sismos fuertes como los acontecidos en Los Ángeles, Estados Unidos, en 1994 y en Kobe, Japón, en 1995, lo que evidencia los puntos más vulnerables y los aspectos que son imprescindibles valorar en el diseño sísmico para garantizar un adecuado comportamiento. En relación con la influencia del suelo del área de emplazamiento de las estructuras, en [1] se expone que algunas de las afectaciones observadas fueron:

Amplificación de desplazamientos debido a efectos del suelo. Cuando los puentes son construidos en suelos suaves o licuables, el problema se agrava. Los suelos con estas características propician la amplificación de la acción sísmica, incrementando la probabilidad de pérdida de apoyo del tablero.

Hundimiento o caída del estribo. El hundimiento del relleno del estribo y la rotación de este elemento de la estructura, debido a la respuesta de suelos suaves y a la existencia de un relleno no totalmente consolidado.

Por otra parte en [2] se afirma que uno de los daños típicos manifestados por los puentes de carretera es precisamente el daño estructural, debido al fallo del suelo, licuación y ruptura de fallas. Asimismo, [3] expresa que una de las causas del colapso de puentes, durante el terremoto de Chile (2010), fue la presencia de la socavación, por tanto evaluar la probabilidad de ocurrencia de estos fenómenos es vital para asegurar la conservación de dichas estructuras.

Varios puentes de las carreteras de interés nacional de Santiago de Cuba han sido severamente afectados por el fenómeno de la socavación, presentando fallas que impiden su utilización y que por tanto interrumpen la circulación por dichas vías. Se considera entonces de extraordinaria importancia el análisis de los requerimientos establecidos en Cuba para considerar la incidencia del suelo en la respuesta estructural de puentes ante acciones generadas por sismos.

Este trabajo tiene como objetivos, analizar la determinación del coeficiente de sitio, parámetro que establece [4] para evaluar la influencia de las características del perfil del suelo en la respuesta ante las acciones sísmicas y proponer, de forma fundamentada, la utilización de una ecuación, planteada en otros códigos, para el cálculo de dicho coeficiente. Estos objetivos se fundamentan en la hipótesis de que la estimación adecuada del coeficiente de sitio permitirá determinar adecuadamente el nivel de fuerza cortante que se genera en la base de la estructura.

La información utilizada en el análisis se obtiene de la aplicación del método geofísico de sísmica de refracción, aspecto en el que radica la limitación de la investigación. Esta se sustenta en el hecho de que el método utilizado es de exploración somera y por tanto no aporta información sobre las características ingeniero-geológicas de la litología en profundidad en el área analizada.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para realizar la investigación se llevó a cabo una revisión bibliográfica con el objetivo de conocer cómo los códigos internacionales de diseño sismorresistente evalúan la influencia del suelo en la respuesta estructural de puentes construidos en zonas sísmicas. El análisis del coeficiente del sitio se realizó valorando lo establecido en [4] y lo especificado en [5].

Para caracterizar la geología presente y su comportamiento en profundidad fue utilizado el Mapa Geológico de la Región Oriental de Cuba a escala 1:100 000 presentado por [6], conjuntamente con la interpretación de un perfil geológico que pasa muy cerca

del área en estudio, realizado para la elaboración del Mapa Geológico de la Sierra Maestra Sur, a escala 1:100 000, el cual es recogido en el informe de [7]. Las descripciones estratigráficas fueron tomadas del léxico estratigráfico del IGP [8].

Se empleó el método geofísico de sísmica de refracción para precisar información acerca de la estratigrafía del sitio, determinando los valores de velocidad de la onda longitudinal (V_p) para cada una de las capas presentes en la litología a la profundidad estudiada.

Para dar respuesta a los objetivos del estudio se utilizó el siguiente procedimiento:

- Análisis del coeficiente de sitio que establece la norma de construcciones sismorresistentes cubana [4], para la consideración de la influencia del suelo en la respuesta estructural.
- Propuesta de una expresión, establecida en un código de reconocido prestigio internacional [5], para la determinación del coeficiente de sitio.
- Análisis de la pertinencia y conveniencia de la utilización de la expresión propuesta, a partir del estudio del sitio de emplazamiento de un puente ubicado en una carretera de interés nacional de Santiago de Cuba, aplicando el método geofísico de sísmica de refracción.
- Determinación del coeficiente de sitio según [4] y [5] y comparación de los espectros de respuesta elástica de suelo obtenidos con los valores determinados según cada código.

Consideración de la influencia del suelo en el diseño de puentes en Cuba. Análisis del coeficiente de sitio

El diseño y construcción de los puentes es a veces complicado por las características geotécnicas de la zona de emplazamiento, que puede ser compleja, pues por ser estructuras generalmente largas se ubican sobre terrenos que en ocasiones poseen diversas características ingeniero-geológicas, con diferentes respuestas a lo largo de la estructura ante las acciones generadas por el terremoto.

El análisis de las zonas con probabilidades de ocurrencia de deslizamientos, licuación y agrietamientos, así como de la cercanía de zonas de fallas y zonas cárnicas, permitirá la selección de la mejor solución de cimentación (superficial o profunda) y la adopción de medidas para su buen comportamiento, cumpliendo con los objetivos y niveles de desempeño previstos. La consideración de estos fenómenos permite al diseñador prever la forma de trabajo, concibiendo la mejor respuesta posible.

En el diseño, [4] tiene en cuenta el cambio de la respuesta de la estructura del puente debido a las características del perfil del suelo donde está ubicado (S_1 , S_2 , S_3 , S_4) considerando un coeficiente de sitio asignado a cada uno, y que lógicamente, incrementa su valor a medida que se degrada su calidad (tabla 1).

Tabla 1 Valores del coeficiente de sitio S según [4]	
Perfil tipo	Coeficiente S
S_1	1,00
S_2	1,20
S_3	1,50
S_4	2,00

Estos valores modifican el espectro de respuesta elástica establecido por [4], sin embargo, su utilización no considera la existencia, en el perfil litológico del área, de suelos de distintas condiciones ingeniero-geológicas en profundidad y que por supuesto manifiestan respuestas diferentes ante las ondas generadas por los terremotos.

Para esto, [5] propone utilizar una ecuación que considera los coeficientes de cada uno de los suelos presentes y su espesor (fórmula 1):

$$c = \frac{\sum c_i e_i}{30} \quad (1)$$

Siendo:

C : Coeficiente de terreno ponderado (adimensional) S en [4].

c_i : Coeficiente de sitio de cada estrato (adimensional).

e_i : Espesor de cada estrato en metros (m).

La correcta determinación del coeficiente de sitio es vital pues participa en la definición del espectro de respuesta elástica a través del coeficiente sísmico espectral (fórmula 2) según [4].

$$c = \frac{\sum c_i e_i}{30} \quad (2)$$

Siendo:

C : Coeficiente sísmico espectral adimensional.

T : Período del puente en segundos.

S : Coeficiente de sitio según [4].

A : Aceleración en % de la gravedad.

Caso de estudio: Puente sobre el río Peladero. El más largo de Cuba

Para fundamentar la necesidad y conveniencia de la aplicación de la fórmula 1, propuesta por [5], se realiza un estudio de la litología de una zona del sitio bajo el puente sobre el río Peladero aplicando un método geofísico de probada efectividad.

El puente sobre el río Peladero fue construido a finales de los años 80, utilizando la tipología cubano-italiana en su solución isostática (tablero simplemente apoyado), caracterizada por el uso de elementos prefabricados en la superestructura y subestructura. Posee 41 luces de 20 m cada una por lo que con una longitud total de 820 m es la obra de fábrica de mayor extensión del país. Ubicado en un valle a 86 km de la ciudad de Santiago de Cuba, aproximadamente a 156 m del Mar Caribe, encontrándose

a 250 m al norte, la Sierra Maestra, a 8,6 km al este, se encuentra el poblado de Uvero, a 18 km al oeste, el Pico Turquino, y localizado en una vía de extraordinaria importancia para el territorio, la carretera Granma, principal y único acceso desde Santiago de Cuba al municipio Guamá (figura 1).

El área de ubicación de la estructura se encuentra en las inmediaciones de los sedimentos innombrados del Holoceno y las rocas vulcanógenas sedimentarias del Paleógeno, pertenecientes al Grupo El Cobre. Para una mejor descripción geológica del lugar se utiliza el Mapa Geológico de la Región Oriental de Cuba a escala 1:100 000 [6], así como en toda la literatura disponible sobre el área en estudio. Las descripciones estratigráficas fueron tomadas del léxico estratigráfico del IGP [8]. La descripción litológica es la siguiente (figura 2):

- Formación Río Macío (río): (alQ_4), depósitos en valles aluviales de composición y granulometría heterogénea, es decir, cantos rodados, guijarros, arenas, arcilla aluvial, etc.
- Grupo El Cobre (ec): (Paleoceno, P_1 - Eoceno Medio parte baja, P_2^{med-a}), son rocas vulcanógenas y vulcanógeno-sedimentarias en distintas correlaciones y combinaciones alternantes, muy variables. Su ambiente de sedimentación fue en una cuenca marina de profundidad variable (de somera a media), de salinidad normal.

En el levantamiento geológico realizado para la elaboración del Mapa Geológico de la Sierra Maestra Sur, a escala 1:100 000, el cual es recogido en el informe elaborado por [7], aparece la interpretación geológica de varios perfiles. En las cercanías del área de ubicación del puente Peladero, pasa el perfil E-F con dirección SN, el cual tiene una potencia de 30 m de sedimentos arenosos sueltos, pertenecientes a la Fm. río Macío y por debajo de esta se encuentra la porfírita andesítica perteneciente al Grupo El Cobre.

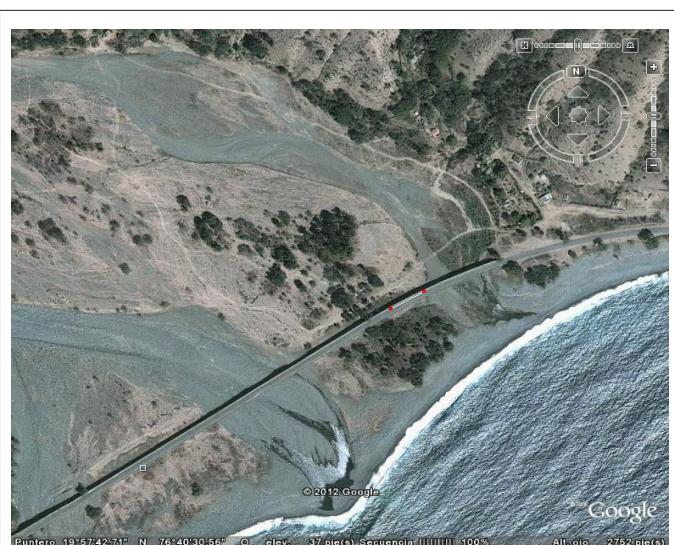


Fig. 1. Ubicación del puente sobre el río Peladero. Carretera Granma. Santiago de Cuba. Fuente: Google, 2012.

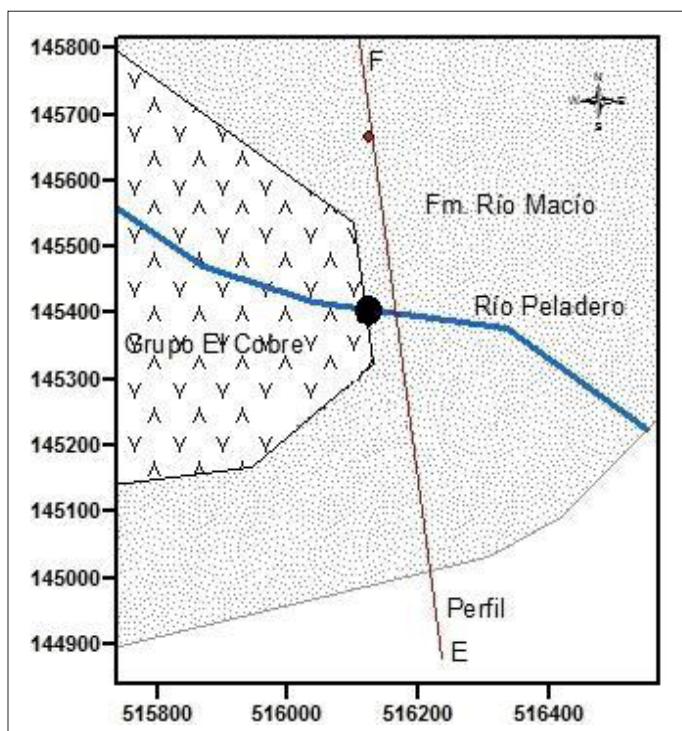


Fig. 2. Formaciones geológicas en el área de ubicación del puente sobre el río Peladero. Se indica el perfil.

En su informe, [9] reúne las distintas formaciones geológicas en varios grupos de formaciones ingenierogeológicas, teniendo en cuenta su composición litológica, origen y propiedades físico-mecánicas. Los sedimentos de la Fm. río Macío pertenecen a las formaciones de llanuras aluviales, características del complejo arenoso. Mientras que el grupo El Cobre son formaciones efusivo-sedimentarias. Con una amplia distribución en toda la región oriental, perteneciente al complejo rocoso-semirrocoso.

Cabe señalar que las rocas pertenecientes al Grupo El Cobre son muy heterogéneas y por tanto muy susceptibles a meteorizarse o degradarse sobre todo en los primeros estratos, llegando a tener varios metros de corteza de intemperismo. Esto se debe fundamentalmente a la diferente composición de sus rocas, el intenso grado de agrietamiento, de estratificación, el tectonismo y el intemperismo, en ocasiones si la geomorfología de la zona es favorable hace que la ocurrencia de deslizamientos sea frecuente.

Todo lo anteriormente explicado hace aún más necesario evaluar la influencia del tipo de suelo en la respuesta estructural del puente, teniendo en cuenta además que debido a la ocurrencia de fenómenos climatológicos extremos, esta estructura ha sufrido daños de consideración debido al fallo por socavación en dos de sus pilas, lo que provocó desniveles significativos en tres de sus tramos.

Según [10], la causa de la ocurrencia del fenómeno de socavación ha sido la acción concentrada de las corrientes sobre algunas pilas, motivada fundamentalmente por las aglomeraciones de material rocoso caóticamente distribuido por las fuerzas del agua. En las figuras 3 y 4 se muestran algunas de las afectaciones observadas.

Sin embargo, a pesar de estas afectaciones, el objetivo de este trabajo es mostrar la pertinencia de considerar la estratigrafía del sitio de ubicación de la cimentación de cada una de las pilas del puente en el análisis del coeficiente antes mencionado, para poder considerar de manera más exacta la influencia del suelo en la acción sísmica y por tanto acercar los resultados de análisis sísmico a la probable respuesta estructural.



Fig. 3. Daños en el puente sobre el río Peladero.



Fig. 4. Fallos por socavación de pilas centrales. Afectaciones en el tablero isostático.

A partir de la caracterización ingeniero-geológica realizada y ante la ausencia de calas en el sitio de estudio, se empleó para el análisis, el método geofísico de sísmica de refracción que se fundamenta en la diferencia de la velocidad de propagación de las ondas vibratorias de tipo sísmico en función de las características del medio por las que estas se propagan, teniendo como objetivo determinar las variaciones de las ondas longitudinales (V_p) con la profundidad, asociándola con las diferentes capas presentes en la litología del área estudiada. Se realizaron dos perfiles (longitudinal y transversal). Este método ha sido utilizado entre otros por [11] y [12] para la caracterización de perfiles de suelo con fines de análisis estructural y susceptibilidad al deslizamiento de taludes.

A pesar de que algunos códigos y manuales de diseño vigentes como [13], [14] y [15], implementan la utilización de la velocidad de las ondas de cortante (V_s) para clasificar los diferentes tipos de suelo, se utiliza en esta investigación la velocidad de las ondas longitudinales (V_p) debido al software de análisis empleado. Sin embargo, esta decisión no afecta los resultados pues es conocida la relación existente entre ambas velocidades. En su investigación, [16] utilizan las velocidades V_p y V_s , obtenidas de manera independiente, para obtener un modelo cortical (1D) y la relación entre ellas (V_p/V_s) para caracterizar el modelo obtenido.

El estudio de sísmica se realizó con el empleo de un equipo combinado PASI de 12 canales modelo 16SG12-N y con un sismógrafo operado por un programa que corre sobre Windows XP. La excitación del terreno para obtener las ondas longitudinales se efectuó mediante golpes sobre una placa de aluminio.

Perfil longitudinal

Se realizaron mediciones en un perfil de 55 m, orientado en dirección noreste-suroeste que coincide con el eje longitudinal de la estructura. No se ubicaron perforaciones, pero a través de la exploración previa se pudo detectar una capa de eluvio entre 1 y 2 m en la superficie, se observa la presencia de arcilla arenosa, además, se constató la existencia de magníficas condiciones para realizar estos trabajos de prospección dadas las características de la superficie seleccionada para el estudio, desprovista de vegetación.

Se seleccionaron 7 puntos de excitación contando los dos exteriores a ambos extremos, cuya distancia es -13,75 m y + 13,75 m del primer y último geófono respectivamente (figura 5). Los puntos de coincidencias de ambas puestas es como sigue: en el tiro 5 del longitudinal y en el 3 del transversal. Al determinar el corte litológico se logró coincidencias de los resultados entre los perfiles longitudinal y transversal, tanto en los espesores como en velocidades de la onda P .

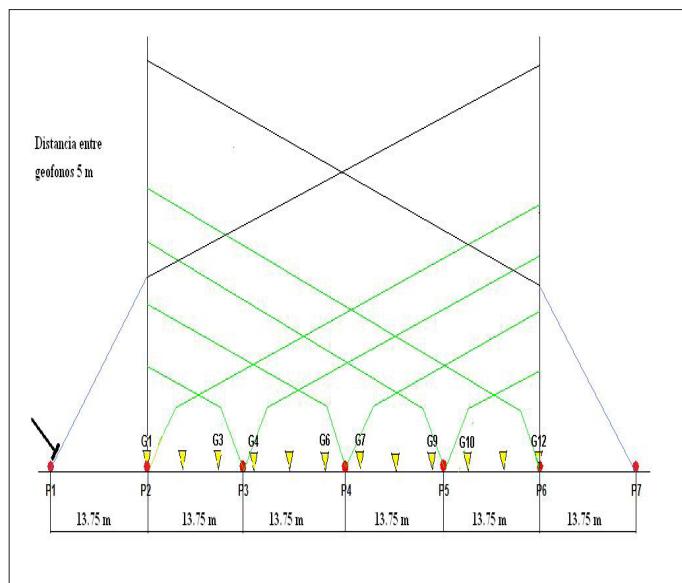


Fig. 5. Geometría de la puesta de medición. Dirección noreste-suroeste. Eje longitudinal del puente sobre el río Peladero.

Perfil transversal

Se realizó un solo perfil con una longitud de 27,5 m orientado en dirección noroeste-sureste que coincide con el eje transversal de la estructura.

Se ubicaron 7 puntos de excitación contando los dos exteriores a ambos extremos cuya distancia es -6,875 m y +6,875 m del primer y último geófono respectivamente (figura 6). Esta puesta pasa perpendicularmente al puente, es decir, transversal al perfil longitudinal que se trazó en la misma dirección del puente. Los puntos de coincidencias de ambas puestas es la siguiente: en el tiro 5 del longitudinal y en el 3 del transversal. Se pudo cartografiar la coincidencia en los espesores y velocidades de los puntos de cortes. Los geófonos verticales utilizados fueron también de 10 Hz, esta vez dispuestos a una distancia de 2,5 m entre sí.

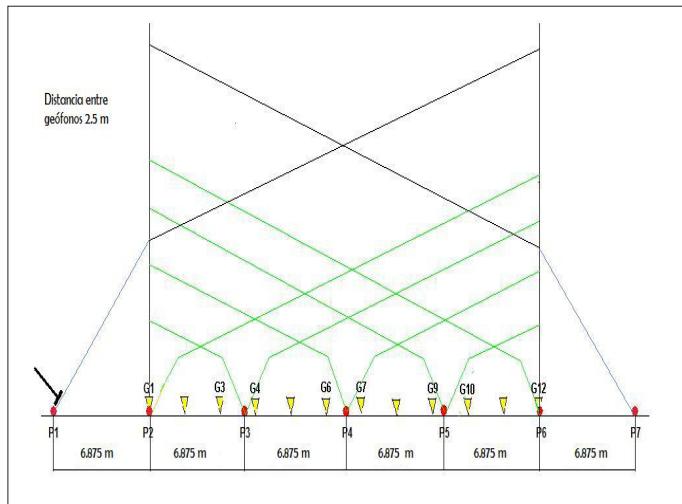


Fig. 6. Geometría de la puesta de medición. Dirección noroeste-sureste. Eje transversal del puente sobre el río Peladero.

RESULTADOS

Perfil longitudinal

En el perfil longitudinal (figura 7) se realizaron dos disparos antes y después de los geófonos 1 y 12 a 13,75 m. Se pudo observar que los valores de V_p tienen un promedio 609 m/s con un espesor aproximado de 1 m en la capa más superficial. Por debajo de esta se localiza una zona cuyo valor promedio de velocidad de la onda sísmica es de 1 644 m/s, su espesor es variable (1-6 m). En la tercera capa, que es la de mayor dureza, la onda se propaga con una velocidad de 1 856 m/s. La última frontera refractora es muy variable, observándose que en el punto de disparo dos está a 7 m de profundidad, bajo el tercer disparo se ubica a 2,5 m de profundidad y desde este punto baja hasta el sitio del sexto disparo a 9 m de profundidad aproximadamente.

Apartir de los valores de velocidad obtenidos se concluye que el primer estrato se correlaciona con el eluvio que está depositado en la superficie. En el segundo estrato se observa una variación lateral de velocidad que puede ser debida al cambio en el grado de compactación del material en dirección horizontal, esto es demostrado al principio del perfil donde los valores de velocidad disminuyen desde los 1 771 m/s a 1 644 m/s, desde el geófono 3 hasta el 7 la velocidad de propagación es de 1 352 m/s, aumentando entonces desde este punto y hasta el sitio bajo el último geófono a 1 644 m/s, de acuerdo con la información geológica esta capa puede asociarse con la presencia de arena saturada y arcilla arenosa, es decir, que en esta zona se refleja la influencia del nivel freático proveniente del mar (suelo S_4 , según la clasificación que establece [4]). Se nota un tercer estrato con mayor dureza presentando una velocidad entre 1 875 m/s y 2 306 m/s (variación lateral de velocidad), este valor puede ser correlacionado con la presencia de tobas y andesitas alteradas (Suelo S_2).

Es válido mencionar que en el perfil analizado se ubican tres ejes de pilas del puente, aspecto significativo, pues también se observa la variación de los espesores de los estratos de una pila a otra, mostrando como la influencia del suelo en la respuesta de cada una de las pilas es diferente. Por supuesto esta situación hace más complejo el análisis estructural pues es necesario aplicar acciones sísmicas diferentes a cada uno de los apoyos de la estructura, sobre todo en puentes hiperestáticos por la dependencia existente entre estos.

Perfil transversal

En este caso se realizaron dos disparos antes y después de los geófonos 1 y 12 a 6 875 m. Se aprecia que los valores de V_p tienen un promedio 609 m/s con un espesor medio de 1 m en la capa más superficial. Se observa una capa intermedia cuyos valores de velocidad promedio de la onda P es de 1 644 m/s, con un espesor variable entre 1 y 5 m. La capa inferior del corte realizado, que es la que presenta mayor solidez del contenido litológico con respecto a las anteriores, manifiesta velocidades de propagación de la onda variables, con valores entre 1 920 m/s y 2 396 m/s. La profundidad de la última frontera refractora fluctúa desde los 5,50 hasta los 3,33 m.

De los valores de velocidad obtenidos se puede concluir que el primer estrato se correlaciona con el eluvio que está depositado en la superficie. El segundo estrato se asocia con la arena saturada y arcilla arenosa mencionada en el perfil anterior (Suelo S_4). El tercer estrato, en el que se manifiestan mayores valores de velocidad de propagación de la onda p , se puede asumir también la presencia de tobas o andesitas alteradas (Suelo S_2). En esta última capa se nota un cambio lateral de la velocidad debido a los diferentes grados de compactación del suelo en dirección horizontal (figura 8).

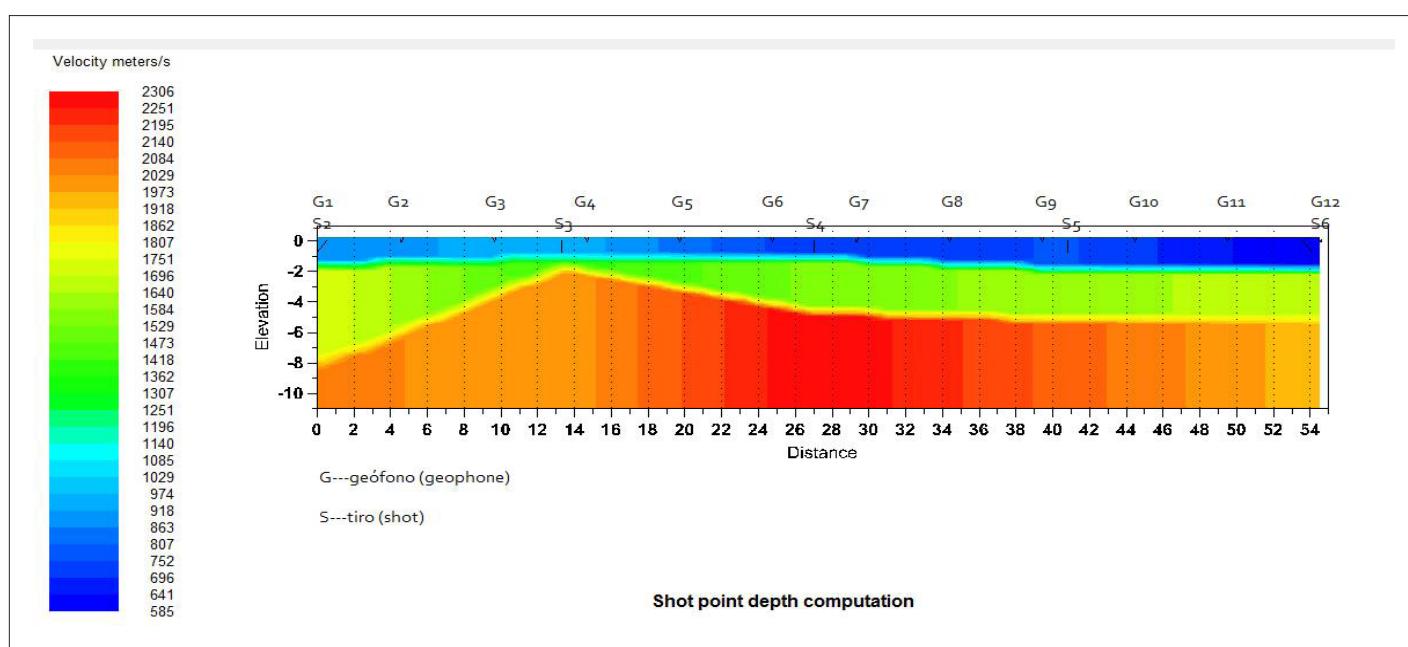


Fig. 7. Perfil sísmico. Dirección noreste-suroeste. Eje longitudinal del puente sobre el río Peladero.

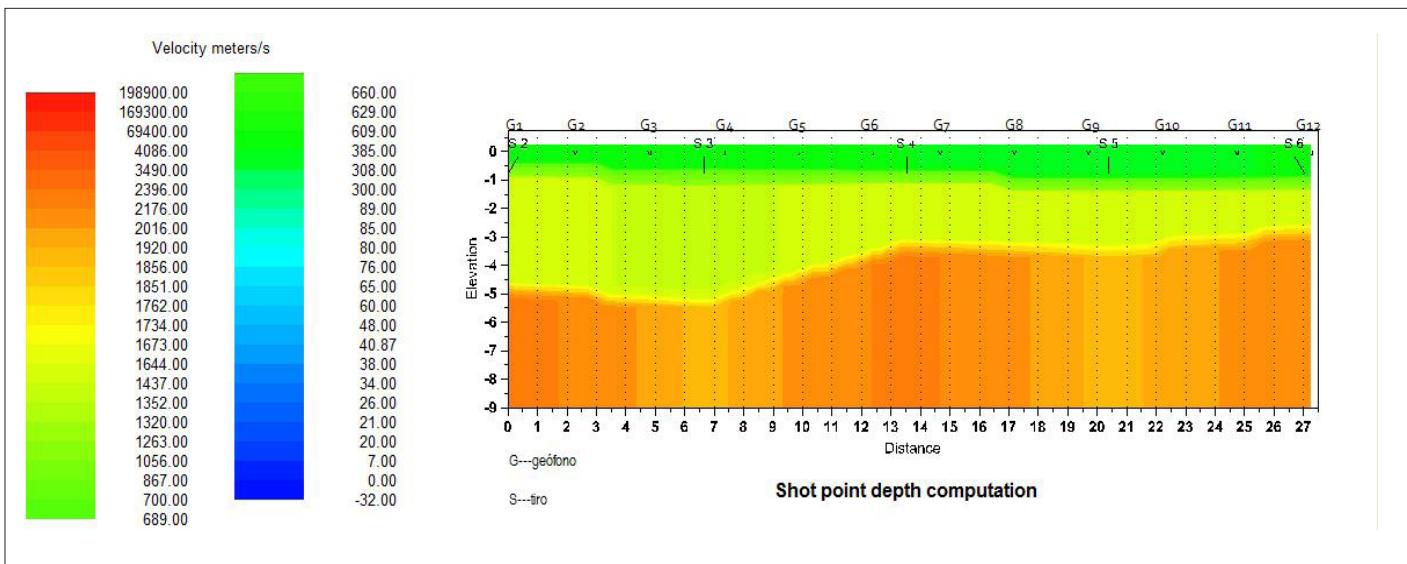


Fig. 8. Perfil sísmico. Dirección noroeste -sureste. Eje transversal del puente sobre el río Peladero.

Al utilizar la información obtenida de la aplicación del método de sísmica de refracción en el perfil longitudinal y para el análisis del coeficiente de sitio en los diferentes puntos de ubicación de las pilas de la estructura, utilizando las dos expresiones mencionadas, se obtienen los siguientes resultados (tabla 2).

La profundidad de análisis es de 9,50 m pues no se considera la primera capa detectada, teniendo en cuenta que el nivel de desplante de la cimentación de pilas se encuentra sobre el segundo estrato. El análisis se realiza ponderando los espesores y coeficientes de sitio de cada estrato en esta profundidad.

Como muestra el análisis, los valores ponderados no son iguales a los correspondientes al suelo S_4 , en este caso son menores, pues valora la influencia del suelo de mejores características ubicado debajo.

Este análisis permite validar la importancia de la utilización de la expresión propuesta, pues sin dudas la utilización tanto de un valor conservador a partir de un análisis geológico superficial, en este caso 2,00 del suelo S_4 , como del correspondiente al suelo S_2 (1,20) traerían como consecuencia una evaluación poco realista de la incidencia del suelo en la respuesta estructural.

En la figura 9 se muestran los espectros de respuesta elástica del suelo calculados con ambos coeficientes para la primera pila de la estructura.

El análisis de los espectros de respuesta del suelo, para la ubicación de la pila 1, en dirección a Santiago de Cuba, muestra una diferencia del 17 % en los valores de coeficiente sísmico espectral para períodos mayores a un segundo (figura 9). Esto implica un incremento en este mismo valor del cortante basal, que se calcula según la siguiente expresión [3]:

$$V_m = \frac{C_m}{R_d} W_m \quad (3)$$

Siendo:

V_m : Cortante basal modal.

C_m : Coeficiente sísmico espectral modal.

W_m : Peso efectivo modal de la estructura.

R_d : Coeficiente de reducción de las fuerzas sísmicas por ductilidad.

Tabla 2

Análisis y comparación del coeficiente de sitio con información obtenida del perfil longitudinal

Eje de Pila	No. de capa del corte	Espesor promedio	Tipo de suelo	Coeficiente de sitio (NC: 46, 1999)	Coeficiente de sitio ponderado calculado según [5]
1	2	6,0 m	S_4	2,00	1,70
	3	3,5 m	S_2	1,20	
2	2	3,0 m	S_4	2,00	1,45
	3	6,5 m	S_2	1,20	
3	2	3,5 m	S_4	2,00	1,50
	3	6,0 m	S_2	1,20	

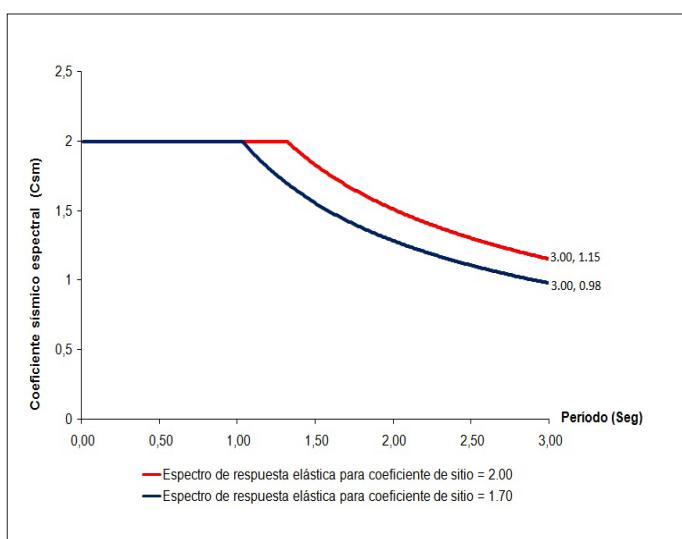


Fig. 9. Espectros de respuesta elástica para cada coeficiente de sitio utilizado.

DISCUSIÓN

En el caso de estudio, la consideración del coeficiente dado por [4] trae como consecuencia una sobreestimación de la influencia del suelo en la respuesta de la estructura para períodos superiores a un segundo. El coeficiente sísmico espectral calculado con el valor de coeficiente de sitio establecido por [4] es superior en un 17 % al determinado según la expresión indicada por [5]; por tanto, el cortante basal calculado es mayor.

Asimismo, en la tabla 2 se observa que los coeficientes ponderados, según la ecuación de la norma española, son diferentes en cada eje de pilas, propiciando variabilidad de la acción sísmica en los apoyos del puente. Referente a este tema, [5] establece “El coeficiente C depende de los espesores y rigideces de las capas de suelo superficial existentes en cada punto, por lo que podrá ser diferente en cada uno de los apoyos del puente, cuando esto ocurra, se tendrá en cuenta su repercusión en el espectro de respuesta...”.

Los resultados obtenidos demuestran la importancia de incorporar, en el análisis del coeficiente de sitio (S), considerado en el análisis establecido por [4], las características, espesores y propiedades físico-mecánicas de las diferentes capas que conforman la litología bajo la cimentación de cada una de las columnas de pilas y estribos de los puentes. Igualmente, la determinación de los cambios en profundidad en la litología del área, detectados con el método de sísmica de refracción, permite la consideración del contraste de impedancia, parámetro que permite valorar la amplificación de las ondas sísmicas en el suelo.

En estudios de suelo realizados a otros puentes ubicados en la propia carretera Granma (Puente sobre río Avispero) y en el tramo de la Autopista Nacional ubicado en Santiago de Cuba (Puente sobre río Arroyito [17] y sobre afluente Cauto), se ha constatado también la existencia de una litología heterogénea en

sus áreas de emplazamiento. Estos ejemplos apoyan la propuesta realizada en este estudio.

Sin embargo, aunque el método geofísico utilizado permitió demostrar la existencia de diferentes estratos en el perfil geológico del área y por tanto cumplir el objetivo de este trabajo, no se debe obviar el hecho de que es un método de exploración somero. Esta característica de la sísmica de refracción no permite obtener información a profundidades significativas y por tanto no fue posible conocer a qué profundidad se encuentra el estrato resistente en el área estudiada.

CONCLUSIONES

1. Se muestra la existencia de perfiles litológicos en la zona de emplazamiento de la cimentación de las pilas y estribos del puente Peladero, con estratos de diferentes características ingeniero-geológicas que influyen en la respuesta del suelo y por consiguiente en la respuesta de la estructura ante acciones sísmicas. Esto se manifiesta en los valores de coeficiente sísmico espectral obtenidos del análisis de espectros.

2. La aplicación del método de sísmica de refracción ha demostrado que la existencia de un suelo degradable ante la presencia del agua y el intemperismo, de malas características, saturado y con presencia de arcilla, es la causa fundamental de la ocurrencia del fenómeno de socavación que provocó el fallo de la estructura.

3. El resultado obtenido en este caso permite reflexionar sobre la eficacia del tipo de cimentación seleccionado en el diseño de la estructura, pues en opinión de los autores, una cimentación indirecta, apoyada sobre el estrato de mejores características ingeniero-geológicas, habría garantizado un mejor comportamiento.

4. Se demuestra la conveniencia y la necesidad de considerar en el análisis la estratigrafía del sitio a partir de la ponderación analizada, ya que el análisis superficial de la influencia del suelo provoca en algunos casos la sobre-estimación del diseño y en otros la obtención de una respuesta estructural inferior a la demanda real en el área.

5. Los resultados emanados de la aplicación del método de sísmica de refracción demuestran la importancia de considerar la variabilidad de la acción sísmica en el diseño, pues se observan diferentes espesores de estratos entre los ejes de pilas y estribos, aspecto del cual dependerá la acción sísmica en cada punto y por tanto la respuesta global de la estructura. Este elemento debe ser incluido en el código de diseño de estructuras sismorresistentes de Cuba [3].

REFERENCIAS

- PRIESTLEY, Michael John Nigel; SEIBLE, Frieder; CALVI, Gian Michele. *Seismic Design and retrofit of Bridges*. 1996, John Wiley and Sons, 686 pp. ISBN: 0-471-57998-X.

2. FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION. "LRFD Seismic analysis y design of bridges". *Reference manual. Publication No. FHWA-NHI-15-004*: 2014, 608 pp. Washington, D.C. USA. 2014.
3. AGUIAR FALCONI, Roberto. *El mega sismo de Chile 2010 y lecciones para el Ecuador*. 2011, 157 pp. ISBN: 978-9978-92-979-7.
4. OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. "Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción". *Norma cubana: 1999*. 95 pp. La Habana, Cuba, 1999.
5. MINISTERIO DE FOMENTO. DIRECCIÓN GENERAL DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. "Norma de construcción sismorresistente: puentes". *Norma española: 2007*, 125 pp. Madrid, España, 2008.
6. CARRILLO PÉREZ, Dalia; ECHAVARRÍA HERNÁNDEZ, Bienvenido et. al. *Mapa geológico digital de Cuba oriental, 1:100000*. Instituto de Geología y Paleontología, Sistema de Información Geológica de Cuba (SIGEOL), La Habana, Cuba, 2008.
7. MÉNDEZ, Iris; ORTIZ, Gelasio et. al. *Base de datos digital de los levantamientos regionales de Cuba Oriental*. Empresa Geólogo-Minera de Oriente (EGMO) y Oficina Nacional de Recursos Minerales (ONRM). 2011, Santiago de Cuba, Cuba,.
8. CARRILLO PÉREZ, Dalia; ECHAVARRÍA HERNÁNDEZ, Bienvenido et. al. *Léxico Estratigráfico de Cuba*. Instituto de Geología y Paleontología. 2009, La Habana, Cuba.
9. PÉREZ NEVOT, Nelson. *Aspectos ingenierogeológicos del levantamiento geológico de Cuba Oriental. Contribución a la Geología de Cuba Oriental*. La Habana, Cuba: Editorial Científico-Técnica, 1983. pp.173-185.
10. BERTOLÍN, Lizardo; LÓPEZ, L; BOADA, J. "Proyecto de rehabilitación de puente sobre el río Peladero". *Memoria descriptiva*. Empresa de diseño Vértice. Holguín, Cuba, 2012, 4 pp.
11. CABALLERO CORNIER, Luis Felipe et. al. "Aplicación de sísmica y geo-electricidad en la Ingeniería Geológica de forma puntual en Santiago de Cuba para valorar las posibles causas de las fallas estructurales". En actas de la VI Convención Cubana de Ciencia de la Tierra. VIII Congreso Cubano de Geofísica. Geofísica aplicada a la Ingeniería Geológica e Hidrogeología. 2015, GEF2-P4. ISSN: 2307-499X.
12. CÁRDENAS SOTO, Martín; RAMOS SALDAÑA, Horacio; VIDAL GARCÍA, Martín Carlos. "Interferometría de ruido sísmico para la caracterización de la estructura de velocidad 3D de un talud en la 3^a Sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. 2016, vol. 68, núm. 2, pp. 173-186.
13. AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY Y TRANSPORTATION OFFICIALS. "LRFD Bridges. Design specifications". 6^{th edition}: 1668 pp. Washington, DC. USA. 2012. ISBN: 978-1-56051-523-4.
14. CALIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. "Seismic design criteria". Version 1.7: 2013. 180 pp. California. USA. 2013.
15. COLEGIO FEDERADO DE INGENIEROS Y DE ARQUITECTOS DE COSTA RICA. "Lineamientos para el Diseño Sismorresistente de Puentes". *Lanmanme UCR*: 2013. 90 pp. San José, Costa Rica. 2013.
16. VENERDINI, Agostina; SÁNCHEZ, Gerardo et. al. "Nuevas determinaciones de velocidades de ondas P y ondas S para la corteza sísmica del terreno Cuyania en el retroarco andino". *Revista mexicana de Ciencias Geológicas*. 2016, vol. 33, núm. 1, pp. 59-71.
17. CANDEBAT SÁNCHEZ, Dario; GODINEZ MELGARES, Guillermo; CABALLERO CORNIER, Luis Felipe. "Métodos experimentales para la estimación de la vulnerabilidad sísmica de puentes prefabricados de hormigón: Puente Arroyito". *Revista de la Facultad de Ingeniería UCV*. 2012, vol. 27, núm. 2, pp. 52- 66. ISSN 0798-4065.

AUTORES

Darío Candebat Sánchez

Ingeniero Civil, Máster en Dirección, Investigador Auxiliar, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba

Guillermo Godínez Melgares

Ingeniero Civil, Doctor en Ciencias, Profesor Titular, Universidad de Oriente, Cuba (fallecido)

Luis Felipe Caballero Cornier

Ingeniero Geofísico, Especialista, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba

Zulima de la Caridad Rivera Álvarez

Ingeniera Geóloga, Máster en Ciencias, Investigadora Auxiliar, Centro Nacional de Investigaciones Sismológicas, Santiago de Cuba, Cuba

Soil Influence in Seismic Design of Bridges in Cuba

Abstract

Soil geological conditions affect directly the seismic structural behavior of bridges. This work shows the importance of determining the site coefficient, a parameter used by Cuban seismic code for considering the influence of soil in the structural response. The research is based in the results obtained from the application of geophysical seismic refraction method. It is presented as an example a bridge located on Granma highway in Santiago de Cuba city, showing variations in lithology present in the area, characterized by poor soils conformed by saturated sands, and clays. The analysis of these changes in surface lithology demonstrates the relevance of using the weighting of the characteristics of each stratum, because of its influence in the elastic response spectrum and therefore in the shear used for seismic design.

Key words: soil, bridges, structural, seismic, lithology

