

## **MÉTODOS EXPERIMENTALES PARA LA ESTIMACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA DE PUENTES PREFABRICADOS DE HORMIGÓN: “PUENTE ARROYITO”**

*DARÍO CANDEBAT SÁNCHEZ*<sup>(1)</sup>, *GUILLERMO GODÍNEZ MELGARES*<sup>(2)</sup>, *LUÍS FELIPE CABALLERO CORNIER*<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Centro Nacional de Investigaciones sismológicas. [dario@cenais.cu](mailto:dario@cenais.cu), [felipe@cenais.cu](mailto:felipe@cenais.cu)

<sup>(2)</sup> Universidad de Oriente. Facultad de Construcciones. [godinez@fco.uo.edu.cu](mailto:godinez@fco.uo.edu.cu)

Recibido: agosto 2011

Recibido en forma final revisado: abril 2012

### **RESUMEN**

En la actualidad los estudios de vulnerabilidad sísmica constituyen una herramienta imprescindible de la gestión integral del riesgo sísmico, pues propician la toma de decisiones oportunas que permiten mitigar la ocurrencia de desastres. En este trabajo se muestra la estimación de la vulnerabilidad sísmica del puente prefabricado de hormigón sobre el río Arroyito, ubicado en la Autopista Nacional de Santiago de Cuba, zona de alto peligro sísmico, a partir de las características de la tipología constructiva utilizada en su diseño y aplicando una metodología para la evaluación preliminar de su desempeño apoyada en mediciones instrumentales que permitieron determinar sus características dinámicas (período natural de vibración), comparando los resultados obtenidos con los valores calculados a partir de las ecuaciones correspondientes a la tipología; también se aplicó el método geofísico de la resistividad eléctrica con el cual se obtuvieron perfiles litológicos que permitieron valorar la heterogeneidad del suelo de emplazamiento. Finalmente se muestran los resultados obtenidos del análisis de la vulnerabilidad sísmica estructural en función de la rigidez de la estructura de acuerdo a los períodos instrumentales de vibración que manifiesta y de las características de su superestructura y subestructura, valorando los factores que incrementan la probabilidad de daños ante sismos significativos.

Palabras clave: Peligro sísmico, Puente, Vulnerabilidad sísmica, Período, Rigidez, Suelo.

### **EXPERIMENTAL METHODS FOR SEISMIC VULNERABILITY ASSESMENT OF PRECAST CONCRETE BRIDGES: “ARROYITO BRIDGE.”**

#### **ABSTRACT**

Currently seismic vulnerability studies are essential for integrated management of seismic risk, supporting making decision in order to mitigate disasters. This paper shows the estimation of the seismic vulnerability of precast concrete bridge Arroyito, located on National Highway in Santiago de Cuba, an area of high seismic hazard, based on its characteristics of design and applying a methodology for preliminary assessment of performance, supported by instrumental measurements for determining the dynamic characteristics (natural vibration period), comparing the results obtained with typical values of similar structures; besides the geophysical method of electrical resistivity was applied, with which lithological profiles were obtained, supporting the results of the seismic evaluation. Finally, the results of structural seismic vulnerability analysis in terms of the rigidity of the structure according to its instrumental periods of vibration and features of its superstructure and substructure, assessing the factors that increase the likelihood of damage face significant earthquakes are presented.

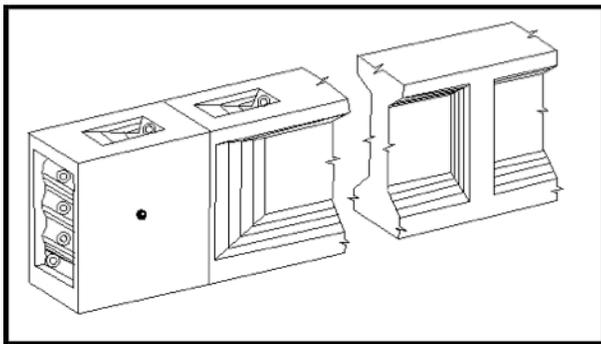
Keywords: Seismic hazard, Bridge, Seismic vulnerability, Period, Rigidity, Ground.



Una de las estructuras ubicadas en esta carretera es el puente sobre el río Arroyito, obra representativa de esta tipología y cuyo desempeño sísmico estructural no había sido estudiado, aspectos que, teniendo en cuenta los intereses de los administradores viales, por su ubicación, hacen necesario un análisis de este tipo.

## CARACTERIZACIÓN DE LA TIPOLOGÍA CUBANO – ITALIANA

Esta tipología posee variantes de luces conformadas por vigas de hormigón prefabricado de longitudes variables desde 10 a 35 metros y que a partir de los 24 metros comienzan a ser reforzadas con cables de alto límite elásticos postensados (Figura 2).



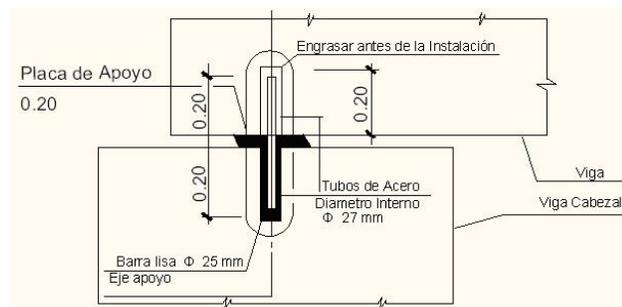
**Figura 2.** Viga postesada de hormigón armado prefabricado. Fuente: Proyecto típico (1973)

La colocación de las vigas sobre los cabezales de pilas y estribos se realiza a partir de la colocación en dicho cabezal de un tubo de acero de 27 mm, soldado al acero de refuerzo del elemento, se coloca posteriormente el aparato de apoyo que según las dimensiones de las luces de la estructura, puede ser una placa de plomo de 3 cm de espesor o una combinación de planchas de neopreno de 12 mm de espesor con un intermedio de acero. Existen dos variantes de apoyo en esta tipología:

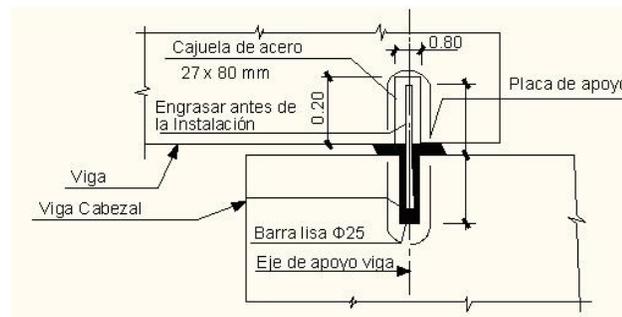
- Apoyo fijo, para el cual se coloca en la viga un tubo, también de 27 mm, que recibe una barra de acero liso de 25 mm de diámetro colocado ya en la cavidad del cabezal y que permite la colocación adecuada de dicha viga, esta solución no permite el movimiento de este elemento (Figura 3).
- Apoyo móvil, que se garantiza colocando una cajuela de acero rectangular de 27 mm x 80 mm, correspondiendo la mayor dimensión al sentido longitudinal, permitiendo,

que al recibir la barra de acero liso de 25 mm de diámetro que ya ha sido colocada en el cabezal, exista la posibilidad de movimiento en esta dirección (Figura 4).

El tablero se conforma con losas prefabricadas permitiendo la obtención de anchos variables para facilitar diferentes tipos de vías según la categoría y el esviaje de las estructuras.



**Figura 3.** Detalle de unión Viga – Cabezal. Sección de apoyo fijo. Fuente: Proyecto típico (1973)

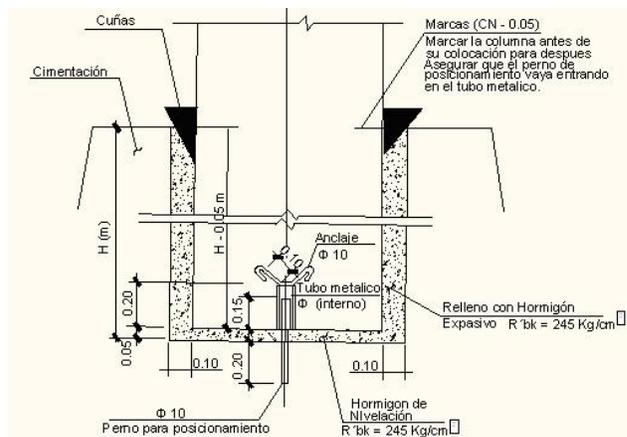


**Figura 4.** Detalle de unión Viga – Cabezal. Sección de apoyo móvil. Fuente: Proyecto típico (1973)

En la dirección transversal estos elementos se unen con las vigas conformando una junta húmeda, utilizando barras de acero y hormigón de calidad suficiente para garantizar la resistencia, logrando en esta dirección una gran rigidez y manteniendo el puente un comportamiento hiperestático. En la dirección longitudinal se utiliza la misma solución pero hasta llegar al eje de los dispositivos de apoyo, donde al igual que entre las vigas se forma una junta que permite los movimientos de retracción y expansión por cambios de temperatura y comportamiento estructural de los elementos del puente. Esta junta debe ser cubierta con soluciones que no impidan estos movimientos y garanticen la continuidad de la capa de rodamiento para satisfacer los requisitos de confort de la red vial. En esta dirección la estructura manifiesta un comportamiento isostático.

En la subestructura se utilizan también elementos prefabricados: cabezales y columnas de pilas, teniendo en cuenta la altura del puente, pues a partir de los 14 metros se comienzan a utilizar soluciones fundidas in situ, contempladas en la tipificación. La cimentación está constituida por vasos y platos de hormigón armado, generalmente combinados, en el caso de las soluciones de columnas hormigonadas en el lugar la cimentación también se construye de forma aislada siempre que lo permitan las condiciones del suelo. En algunos casos, por problemas de capacidad soportante de este, fue necesaria la utilización de cimentaciones indirectas, colocando pilotes.

La unión columna prefabricada – vaso fundido in situ, se construye a partir de la colocación en el fondo del vaso de una barra de acero liso de 25 mm de diámetro, la cual permite la colocación posterior de la columna prefabricada, que posee un tubo de acero de 27 mm empotrado, garantizando así la colocación de este elemento en la posición adecuada. Luego de situar cuñas de madera entre ambos elementos al nivel de unión para asegurar la verticalidad y se coloca en el espacio entre ellos hormigón expansivo (Figura 5).



**Figura 5.** Detalle de colocación de columnas prefabricadas en vasos hormigonados in situ.

Fuente: Proyecto típico (1973)

Los estribos por su parte, están conformados por cabezales y columnas, prefabricados o fundidos in situ, según los criterios abordados anteriormente, esta solución es de estribos abiertos. Como otra solución se utilizaron los estribos cerrados que garantizan la contención total del material del aproche.

## CONSIDERACIONES SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA TIPOLOGÍA CUBANO – ITALIANA

Muchas estructuras fueron construidas con esta tipificación, la mayoría ubicadas en carreteras de significativa importancia para el desarrollo de la región y que incluso destacan por sus dimensiones entre los puentes del país, no obstante, al realizar un estudio de la probable influencia de sus características de diseño en su desempeño ante acciones sísmicas importantes, se vislumbran algunos puntos que merecen ser comentados.

Primeramente, la solución dada para el apoyo y anclaje de las vigas prefabricadas en los cabezales no evita la caída de los tramos si no se cumple con las longitudes de apoyo especificadas ya que la barra conectora que se coloca no evita el movimiento longitudinal más allá de lo permisible, esto es razonable teniendo en cuenta que la solución de la superestructura de la tipología, desde el punto de vista de su funcionamiento estructural, es isostática, o sea, prevé la independencia entre sus elementos y entre estos y la subestructura, sin embargo, los autores del diseño, en su Proyecto típico (PT, 1973), proponen esta solución denominándola detalle antisísmico.

Al realizar el análisis de las longitudes de apoyo, o sea la entrega de las vigas prefabricadas sobre los cabezales, según las especificaciones de la Norma Cubana de Construcciones Sismorresistentes (NC 46:1999), se observa, en algunos puentes construidos, la violación de este requerimiento, principalmente en estructuras ubicadas en curvas y/o en esviaje que poseen zonas donde el radio aumenta y por tanto las luces a cubrir son mayores. Normalmente se cometen errores de este tipo pues se utilizan elementos longitudinales con las mismas dimensiones que en los tramos rectos y de menor radio.

En la solución de pilas con columnas prefabricadas, la unión que se realiza entre dicha columna y el vaso fundido in situ no garantiza continuidad entre estos elementos. Muchos daños observados en puentes afectados por sismos significativos demuestran la importancia del monolismo entre la columna y la cimentación, garantizando las longitudes de empalme suficientes para evitar fallos por flexión, además en estos puntos debe colocarse refuerzo suficiente para tomar las sollicitaciones de cortante que se producen.

Otro elemento importante es la existencia de gran cantidad de juntas en la superestructura (tablero isostático) del puente que se forman en cada punto de culminación de las

vigas prefabricadas. Este aspecto es significativo pues se ha demostrado que un sistema continuo para la superestructura de puentes permite un diseño más racional, aumenta la redundancia y mejora significativamente la integridad estructural del sistema, ya que garantiza una transmisión más directa de las fuerzas sísmicas a la cimentación (Sauter, 1993).

Además desde el punto de vista constructivo las juntas presentan una dimensión mayor que la necesaria debido a que el diseño se realizó teniendo en cuenta materiales y condiciones climáticas diferentes a Cuba. Esta situación provoca su deterioro, influyendo negativamente en la vulnerabilidad de la estructura y fundamentalmente afectando su funcionamiento pues obstaculiza la circulación de los vehículos.

En el caso de las columnas prefabricadas, en los planos se especifica que el diseño solo garantiza su utilización en zonas sísmicas con intensidad 7.0 en la escala MSK-1964. Este es un aspecto a tener en cuenta pues las investigaciones desarrolladas en la región demuestran la necesidad de implementar diseños de las estructuras ubicadas en Santiago de Cuba para soportar intensidades de 8.0 o mayores, según la Escala EMS-1998, consistentes con iguales valores de la referida MSK.

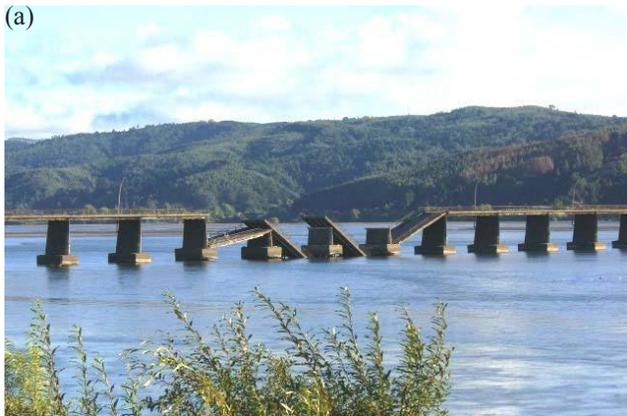
Estos aspectos necesitan atención especial en los análisis sísmicos de obras de fábrica construidas con la tipificación, pues pueden constituir en alguna medida, debilidades que incrementan la probabilidad de un inadecuado comportamiento, teniendo en cuenta además, como, en países que han sufrido el embate de sismos fuertes, los puentes con funcionamiento estructural similar han manifestado daños importantes. En la figura 6 (a y b) se muestran algunos ejemplos de daños observados luego del terremoto de Chile, el 27 de febrero del 2010.



**Figura 6.** Puentes dañados en Concepción, Chile.  
a) Puente Viejo. b) Puente Llacolen. Fuente: Terremoto de Chile del 27-02-2010-Parte 2. INTERNET.

## CARACTERIZACIÓN DEL PUENTE SOBRE EL RÍO ARROYITO

Se estima, que específicamente esta obra, se construye en 1976, es una estructura isostática, con tablero de vigas y losas prefabricadas que posee cuatro luces de 20 metros con vigas espaciadas a 2.10 metros, construidas de hormigón pretensado con sección I (Figura 7b) y las losas prefabricadas del tablero, con 0.18 metros de espesor. La subestructura está conformada por pilas de pórticos de cuatro columnas prefabricadas de hormigón de sección cuadrada de 0.70 metros y cabezal del mismo material, con un gálibo vertical de 6.30 metros, la cimentación es corrida y ejecutada con hormigón armado hormigonado in situ, los estribos son cerrados construidos con piezas prefabricadas de hormigón y aletones a 90°. La estructura no posee esviaje y está localizada en un tramo recto de la carretera (Figura 7a y b).





**Figura 7.** a) Puente sobre río Arroyito. Autopista Nacional.  
b) vista lateral dirección Habana – Santiago de Cuba.

Al realizar una inspección técnica se constató que la estructura presenta un estado técnico bueno, resultado obtenido de la aplicación de la norma cubana vigente (NC 335:2004) referida a la inspección y conservación de puentes, no obstante, cabe mencionar la existencia de algunos problemas relacionados, fundamentalmente, con la falta de mantenimiento sistemático y que se muestran en la figura 8 (a – e).



**Figura 8.** Problemas detectados en el puente sobre río Arroyito. a) Deterioro de juntas del tablero. b) Humedad en elementos prefabricados de hormigón armado. c) Pérdida del recubrimiento en viga extrema dirección Palma soriano – Santiago de Cuba. d y e) Erosión del terraplén del enfoque. Presencia de vegetación excesiva que obstruye el cauce

Estas afectaciones no inciden directamente en el desempeño estructural de la obra de fábrica pero constituyen factores que a medio plazo propician la aparición de daños significativos.

### ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES INGENIERO – GEOLÓGICAS DEL SITIO

Los puentes son muy sensibles a la interacción suelo – estructura. Su diseño y construcción 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 variables con condiciones ingeniero geológicas y geotécnicas complicadas que provocan acciones sísmicas diferentes a lo largo de este.

La estructura estudiada se ubica en un área perteneciente a la formación Puerto de Boniato, formada por alternancia de calizas organodetríticas aporcelanadas, algáceas y margas, con intercalaciones de sílice negro- parduzco (Nagy, 1983), donde se pudo constatar que no se espera que ocurran incrementos de la intensidad sísmica debido a fenómenos geológicos inducidos. Según estas características este suelo se clasifica como S1 según los criterios establecidos por la norma de requisitos sismorresistentes vigentes en el país (NC 46:1999), que lo describe como suelos rígidos de un espesor menor de 60 m hasta la base rocosa, siempre y cuando los estratos superiores estén compuestos por depósitos estables de arenas, gravas o arcillas duras.

Sin embargo, este análisis, basado en la formación geológica, no permite determinar la composición litológica del sitio, aspecto agudizado por la ausencia de calas ingeniero - geológicas en el área, por lo que se propuso y aplicó un método geofísico que permitiera obtener más información.

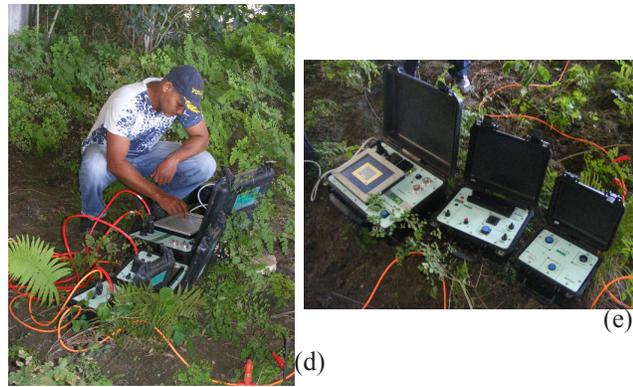
## APLICACIÓN DEL MÉTODO GEOELÉCTRICO DE LA RESISTIVIDAD

Para coadyuvar la obtención de información de campo referida a las características geológicas del sitio y como apoyo significativo a los estudios de vulnerabilidad sísmica, se aplican técnicas científicamente probadas que permiten corroborar datos obtenidos de forma empírica o analítica. Entre estos se encuentran los métodos geofísicos de exploración, que garantizan en gran medida aumentar el conocimiento de las condiciones del sitio en que se construyen las obras de ingeniería y que por tanto permiten considerar estas condiciones en los análisis realizados.

Uno de estos métodos es el de resistividad eléctrica usando la tomografía, procedimiento que consiste en suministrarle corriente al terreno a través de electrodos conectados entre sí, como resultado final se obtienen, a partir de la medición del voltaje producido por la misma, diferentes valores de resistividad en función del tipo de suelo, lográndose, luego del procesamiento de la información, perfiles con su corte litológico. Para la aplicación del método se utilizó una serie de equipos mostrada en la Figura 9. Este método es muy aplicado a la ingeniería civil ya que estudia la litología del terreno en profundidades someras, para obtener una información detallada de la litología donde está enclavada la obra y evaluar las posibles variaciones que pueden introducir, los cambios en profundidad del suelo, a la acción sísmica que actúa sobre las estructuras, teniendo en cuenta que la resistividad del terreno depende, en términos simplificados, de dos factores principales: contenido en humedad y contenido arcilloso (Arlandi, 2004).

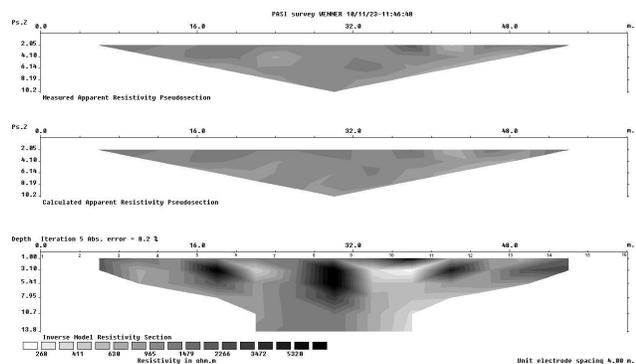
En el puente estudiado se realizaron mediciones coincidentes con sus ejes longitudinal y transversal, precisando la ubicación de los ejes de apoyo.

En la Figura 10, que muestra el modelo de resistividades verdaderas del subsuelo (tercer gráfico) en la dirección norte – sur, coincidente con el eje longitudinal del puente, y que cubre 56 metros de dicho eje y una profundidad de 13.8 metros, se observa una alta heterogeneidad litológica clasificándose de la siguiente forma: los valores de resistividad ubicados entre los 2 266 hasta los 5 320 ohm.m, es decir, los asociados con los colores más oscuros,



**Figura 9.** Serie de equipos utilizados para la obtención de los valores de resistividad. De izquierda a derecha: equipo combinado PASI (16SG12-M), energizador y caja de conexión (link-box)

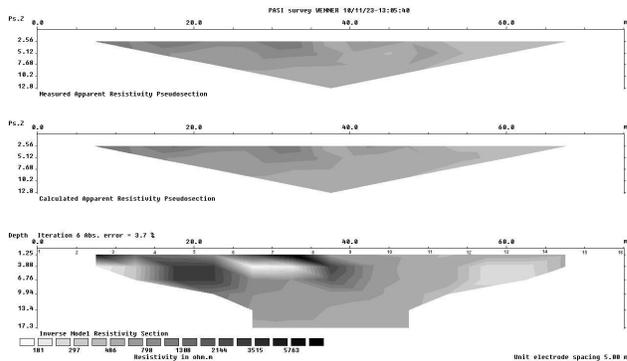
permiten suponer la existencia de una caliza órgano detrítica con intercalaciones de sílice, sin embargo, entre los 965 y 1 479 ohm.m están relacionados con una caliza margosa muy característica en esta zona, lo que denota un cambio en la dureza del suelo presente. Por último los valores que varían entre los 268 a 630 ohm.m pueden asociarse con la presencia de depósitos aluviales, es decir, sedimentos consecuencia del arrastre de la corriente. Otro aspecto significativo observado en el modelo lo constituye la presencia de grietas rellenas con eluvio (sedimentos), en las zonas ubicadas bajo los electrodos 11 y 12, que pueden incidir negativamente en el desempeño de la estructura, al amplificar las acciones sísmicas generadas por el terremoto de probable ocurrencia en la zona de emplazamiento.



**Figura 10.** Modelo de resistividades verdaderas del subsuelo. Eje longitudinal (Norte – Sur). Puente Arroyito. Autopista Nacional

Se realizó además un análisis en el eje transversal del puente, coincidente con los ejes de pilas de la estructura, en dirección este a oeste, por 75 metros, los electrodos separados a 5 metros y una profundidad de estudio de 17.3 metros (Figura 11). Los valores de resistividad que se encuentran entre 181 y 798 ohm.m caracterizan un suelo con

depósitos aluviales. Por otra parte, los colores asociados con 1 308 ohm.m identifican a la caliza margosa. Los valores de resistividad superiores a 2 144 ohm.m se relacionan con una caliza órgano detrítica con intercalaciones de sílice, constatando también las variaciones existentes en la dureza de los suelos presentes en el perfil litológico del área estudiada. Por debajo de los electrodos 5 y 8 se observa una falla inclinada.



**Figura 11.** Modelo de resistividades verdaderas del subsuelo: Eje transversal (Este - Oeste). Puente Arroyito. Autopista Nacional

Al analizar los perfiles litológicos obtenidos de la interpretación de los modelos de resistividades verdaderas del subsuelo se validan criterios tratados anteriormente, relacionados con la variabilidad del suelo, teniendo en cuenta las características de los puentes, que son estructuras largas, siendo mayor la probabilidad de que la cimentación de pilas y estribos sea soportada por diferentes tipos de suelo y por tanto la respuesta global cambie a partir de la amplificación o disminución del comportamiento ante la acción sísmica en cada uno de estos puntos de sustento.

En la superposición de los perfiles litológicos con el perfil longitudinal y transversal del puente respectivamente se puede observar como esta situación se manifiesta claramente.

En el sentido longitudinal, que en sus 56 metros incluye la ubicación de tres de los ejes de pilas, siendo el primero el próximo al estribo cerrado dirección Habana – Santiago de Cuba, que se apoya sobre un suelo caracterizado en sus primeros 3 metros por ser una caliza órgano detrítica. El segundo eje de pilas analizado se ubica directamente y hasta 7 metros de profundidad sobre las calizas, disminuyendo luego la resistividad lo que indica la presencia de estas mezclas con margas, que a su vez constituyen el apoyo del tercer y último eje de pilas analizado, seguidas de menores valores de resistividad.

A pesar de que la geología del área estudiada corresponde, en general, a la formación geológica Puerto de Boniato, que como se explica en el epígrafe anterior, según la clasificación establecida por la norma de construcciones sismorresistentes cubana (NC 46:1999), pertenece a un suelo S1, la aplicación del método geofísico de tomografía eléctrica permitió verificar, ante ausencia de perforaciones (calas ingeniero - geológicas), la presencia de sedimentos y cambios en la dureza de los suelos existentes en la zona. Este aspecto determina la heterogeneidad de la respuesta del suelo ante la acción sísmica, incidiendo significativamente en la evaluación del desempeño de la estructura.

Se puede concluir que en el sitio analizado la resistividad va disminuyendo desde arriba hacia abajo, mostrando que las rocas afloran en superficie, lo que permite afirmar que no es el terreno ideal para este tipo de obra ya que soporta mucha carga y peligrante ante un evento sísmico fuerte debido a la probable inestabilidad que puede presentarse.

## ANÁLISIS DE LA PELIGROSIDAD SÍSMICA DEL ÁREA

La ocurrencia de terremotos en Cuba data del siglo XVI, pero no es hasta 1855 que Andrés Poey muestra con su Catálogo de Sismos Históricos que el Archipiélago Cubano (Poey, 1855 a y b) está sometido a un peligro sísmico potencial. A partir de este momento son muchas las investigaciones sismológicas que se han realizado, teniendo como principal objetivo establecer los diferentes niveles de peligro sísmico en el país.

La actividad sísmica de Cuba está determinada por dos formas de origen: de interior de placa y de entre placas, lo que hace que su estudio sea muy complejo en algunas áreas. En el primer tipo se destaca la Región Suroriental por la frecuencia con que históricamente ocurren terremotos de alta magnitud, lo que implica que sea considerada como la de mayor peligrosidad sísmica del país y se corresponde con la Zona Sismogénica de Bartlett-Caimán, donde se han reportado 22 terremotos fuertes, de ellos 20 en la provincia de Santiago de Cuba y los dos más recientes en la provincia de Granma (Chuy, 1999).

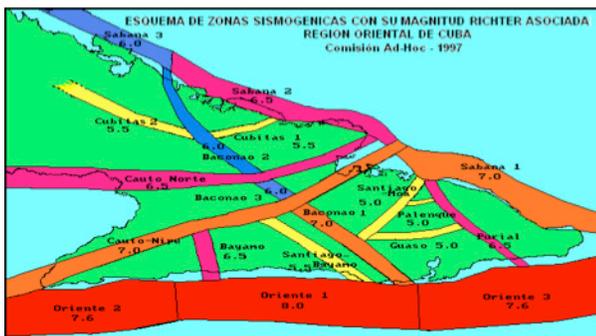
Es bueno significar que de estos sismos fuertes con origen en la estructura señalada, cercanos a la ciudad de Santiago, 2 de ellos produjeron intensidad (I) de 9.0 MSK en 1766 con magnitud  $M = 7.6$  Richter y en 1852 con magnitud  $M = 7.3$  Richter respectivamente (Chuy, 1999). Se reportaron daños considerables en toda la región oriental y en el caso de la ciudad de Santiago de Cuba se produjeron varias afectaciones; por ejemplo el terremoto

del 20 de agosto de 1852, el más fuerte reportado durante el siglo XIX en nuestro país, provocó el deslizamiento general de grandes piedras en la zona de la Sierra Maestra, el secado de arroyos y manantiales, así como largas y anchas grietas en terrenos secos y húmedos. Cabe señalar que las mayores destrucciones descritas en edificaciones fueron principalmente en las iglesias y locales de la administración pública (Chuy, 1999).

Otros terremotos que recientemente han afectado a esta ciudad, pero con menor fuerza se reportan en 1932 ( $M = 6.75$ ;  $I = 8.0$ ) y en 1947 ( $M = 6.75$ ;  $I = 7.0$ ). En el primero fueron afectadas el 80% de las edificaciones de la ciudad y sus alrededores; además se reportaron alteraciones batimétricas frente a la costa, tanto de emersión al este de la bahía de Santiago de Cuba, como de inmersión oeste de la bahía (Chuy, 1999).

Además de estos sismos fuertes ocurridos en la estructura señalada, cercanos a la ciudad de Santiago de Cuba, son de considerar otros sismos fuertes con epicentro en la prolongación de esta Zona Sismogénica de Bartlett-Caimán, localizados en zonas activas al Norte y Sur de La Española, donde históricamente también se reportan sismos de magnitudes grandes, incluyendo uno de magnitud  $M = 8.2$  en 1842, cuya área de perceptibilidad cubrió toda nuestra región oriental, señalándose incluso en el área de esta provincia reportes de 7.0 grados de intensidad MSK. Otros sismos que podemos mencionar de estas características son los ocurridos en 1770 ( $M=7.9$ ), en 1887 ( $M=7.9$ ) y en 1946 ( $M=8.1$ ) (Chuy & Álvarez, 1988).

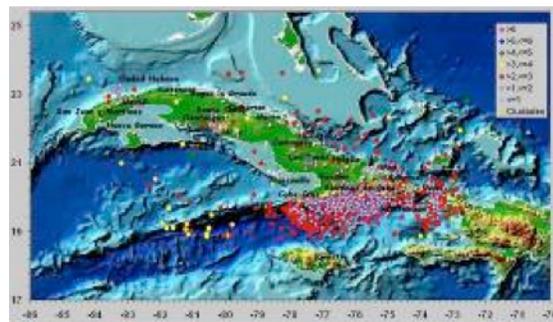
La Figura 12 representa las Zonas de Origen de Terremotos (ZOT) para la Región Oriental (Chuy et al. 1997), las cuales influyen directamente en la ocurrencia de terremotos en la región. A cada zona se le asocia con una magnitud determinada. Al Sur tenemos la zona Bartlett – Caimán (Oriente 1,2 y 3); así como las zonas Cauto-Nipe, Baconao, Cauto Norte, Bayamo y Purial.



**Figura 12.** Esquema de Zonas Sismogénicas de la región Oriental de Cuba. La zona de fallas Oriente se observa en color rojo en la parte baja de la figura (Chuy et al. 1997)

En relación con la actividad sísmica reciente más significativa en los últimos años, la Red de estaciones sismológicas del Servicio Sismológico Nacional de Cuba (SSNC) ha registrado en los últimos años más de 5 000 eventos sísmicos (SSNC, 2011) en el sector Santiago - Baconao de la provincia de Santiago de Cuba, validando el criterio de que en este territorio se acumula la mayor cantidad de eventos con magnitudes que pueden producir algún tipo de afectación en las construcciones.

En la Figura 13 se muestra la distribución espacial de los terremotos reportados por la Red de estaciones sismológicas del Servicio Sismológico Nacional de Cuba (SSNC) entre los años 2000 - 2010.



**Figura 13.** Ubicación espacial de los epicentros de terremotos en la región registrados en el periodo de 2000 – 2010. Datos SSNC (2011)

Con este análisis queda demostrado, que aún sin reportes de daños a puentes carreteros ante la ocurrencia de sismos fuertes, es real la necesidad de realizar estudios dirigidos a evaluar el desempeño de estas estructuras. En la Tabla 1 se muestran los valores de aceleración máxima (PGA) e intensidad (I) esperados en la zona de emplazamiento del puente analizado.

**Tabla 1.** Aceleración máxima e intensidad equivalente para el suelo del área de ubicación del puente

Suelo	PGA (cm/s <sup>2</sup> )	PGA (%g)	I (EMS)
S <sub>1</sub>	178.5	0.182	8.0

## ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA ESTRUCTURAL

### • DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS DE LA ESTRUCTURA

En la evaluación del desempeño de estructuras construidas, juega un papel determinante la rigidez que ésta manifieste ante las sollicitaciones generadas por eventos sísmicos moderados y/o fuertes.

La rigidez, referida a la relación entre la fuerza cortante absorbida por el pórtico y el desplazamiento que manifiesta la estructura, determina su respuesta estructural, pues aunque estrechamente ligada a la resistencia de los elementos estructurales, en ocasiones no es proporcional y por tanto puede constituir la causa de daños graves e incluso el colapso.

Uno de los parámetros que, de forma explícita, permite estimar las condiciones de rigidez de la estructura es el período natural de vibración (T), definido como el tiempo que toma la estructura en completar una oscilación completa y que por tanto depende de su masa y su rigidez.

Uno de los códigos que propone este tipo de ecuaciones es la Norma de construcción sismorresistente: puentes (NCSP-07), que plantea expresiones para la estimación del período en función del modelo correspondiente al puente analizado, en el caso de las estructuras isostáticas, los autores de este trabajo consideran un modelo de pila aislada, suponiendo que la acción sísmica es soportada básicamente por las pilas de forma independiente sin que exista interacción importante con las adyacentes. La expresión propuesta se muestra a continuación:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{G_i}{g \cdot K_i}} \quad (1)$$

Donde:  $G_i$  es el peso efectivo, que debe incluir el peso de la parte del tablero soportado por la pila  $i$ , el de la sobrecarga concomitante con el sismo y el de la mitad superior de la pila  $i$ ;  $g$  la aceleración de la gravedad y  $K_i$  la rigidez de la pila  $i$  en la dirección considerada.

No obstante, a pesar de contar con expresiones generales como la mostrada, en ocasiones otros análisis son necesarios, teniendo en cuenta que en muchos casos no se cuenta con la información de proyecto adecuada para determinar el peso y la rigidez, además de que en opinión de los autores de esta investigación, no se tienen en cuenta factores que intervienen en la rigidez del sistema estructural como son el tipo de suelo del sitio de emplazamiento y las condiciones de unión entre los elementos, entre otros. Esto generó la necesidad de obtener ecuaciones matemáticas a partir de estudios estadísticos, basados en investigaciones experimentales, específicamente, la ejecución de mediciones instrumentales.

Para el análisis se evaluaron las características de los puentes construidos con la tipología cubano – italiana, constatando la existencia de 41 estructuras en las carreteras de interés nacional de Santiago de Cuba, según el inventario

del Centro Provincial de Vialidad (CPV, 2006) y las inspecciones de campo realizadas (Candebat, 2010).

Se escogió una muestra en número superior al 30 % de esta población, para lo cual se propusieron criterios de selección en función de las condiciones ingeniero – geológicas, número y dimensiones de las luces, altura de la estructura, esvaje y existencia de curvas, seleccionando 21 estructuras que constituyen el 51 % del total de las obras de fábrica mayores construidas con esta tipificación.

Para la ejecución de las mediciones instrumentales se seleccionaron puntos en cada una de las estructuras en función del número de luces, y garantizando ubicaciones sobre los apoyos de los tramos y en el centro de estos, obteniendo finalmente un conjunto de señales de velocidad considerando como fuente de excitación las vibraciones ambientales en cada uno de los puntos, lo que permitió, luego de la obtención de los espectros de Fourier y de respuesta de velocidad, utilizando el software DEGTRA 2000 del Instituto de Ingeniería de la UNAM, conformar una base de datos con 153 valores de período (T) y frecuencia (f) en cada dirección: dos horizontales (norte – sur, este – oeste) y una vertical. Estos resultados fueron graficados, evaluando su mejor ajuste a partir de líneas de tendencia o regresión polinómicas de segundo orden, caracterizadas por coeficientes de determinación ( $R^2$ ) superiores a 0.8, lo que permitió asumir con suficiente fiabilidad que los valores de período (T) de estructuras construidas con esta tipología deben responder a los obtenidos por las ecuaciones recomendadas en función de algunas de sus características geométricas. Para validar dichas ecuaciones se seleccionaron 10 estructuras de las cuales se pudo obtener la masa y la rigidez, calculando el período fundamental a partir de la expresión que recomienda NCSP-07 y cuyos valores son similares, concluyendo entonces que es posible utilizar las ecuaciones obtenidas instrumentalmente (2 y 3) para el análisis de este parámetro en puentes construidos con la tipología estudiada.

Dirección longitudinal:

$$T_L = 0.0043G_V^2 + 0.035G_V + 0.2249 \quad (2)$$

Dirección transversal:

$$T_T = 0.0047G_V^2 + 0.0266G_V + 0.1955 \quad (3)$$

Donde:  $G_V$  es el gálibo vertical de la estructura,  $T_L$  es el período natural de vibración en dirección longitudinal y  $T_T$  en el dirección transversal.

Para la determinación del período fundamental de vibración del puente sobre el río Arroyito, se empleó el método explicado anteriormente, obteniendo señales de velocidad con un tiempo de duración de tres a cinco minutos y a partir del análisis de los espectros de Fourier y de respuesta de velocidad, logrando los valores de frecuencia (f) y períodos fundamentales (T) de la estructura en tres direcciones, dos de ellas coincidentes con sus ejes longitudinal y transversal, para lo cual se escogieron puntos de medición ubicados en zonas cercanas a los apoyos y en el centro de las luces utilizando una serie profesional de mediciones (Figura 14) constituido por un sismómetro o sensor Marslite, el cual fue ubicado haciendo coincidir su componente norte – sur con el eje longitudinal de la estructura, y un digitalizador EDAS 3-M para la recepción de la señal, utilizando, como fuente de excitación, las vibraciones ambientales. Posteriormente se estimaron los valores de período calculado utilizando las ecuaciones 2 y 3, propuestas para la tipificación, comparando los valores obtenidos por ambos métodos para caracterizar la rigidez de la estructura. En la Tabla 2 se muestran los resultados:



**Sismómetro MARSLITE:**

Este instrumento provee una respuesta plana hasta los 5 segundos y mantiene características de portatibilidad, robustez y buena ganancia para mediciones de campo. Su característica más notable es su bajo consumo (alrededor de 100 mW), y conserva al mismo tiempo un nivel de ruido interno aceptable (aproximadamente 1 nm/s RMS a 1 Hz)

**Sistema de adquisición de datos de terremotos**

**EDAS - 3M:**

Equipo de 16 bit, con tres canales digitales de adquisición para uso en transferencia de señales analógicas desde un sismómetro a señales digitales, las cuales pueden ser fácilmente enviadas y procesadas. Está diseñado para la conexión con sismómetros con tres componentes.



*Figura 14. Sismómetro Marslite y Sistema de adquisición de datos EDAS – 3M*

**Tabla 2.** Resultados obtenidos en el cálculo del período

Período fundamental (Seg)			
Período calculado expresiones (TL y TT)		Período instrumental	
Long	Transv	Long	Transv
0.175	0.210	0.179	0.219

Como se aprecia, los resultados obtenidos instrumentalmente son semejantes a los valores calculados con las ecuaciones propuestas validando el criterio de que desde el punto de vista de su rigidez, el puente muestra un comportamiento consistente con el esperado en estructuras similares, por lo tanto se puede afirmar que esta condición es adecuada.

**• APLICACIÓN DE METODOLOGÍA PRELIMINAR PARA LA EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD SÍSMICA**

Para la evaluación de este parámetro se aplicó una metodología de evaluación preliminar de la vulnerabilidad sísmica estructural de puentes de carreteras de vigas, de hormigón, propuesta por Candebat et al (2010) y actualizada recientemente a partir de una encuesta piloto realizada a 7 expertos, escogidos en función de su conocimiento sobre la temática y pertenecientes a empresas de diseño e ingeniería, universidades y centros de investigación cubanos y a la Oficina Nacional de Evaluación Sísmica, Vulnerabilidad de Infraestructura y Edificaciones (ONESVIE) de República Dominicana. En la Tabla 3 se muestra la distribución de los expertos seleccionados por especialidad. A partir del resultado obtenido en el análisis de sus opiniones se validaron los aspectos a evaluar para determinar el posible desempeño de estas estructuras ante eventos sísmicos fuertes y las puntuaciones individuales de cada parámetro a considerar, así como la influencia de cada elemento (superestructura, subestructura y sitio) en su comportamiento global.

**Tabla 3.** Distribución de expertos según su especialidad

Entidad	Especialidad	Cant.
Universidades	Ingeniería Civil	2
Diseño	Ingeniería Civil	2
CENAI	Ingeniería Civil	1
	Geofísica	1
ONESVIE	Ingeniería Civil	1
<b>Total</b>		<b>7</b>

De ellos tres tienen doctorados en ciencias y uno tiene un master en ciencias.

A continuación se comentan los parámetros que evalúa la metodología aplicada:

- Especificaciones de diseño: Fecha de aprobación de los códigos que regulan el diseño sísmico de puentes. Aspecto evaluado por otros autores y que permite analizar la consideración o no de requisitos sismorresistentes en el diseño y/o construcción de la estructura. El año de referencia en Cuba es 1999, período en que se aprueba el código sísmico vigente que trata aspectos relacionados con el diseño de puentes (NC 46:1999).
- Tipo de superestructura: Se valora el funcionamiento estructural del puente, las características del tablero, su continuidad y su relación con la subestructura.
- Longitud de apoyo: Comprobación del cumplimiento del valor de la entrega de las vigas a los apoyos con respecto a lo establecido en el código sísmico vigente (NC 46:1999).
- Existencia de trabas sísmicas: La existencia o no de estos elementos, así como sus dimensiones, materiales y su capacidad al corte, fundamentales en el comportamiento de las estructuras al impedir la caída de los tramos por desplazamientos importantes generados por la acción sísmica, sobre todo en la dirección transversal.
- Existencia de vigas transversales (diafragmas): La existencia o no de estos elementos, importantes para garantizar la rigidez transversal de la estructura.
- Existencia de dispositivos de apoyo: El análisis de la existencia o no de estos elementos, así como su calidad y estado técnico es determinante por la función que ejercen en la transmisión de las cargas de la superestructura a la subestructura y en la oposición al movimiento sísmico.
- Trazado de la superestructura: La existencia de esviaje o curvas horizontales en la estructura. Puentes con esviajes superiores a 30° son más vulnerables por los incrementos de los esfuerzos cortantes en determinadas zonas del tablero. El esviaje y las curvas horizontales incrementan la probabilidad de la caída de los tramos. Según algunos autores, puentes con ángulo de esviaje mayor de 45° y/o curvas superiores a 90° son considerados de alto riesgo. Este aspecto también influye en la subestructura del puente pues los esfuerzos cortantes en el tablero generan solicitaciones axiales en las columnas de pilas y estribos.
- Existencia de curvas verticales: Se analiza tomando como referencia la bibliografía existente que, según la experiencia mundial, establece como valor límite máximo el 6 % de pendiente para un buen comportamiento.
- Período de la estructura: Se comparan los valores de período instrumental obtenidos de las mediciones realizadas con los valores distintivos de las tipologías existentes en nuestras carreteras aplicando las ecuaciones obtenidas de los análisis estadísticos. Este análisis es vital pues permite obtener criterios acerca de la rigidez de la estructura.
- Posibilidades de golpeteo: Aspecto importante pues el incumplimiento de lo establecido con respecto a la separación entre dos estructuras puede provocar daños considerables por el choque entre ellas, siendo la situación más desfavorable cuando poseen alturas diferentes y el tablero de una tiene contacto con la subestructura de la otra.
- Tipo de subestructura: Analiza las características geométricas de las pilas y estribos. Teniendo en cuenta, en el caso de los estribos cerrados, la existencia de un drenaje que garantice la evacuación del agua proveniente de las lluvias u otra fuente y que pueda ejercer presión sobre estos elementos, incrementando su vulnerabilidad ante un sismo.
- Estado técnico de la subestructura: Valora el resultado obtenido de la aplicación de lo establecido en la norma cubana vigente (NC 335:2004), en lo referido a la evaluación del estado técnico de puentes en Cuba, sobre todo en relación con los daños existentes en la subestructura del puente.
- Altura de las columnas de pilas y estribos: Define, en función de la experiencia mundial, las alturas límites para un mejor desempeño sísmico.
- Técnica de construcción de subestructura: Evalúa si fue construida hormigonada in situ, prefabricada o con ambas técnicas, a partir del análisis de la importancia del monolitismo de las uniones entre las columnas y la cimentación, aspecto determinante en el comportamiento y que ha sido causa del fallo de numerosos puentes en el mundo.
- Aceleración del sitio: Análisis de la peligrosidad del sitio en términos de aceleración pico del terreno (PGA) y en función de la clasificación que establece la norma cubana vigente (NC 46:1999).

- Erosión y socavación: La existencia de estos fenómenos son decisivos en el desempeño de la estructura. Analizando la influencia de la socavación en la estabilidad del puente.
- Probabilidad de ocurrencia de fenómenos geológicos inducidos: Evalúa la posibilidad de que fenómenos geológicos inducidos (licuación) ocurran en el sitio.
- Dureza de los suelos: Se valoran las características del suelo del sitio en función de la clasificación que realiza la norma sísmica vigente (NC 46:1999).
- Irregularidad topográfica del suelo: Características del relieve en el sitio, nivel de desplante de las cimentaciones de pilas y estribos.
- Existencia de fallas geológicas: Valora la influencia de las fallas geológicas cercanas en la amplificación de los efectos de un sismo sobre la estructura.
- Homogeneidad del suelo: Análisis de las variaciones existentes entre ejes de pilas y estribos para tener en cuenta las posibles variaciones en la respuesta de estos elementos ante la acción sísmica.

En la Tabla 4 se reflejan los intervalos de puntuación para la estimación de la vulnerabilidad según los valores obtenidos de la aplicación de la metodología.

**Tabla 4.** Rangos para estimación de la vulnerabilidad sísmica

Evaluación	Vulnerabilidad
0.0 – 0.25	Baja
0.26 – 0.45	Moderada
0.46 – 1.00	Alta

Como resultado del análisis se obtuvo que el puente sobre el río Arroyito posee una vulnerabilidad sísmica asociada con la superestructura alta (0.65), debido a las siguientes condiciones (Figura 15):

1. Es un puente de funcionamiento estructural isostático.
2. Diseñado antes de la aprobación del código sísmico cubano vigente en 1999 (NC 46:1999), por lo tanto no se consideraron en su proyección los conocimientos actuales del diseño sismorresistente.
3. No posee trabas sísmicas. En sismos fuertes ocurridos en el mundo, muchas estructuras con características similares han fallado por la ausencia o el mal diseño de

estos elementos, lo que ha propiciado la caída de los tramos isostáticos.

4. No se observan dispositivos de apoyo lo que permite suponer que de colocarse, se utilizaron materiales inadecuados como los observados en otras estructuras de las misma vía y que han sido destruidos.

Algunos de estos aspectos son tratados por Aguiar (2011) como la causa de daños en puentes durante el terremoto del 27 de febrero del 2010 en Chile.



**Figura 15.** Vigas simplemente apoyadas sobre el cabezal de pila. Ausencia de trabas sísmicas y dispositivos de apoyo

Sin embargo, la estructura posee ciertas características que favorecen un mejor comportamiento como el hecho de ser recta y no poseer curvas verticales, condiciones que, de existir, favorecen en gran medida desempeños inadecuados ante eventos sísmicos fuertes. Aunque en el país no se han reportado daños ante acciones sísmicas de puentes prefabricados de hormigón, los aspectos mostrados demuestran la necesidad de prestar especial atención al diseño de la superestructura.

Por otra parte, la estructura analizada posee una vulnerabilidad asociada con la subestructura baja (0.25), teniendo en cuenta que se encuentra ubicada en un sitio caracterizado como suelo duro, no obstante, los ensayos geofísicos realizados demostraron su heterogeneidad y por tanto, la probabilidad de variaciones de su respuesta ante el sismo. Otro aspecto es la presencia de erosión en los enfoques de la estructura y la peligrosidad sísmica del área.

La vulnerabilidad general de la estructura, obtenida de la aplicación de la expresión propuesta en la metodología, es moderada:

$$I_{vSE} = [25\% (V_{SpE}) + 45\% (V_{SbE}) + 30\% (V_{St})] / 100\%$$

$$I_{vSE} = 25\% (0.65) + 45\% (0.25) + 30\% (0.15) = 0.32$$

Donde:

$I_{vSE}$  – Índice de vulnerabilidad sísmica estructural.

$V_{SpE}$  – Vulnerabilidad sísmica estructural de la superestructura del puente.

$V_{SbE}$  – Vulnerabilidad sísmica estructural de la subestructura del puente.

$V_{St}$  – Vulnerabilidad asociada con el sitio de emplazamiento.

El resultado final del análisis manifiesta la importancia de la superestructura en el desempeño general de la estructura, validando los novedosos criterios defendidos entre otros por Corres et al. (2004) referidos a la influencia de las condiciones del tablero en el comportamiento del puente y por tanto la necesidad de potenciar el diseño conceptual como aspecto básico de la proyección de este tipo de obra de ingeniería.

## CONCLUSIONES

1. La tipología de construcción del puente estudiado posee aspectos relacionados con su concepción, que incrementan la probabilidad de ocurrencia de daños importantes ante sismos significativos en el área.

2. Los métodos experimentales empleados para la determinación del período natural de vibración de la estructura y la obtención de los perfiles litológicos del sitio de ubicación del puente analizaron permitieron obtener resultados que apoyan la evaluación de su vulnerabilidad sísmica estructural, sobre todo, ante la ausencia de información de proyecto e ingeniero – geológica para un análisis más preciso.

3. Aunque de forma preliminar, la metodología aplicada permitió obtener un resultado bastante fiable acerca del posible desempeño estructural del puente sobre el río Arroyito, poniendo de manifiesto los aspectos que más incidencia poseen en el nivel de vulnerabilidad obtenido:

- Estructura construida antes de la puesta en vigor del código sismorresistente actual.

- Dispositivos de apoyo en mal estado y ausentes en muchos casos.

- No posee trabas sísmicas para evitar la caída de los tramos isostáticos.

4. Los resultados obtenidos corroboran la importancia del análisis del tablero como elemento decisivo en el desempeño global de la estructura.

## REFERENCIAS

AGUIAR, R. (2011). El mega sismo de Chile 2010 y lecciones para el Ecuador. ISBN 978-9978-92-979-7. pp. 130 – 157.

ARLANDI, M. (2004). Geofísica aplicada a la obra civil. Método geoelectrico y sísmica de refracción. Casos prácticos. www.geoconsult.es. 63 pp.

CANDEBAT, D., GODÍNEZ, G., OLIVA, R., PÉREZ, P., ARTIMES, A. (2010). Vulnerabilidad sísmica de puentes de hormigón: tipología cubano – italiana. En memorias de la XV Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura. V Taller Ingeniería y Arquitectura para la reducción de desastres (V TIARD). ISBN: 978-959-261-317-1.

CANDEBAT, D. (2010). Informe de Proyecto de Investigación científica: Evaluación de la vulnerabilidad sísmica de puentes de hormigón de las carreteras de interés nacional de Santiago de Cuba. Fondos del CENAI. 66 pp.

CENTRO PROVINCIAL DE VIALIDAD. CPV. (2006). Inventario de puentes de las carreteras de interés nacional de Santiago de Cuba. Fondos del CPV.

CHUY, T. J. & ÁLVAREZ, J.L. (1988): Sismicidad Histórica de a Española. En: Comunicaciones Científicas sobre Geofísica y Astronomía, No. 16, La Habana.

CHUY, T.J., ORBERA, L., HERNÁNDEZ, J. R., MAGAZ, A., SÁNCHEZ, F., PÉREZ, C., GONZÁLEZ, E., FUNDORA, M., RUBIO, M., ÁLVAREZ, J. L., COTILLA, M., ARANGO, E. D., ITURRALDE-VINENT, M., RODRÍGUEZ, J., MARQUETTI, M. C., RAMÍREZ, R. (1997). Dictamen conclusivo. Comisión Ad-Hoc para la determinación de las zonas sismogénicas de la región oriental de Cuba y zonas aledañas. En: Revista Electrónica “Ciencia en su PC”, Santiago de Cuba. ISSN 1027-2887, vol. 2, No.2.

CHUY, J.T. (1999). Macrosísmica de Cuba y su utilización en los estimados de Peligrosidad y Microzonación

- Sísmica. Tesis en opción al grado de Doctor en Ciencias Geofísicas. Fondos del MES y del CENAIS.
- CORRES, H. & DEFANT, M. (2004). Principios estructurales del proyecto de puentes de hormigón en zonas sísmicas. 27 pp.
- CUEVAS, J. (2001). 500 años de construcciones en Cuba. D.V. Chavín, Servicios Gráficos y Editoriales, S.L., para esta edición 2001 Ibiza, 4 - 28009 Madrid.
- GOBIERNO DE ESPAÑA, MINISTERIO DE FOMENTO. NORMA DE CONSTRUCCIÓN SISMORRESISTENTE: PUENTES. (NCSP-2007). España. Anejo 2. Método del modo fundamental. 4 pp.
- GÓMEZ, C., OLLER, S., BARBAT, A. (2002): Evaluación de la vulnerabilidad del Puente Warth en Austria. Revista internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil 3. [www.uprm.edu/civil/revistadesastres/Vol2Num1](http://www.uprm.edu/civil/revistadesastres/Vol2Num1).
- GONZÁLEZ, L. (1999): Experiencias y métodos para la conservación de puentes de carretera de en la República de Cuba. Tomo I. Empresa de proyectos y consultoría. Matanzas. Cuba. ISBN 959-7116-04-9. 37 pp.
- GOOGLE MAPS - ©2011 Google. <http://maps.google.es>.
- NAGY, E. (1983): Contribución a la Geología de Cuba Oriental. Instituto de Geología y Paleontología. Academia de Ciencias de Cuba. Editorial Científico Técnica. La Habana. Cuba.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN. NORMA CUBANA NC 46:1999: Construcciones Sismorresistentes. Requisitos Básicos para el Diseño y Construcción. 95 pp.
- OFICINA NACIONAL DE NORMALIZACIÓN NC (2004): NORMA CUBANA NC 335:2004. Inspección y Conservación de puentes. Códigos de buenas prácticas. 51 pp.
- POEY, A. (1855a): Tableau chronologique des tremblements de terre ressentis a l'île de Cuba de 1551 á 1855. París.
- POEY, A. (1855b): Supplement au tableau chronologique des tremblements de terre ressentis a l'île de Cuba de 1551 á 1855. París.
- PROYECTO TÍPICO. PT (1973). Tipificación cubano – italiana. Fondos de la Empresa de Proyectos No. 15. Santiago de Cuba.
- SAUTER, F. (1993). Desplazamientos: consideración prioritaria en el diseño sismorresistente de puentes. Memorias del VII Seminario latinoamericano de Ingeniería sismorresistente y Primeras Jornadas Andinas de Ingeniería estructural Mérida, Venezuela. 15 pp.
- SSNC (2011): Base de Datos del Servicio Sismológico Nacional de Cuba. Fondos del CENAIS – CITMA, Santiago de Cuba.
- TAYLOR, G., VALDÉS, E. (1990): Puentes Tomo I y II. Editorial Pueblo y Educación. Ciudad de la Habana. Cuba. 207 pp.
- TERREMOTO DE CHILE DEL 27-02-2010-PARTE 2 (2010). Edición: Ángel San Bartolomé.