

**ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO**



**CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

***ANÁLISIS SÍSMICO DEL PUENTE NORTE DE ESMERALDAS.***

**PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE:**

**INGENIERO CIVIL**

**ELABORADO POR:**

**CAPT. DE E. JORGE L. JATIVA G.**

**SANGOLQUÍ, AGOSTO DEL 2011.**

**DOS MODELOS DE ANÁLISIS SÍSMICO SIMPLIFICADOS PARA  
PUENTES CON AISLADORES FPS. CASO DE PUENTE NORTE DE ESMERALDAS -  
ECUADOR.**

**TWO MODELS OF SIMPLIFIED SEISMIC ANALYSIS FOR  
BRIDGES WITH INSULATING FPS. CASE OF NORTH BRIDGE OF EMERALDS -  
EQUATOR.**

Roberto Aguiar Falconí (1) y Jorge L. Játiva G (2)

(1) Dr. Ing. Director del Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del  
Ejército. Quito-Ecuador [raguiar@espe.edu.ec](mailto:raguiar@espe.edu.ec)

(2) Asistente. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. Quito-  
Ecuador [jljativa@hotmail.com](mailto:jljativa@hotmail.com)

**Resumen**

Se realiza el análisis sísmico, del Puente Norte que tiene aisladores de base tipo péndulo de fricción FPS y que se halla ubicado en el estuario del río Esmeraldas en Ecuador, mediante dos modelos simplificados. En el primer modelo no se considera la presencia del suelo que está en la parte exterior de los estribos tipo cajón; en el segundo modelo si se considera este suelo y es modelado con elementos finitos rectangulares.

Por otra parte el FPS es modelado como un resorte cuya rigidez se obtiene en función del período objetivo y del radio de curvatura del aislador. En cambio en el segundo modelo a más del resorte se tomó en cuenta el amortiguamiento del aislador obtenido en forma experimental.

Se consideró un modelo elasto perfectamente plástico para definir las curvas carga deformación del suelo que rodea a los pilotes, el mismo que es modelado mediante resortes. Finalmente se debe indicar que se trabajó con elementos finitos lineales con masa uniforme distribuida en los pilotes y con elementos rectangulares en la pila central del puente.

Las respuestas encontradas fueron comparadas en término de desplazamientos y de fuerzas horizontales, generados con un acelerograma artificial compatible con el Espectro del Código Ecuatoriano de la Construcción, para el sitio en que se halla el puente Norte.

**Palabras claves:** (aisladores-FPS-espectro-desplazamientos-deformaciones-suelo-resorte )

**Abstract**

Seismic analysis is performed, of the North Bridge that has insulators of base type pendulum of friction FPS and that he/she is located in the estuary of the river Emeralds in Ecuador, by means of two simplified models. In the first model it is not considered the presence of the floor that is in the external part of the stirrups type drawer; in the second model if it is considered this floor and it is modeled with rectangular finite elements.

On the other hand the FPS is modeled as a spring whose rigidity is obtained in function of the objective period and of the radius of bend of the insulator. On the other hand in the second model to more than the spring he/she took into account the reduction of the insulator obtained in experimental form.

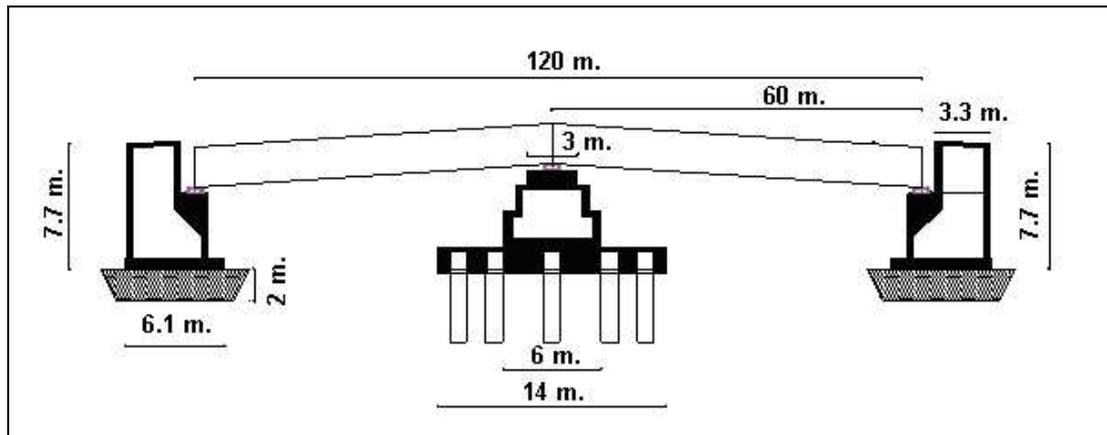
It was considered a model perfectly plastic elasto to define the curves it loads deformation of the floor that surrounds to the piles, the same one that is modeled by means of springs. Finally it should be indicated that one worked with lineal finite elements with uniform mass distributed in the piles and with rectangular elements in the central pile of the bridge.

The opposing answers were compared in term of displacements and of horizontal forces, generated with a compatible artificial acelerograma with the Spectrum of the Ecuadorian Code of the Construction, for the place in that he/she is the North bridge.

**Key words:** (insulator-FPS-spectrum-displacement-deformation-floor-spring)

**1. INTRODUCCIÓN**

Sobre el estuario del río Esmeraldas, en Ecuador se construyó tres puentes con aisladores de base tipo péndulo de fricción, denominados: Puente Sur, que tiene 160 m., de luz; Puente Norte de 120 m., de luz y Puente Norte 1, de 108 m., de luz. En este artículo se analiza el Puente Norte ante la acción de un sismo artificial que tiene una duración de 20 s., y es compatible con el espectro del Código Ecuatoriano de la Construcción, para la zona del proyecto en un perfil de suelo S2. El registro tiene una aceleración máxima de 0.4 g , siendo g la aceleración de la gravedad.



**Figura 1** Geometría del Puente Norte.

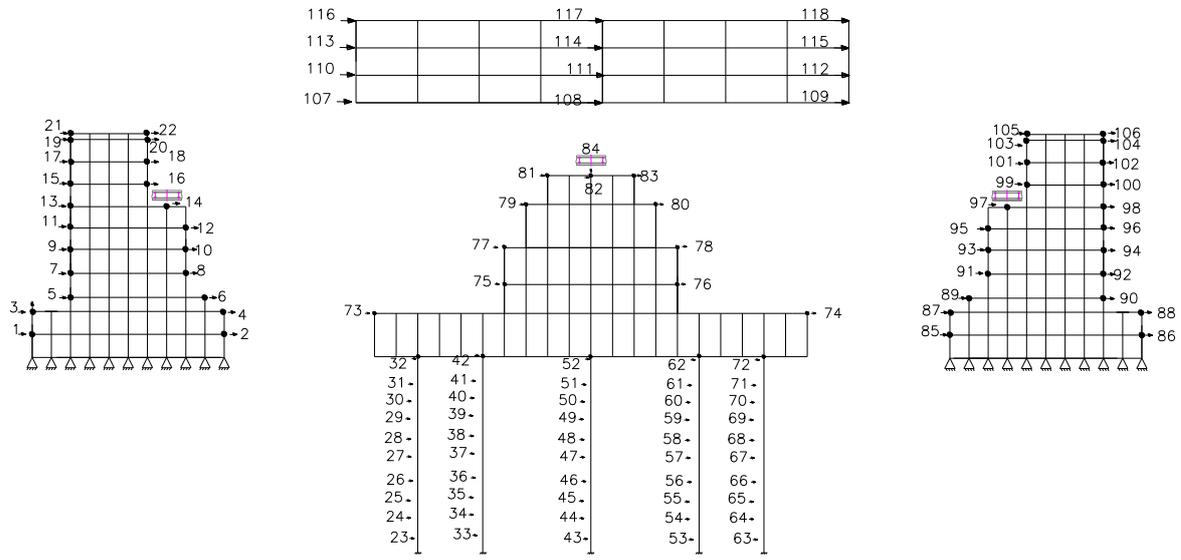
En la figura 1 se presenta la geometría del puente Norte, que está compuesto por dos estribos tipo cajón cerrados sobre una cimentación de hormigón ciclópeo de 2 m., de altura y una pila central que descansa sobre 10 pilotes de 1.22 m., de diámetro cimentados a 17 m., de profundidad. Por lo tanto, el puente tiene 3 apoyos y sobre cada uno de ellos se han colocado 3 aisladores FPS (Frictional Pendulum System), de tal manera que el puente tiene 9 aisladores tipo péndulo de fricción.

La superestructura está compuesta por 6 vigas de acero estructural ASTM A-588, con características especiales de resistencia a la oxidación, tipo I , de espesor variable los mismos que se apoyan sobre los 9 aisladores sísmicos. Sobre estas vigas se encuentra el tablero del puente, que es una losa maciza de hormigón armado de 0.25 m; luego se tiene una capa de asfalto de 0.075 m., con sus respectivas veredas y parterre central. El ancho del puente es de 18.90 m., que permite tener cuatro carriles.

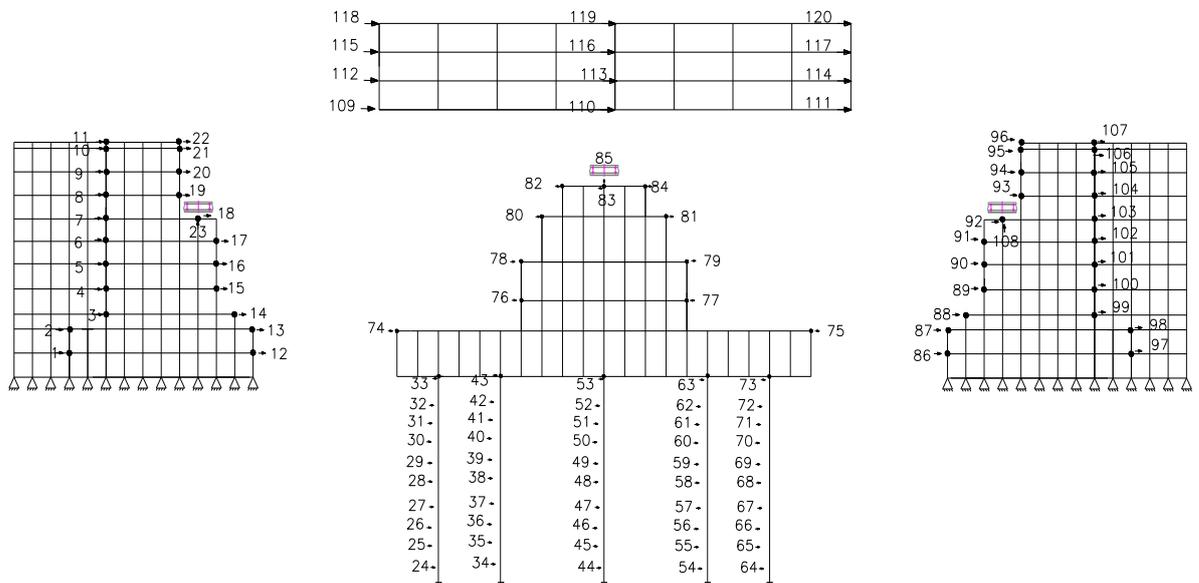
Se consideraron dos modelos de análisis, el primero no considera el suelo que existe en la parte exterior de los estribos y el segundo si toma en cuenta este suelo, el mismo que es modelado con elementos finitos rectangulares. En la figura 2 se muestran los dos modelos de análisis, con sus respectivos grados de libertad considerados para hallar la respuesta sísmica. El primer modelo tiene 118 coordenadas principales y el segundo 120. La diferencia se debe a que en el segundo modelo se incorporó como coordenada principal a la componente vertical donde se apoyan los FPS. El número de coordenadas secundarias superan fácilmente los dos mil grados de libertad.

En el modelo 2 indicado en la parte inferior de la figura 2 también se ha colocado los elementos finitos del suelo que se encuentra en la parte exterior de los

estribos. No se ha dibujado pero si se consideró en los dos modelos el suelo que rodea a los pilotes el mismo que fue modelado como un resorte con comportamiento no lineal.



**MODELO 1**



**MODELO 2**

**Figura 2** Modelos de análisis sísmico de Puente Norte.

**2. MARCO TEÓRICO**

Los pilotes fueron modelados con elementos finitos lineales, con masa uniforme distribuida. Aguiar (1981). Las funciones de forma con las cuales se halla la matriz de rigidez y de masas, son las siguientes:

$$\begin{aligned} \left\{ \begin{matrix} u(x) \\ v(x) \end{matrix} \right\} &= \left\{ \begin{matrix} \frac{X}{L} \\ \frac{X^2}{L^2} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} u_1 \\ v_1 \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \frac{X^2}{L^2} \\ \frac{X^3}{L^3} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} u_2 \\ v_2 \end{matrix} \right\} \\ \left\{ \begin{matrix} u(x) \\ v(x) \end{matrix} \right\} &= \left\{ \begin{matrix} \frac{X}{L} \\ \frac{X^2}{L^2} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} u_1 \\ v_1 \end{matrix} \right\} + \left\{ \begin{matrix} \frac{X^2}{L^2} \\ \frac{X^3}{L^3} \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} u_2 \\ v_2 \end{matrix} \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

Siendo L, la longitud del elemento y X la abscisa de un punto del elemento. Los elementos de la matriz de rigidez k, y de masas m de un elemento, se obtienen a partir de las funciones de forma, con las expresiones siguientes:

$$k(i, j) = \int_0^L EI \frac{d^2 \phi_i}{dx^2} \frac{d^2 \phi_j}{dx^2} dx \quad m(i, j) = \int_0^L \bar{m} \phi_i \phi_j dx \quad (4)$$

Donde EI es la rigidez a flexión del elemento;  $\bar{m}$  es la masa por unidad de longitud. Se obtuvo la matriz de rigidez y de masas por ensamblaje directo y luego se condensa estas matrices a los grados de libertad horizontales. Aguiar (2004, 2007).

Para los estribos y pila se trabajó con elementos finitos rectangulares; con dos grados de libertad por nudo, desplazamiento horizontal y vertical; con el propósito de contemplar la flexión en el centro de gravedad del elemento se consideró cuatro grados de libertad más. Las funciones de forma utilizadas en coordenadas naturales se presenta en la tabla 1. Oñate (1992), Cook et al. (2002).

Se trabajó con dos puntos de la cuadratura de gauss, en cada sentido, para hallar la matriz de rigidez del elemento finito, con la siguiente ecuación:

$$k = \int_V B^t E B dV \quad (5)$$

Donde **k** es la matriz de rigidez de un elemento finito; V es el volumen; **B** es la matriz que relaciona los esfuerzos con las deformaciones es una matriz de 3X12; **E** es la matriz de elasticidad para el caso de tensión plana. En función del espesor e del elemento, la ecuación ( 5 ) se transforma en:

$$k = \int_A J B^t E B \det(J) e dA \quad (6)$$

Las variables no definidas son dA que es el diferencial de área; J la matriz Jacobiana; det(J) es el determinante de la matriz Jacobiana, que reporta el área de influencia en el punto de la cuadratura de gauss.

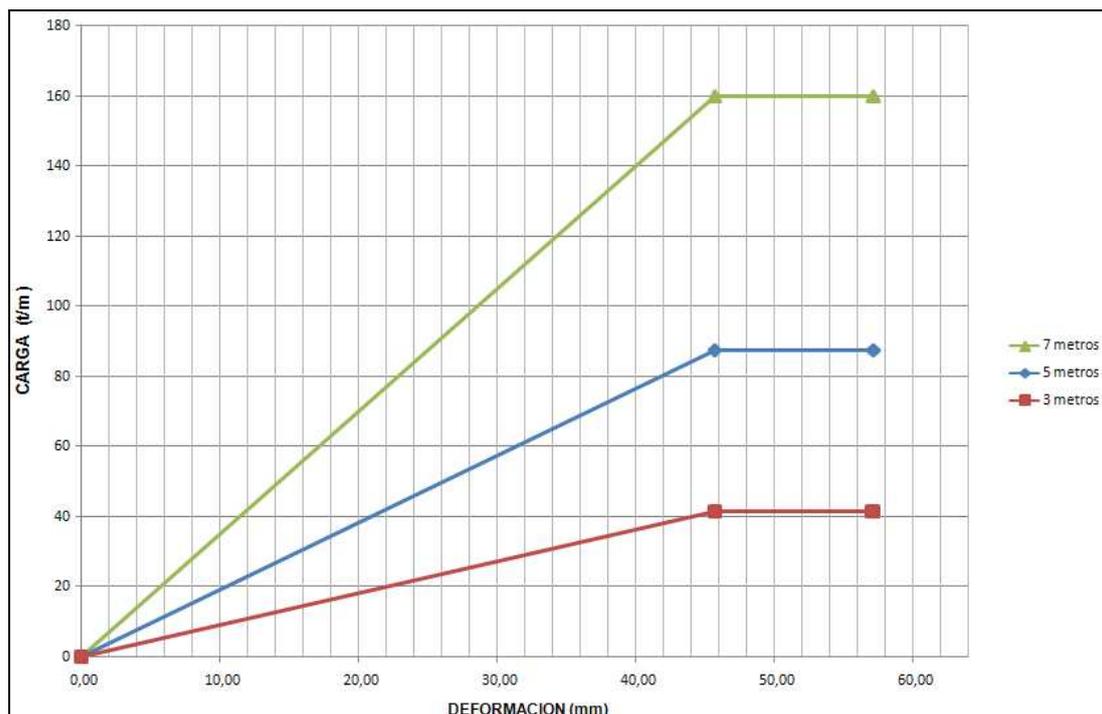
Para los elementos finitos del suelo se trabajó con las funciones de forma  $\xi, \eta, \zeta, \xi\eta, \xi\zeta, \eta\zeta$  como un problema de deformación plana.

Por otra parte, el suelo que rodea a los pilotes se modeló como un resorte con comportamiento elasto perfectamente plástico. La curva de comportamiento del suelo se obtuvo de la curva carga deformación del suelo que se indica en la figura 3. Beltrán (2009)

Con relación a los FPS se debe manifestar que existen tres generaciones, el primero data de los años noventa en el cual se tiene una superficie cóncava, un deslizador y una superficie recta. Zayas et al. (1989). La segunda generación de los FPS es de finales del siglo XX y de principios del siglo XXI, en el cual se tiene doble curvatura y un deslizador. Fenz y Constantinou (2006).

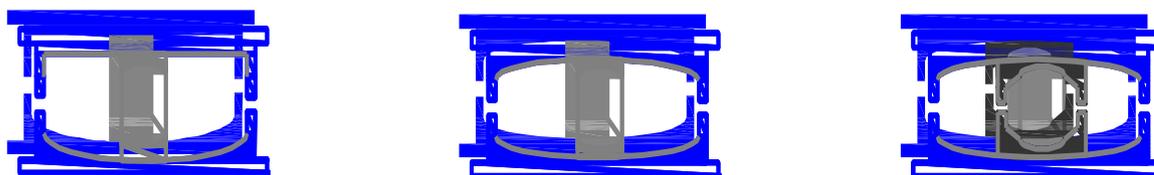
**Tabla 1** – Funciones de forma para elementos finitos rectangulares

Coordenada natural	Coordenada Centroidal	Deformada elemental	Función de Forma
1		u1	$\xi = .25(\xi + \eta + \zeta)$
		v1	$\eta = .25(\xi + \eta + \zeta)$
2		u2	$\xi = .25(\xi + \eta + \zeta)$
		v2	$\eta = .25(\xi + \eta + \zeta)$
3		u3	$\xi = .25(\xi + \eta + \zeta)$
		v3	$\eta = .25(\xi + \eta + \zeta)$
4		u4	$\xi = .25(\xi + \eta + \zeta)$
		v4	$\eta = .25(\xi + \eta + \zeta)$
	5	u5	$\xi^2$
		v5	$\eta^2$
	6	u6	$\xi^2$
		v6	$\eta^2$



**Figura 3** Modelo bilineal del suelo del Puente Norte.

Los de la tercera generación, corresponde al utilizado en los puentes de Esmeraldas, son dos aisladores de doble curvatura en uno solo dispositivo. En la figura 4 se aprecian los tres tipos de FPS.



**Figura 4** Aisladores de base FPS.

En todos los aisladores las superficies son de acero inoxidable muy bien pulidas para permitir del deslizamiento del deslizador. Ahora bien en el FPS de la tercera generación en la parte central se tiene el deslizador, que es otro FPS. Ante movimientos sísmicos de pequeña intensidad trabaja únicamente el aislador interior y ante movimientos sísmicos muy fuertes trabajan los dos deslizadores el interior y el interior de éste. Los aisladores vienen recubiertos por una goma que impide la entrada de polvo que podrían impedir el movimiento de los deslizadores.

Se ensayaron varios aisladores para ver su curva constitutiva y sobre todo para encontrar el factor de amortiguamiento  $\beta$ . En la figura 5 se muestra la curva de

histéresis de uno de ellos encontrando que  $\xi = 0.291$ . En el análisis sísmico realizado en este artículo se trabajó con  $\xi = 0.25$ .

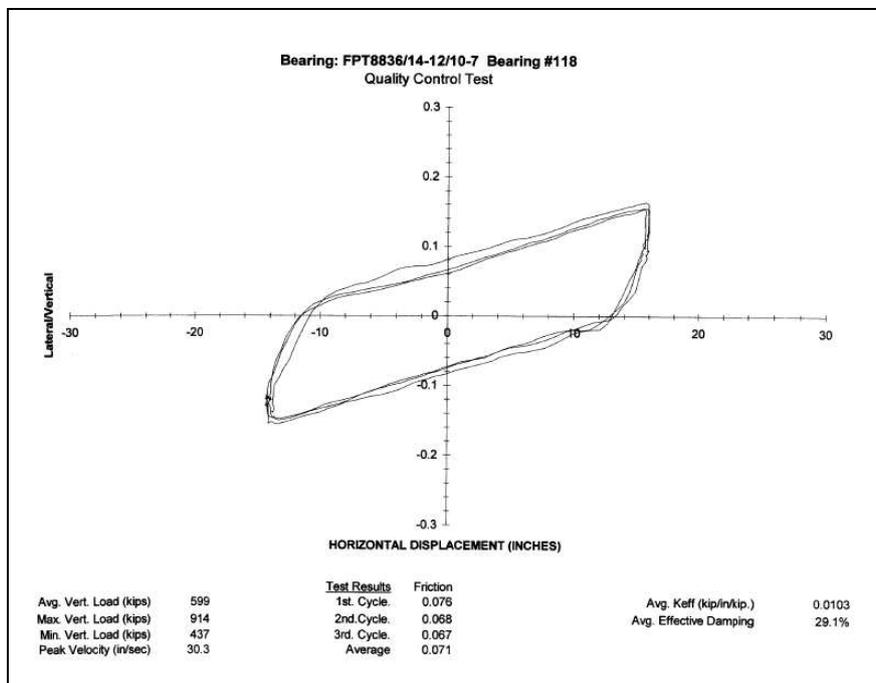


Figura 5 Comportamiento de un aislador FPS

En la figura 6 se presenta la forma como fue modelado un aislador FPS, en forma aproximada; mediante un resorte de rigidez  $k_b$  y un amortiguamiento  $c_b$ . Los mismos que se calcularon de la siguiente forma.

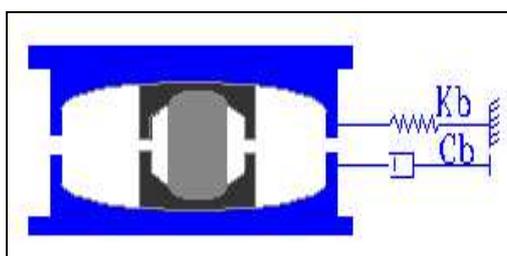


Figura 6 Modelo aproximado utilizado para el FPS.

$$k_b = \frac{m_b g}{R} \quad (7)$$

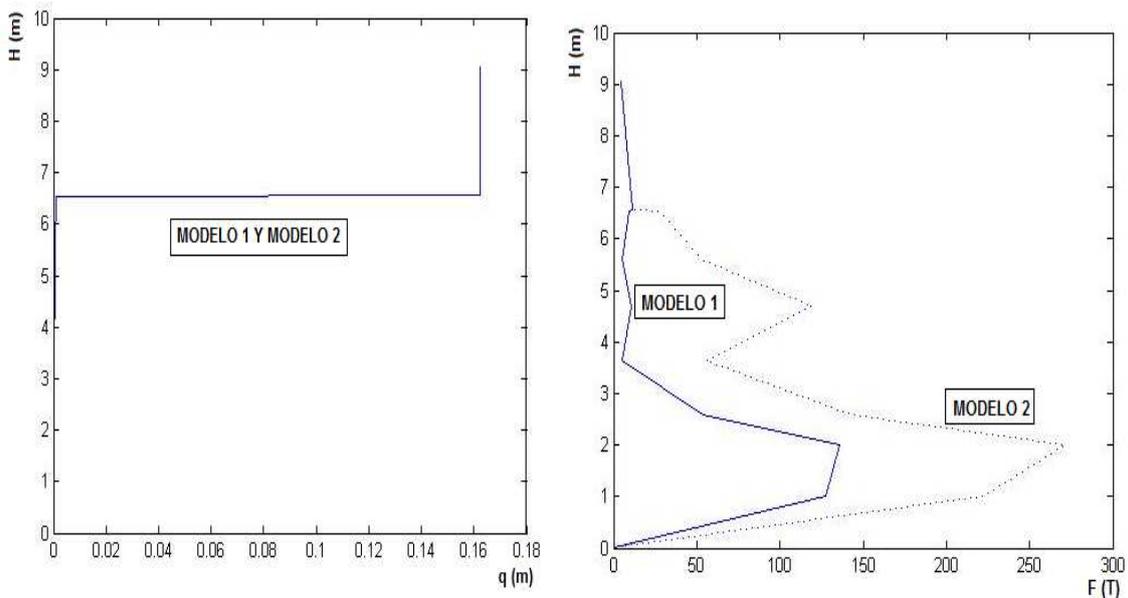
$$T = \frac{R}{g} \quad (8)$$

$$C_b \sqrt{\frac{m_b}{k_b}} \quad (9)$$

Donde  $m_b$  es la masa, proveniente de la superestructura del puente, que gravita sobre el aislador;  $g$  es la aceleración de la gravedad;  $R$  es el radio de curvatura del FPS;  $T$  es el período objetivo del sistema de aislamiento que en el diseño se consideró 3 s.;  $\xi$  es el factor de amortiguamiento, que se tomo igual a 0.25.

### 3. RESULTADOS

La respuesta que se obtuvo con los dos modelos es prácticamente la misma como se observa en las figuras 7 y 8 que corresponden a uno de los estribos y al apoyo central. En estas dos figuras se presentan las respuestas máximas de desplazamientos y fuerzas versus la altura de la estructura.



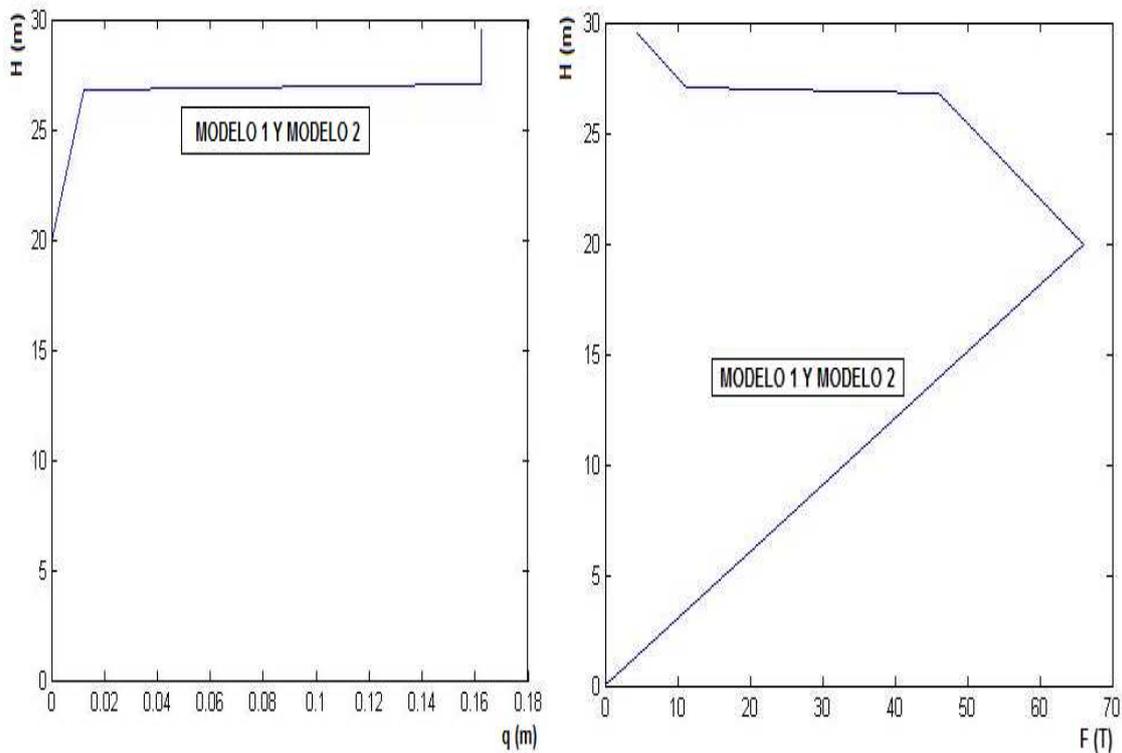
**Figura 7** Respuestas máximas en el Estribo.

Se destaca que la altura total del estribo es de 9 m., talvez por esto es que no influye el suelo que se encuentra en la parte exterior, en la respuesta. Además de ello los estribos son muy rígidos.

Es muy interesante ver el comportamiento del estribo; hasta una altura de 6.5 m., aproximadamente el desplazamiento lateral es muy bajo (ver figura 7) esto es debido a que de alguna forma el FPS influye en el desplazamiento lateral de la subestructura. A los 6.5 m., se encuentra el FPS y es este quien se deforma alrededor de 16 cm., luego la superestructura no se deforma prácticamente nada, por este motivo es que se tiene una línea vertical.

Con esto se comprueba que son los FPS los que más se desplazan durante un sismo y el resto de elementos estructurales experimentan desplazamientos muy pequeños.

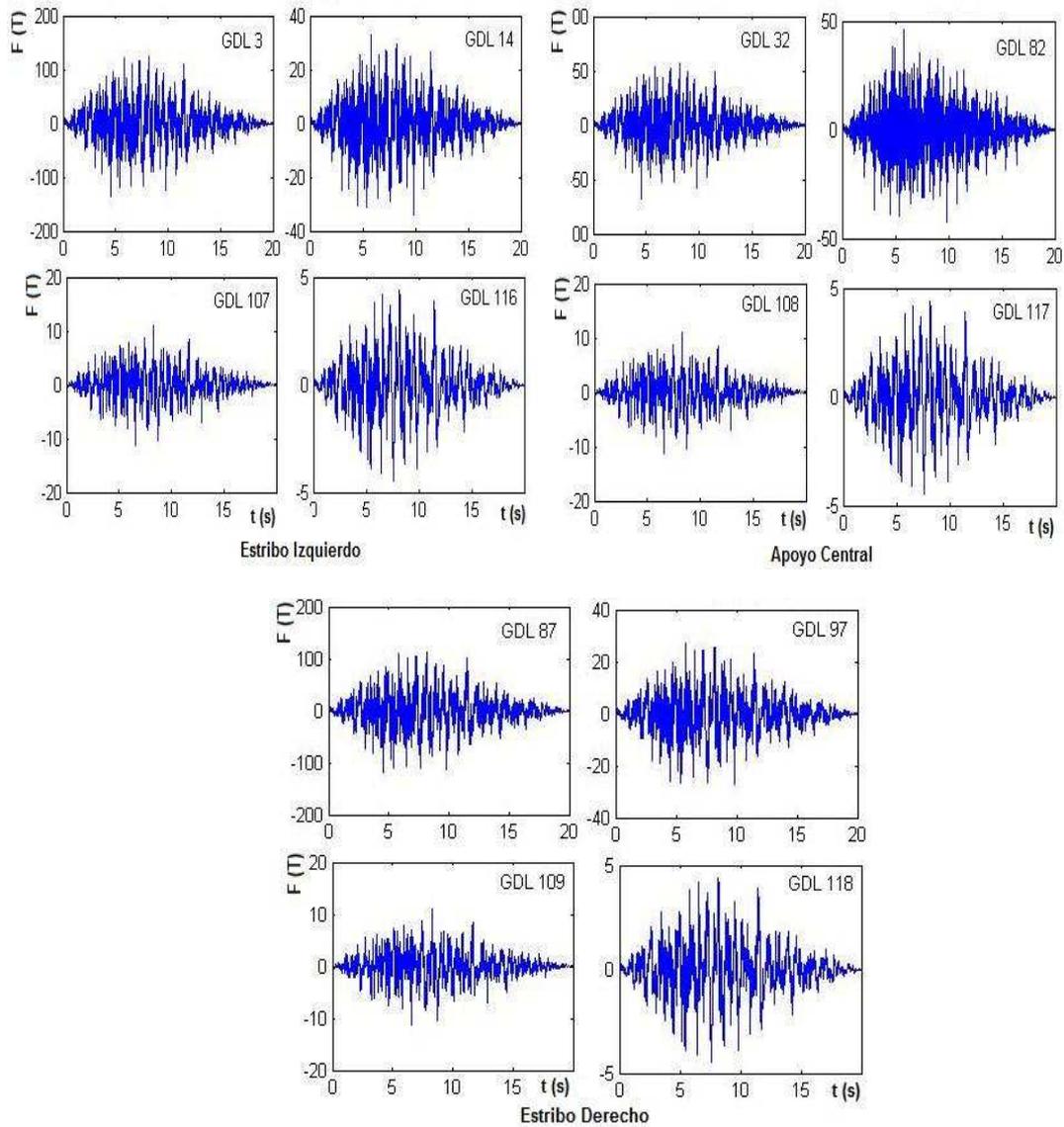
En la figura 8 se muestra la respuesta de desplazamiento máximo de desplazamientos y fuerzas, halladas con los dos modelos en el apoyo central, con un comportamiento similar al de los estribos. En efecto, a la izquierda de la figura 7 se aprecia que hasta los 20 m., de altura los desplazamientos laterales son muy bajos, a esta altura existe un desplazamiento lateral del orden de 1 cm., hasta llegar al FPS, quien experimenta un considerable desplazamiento lateral, llegando a los 16 cm., y la superestructura no tiene desplazamiento relativo con respecto al FPS (línea vertical).



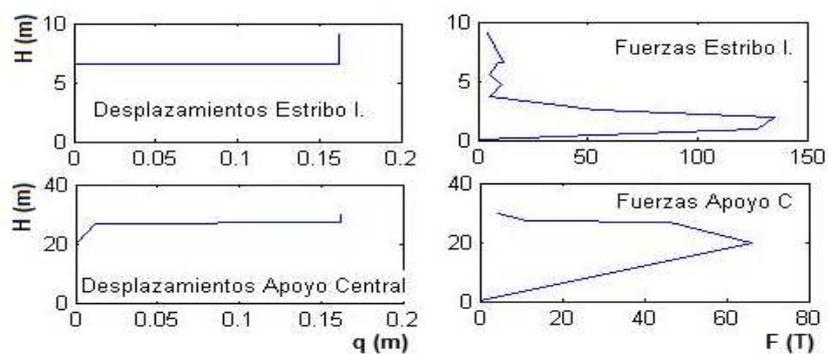
**Figura 8** Respuestas máximas en apoyo Central.

Los desplazamientos laterales máximos obtenidos no superan los 17 cm., esto es muy bueno debido a que se está trabajando con un acelerograma que tiene una aceleración máxima del suelo del 40 % de la aceleración de la gravedad. Si no existirían los FPS los desplazamientos laterales serían mucho más grandes y los desplazamientos relativos considerables.

En las figuras 9 y 11 se muestran las respuestas en el tiempo halladas con los dos modelos, para las fuerzas horizontales, para diferentes grados de libertad. Se destaca que los grados de libertad están indicados en la figura 2. Por otra parte en las figuras 10 y 12 se presentan los desplazamientos y fuerzas máximas en valor absoluto en el estribo y pila con cada uno de los modelos.



**Figura 9** Respuestas en el tiempo de las fuerzas horizontales. Modelo 1



**Figura 10** Respuestas máximas encontradas con el Modelo 1

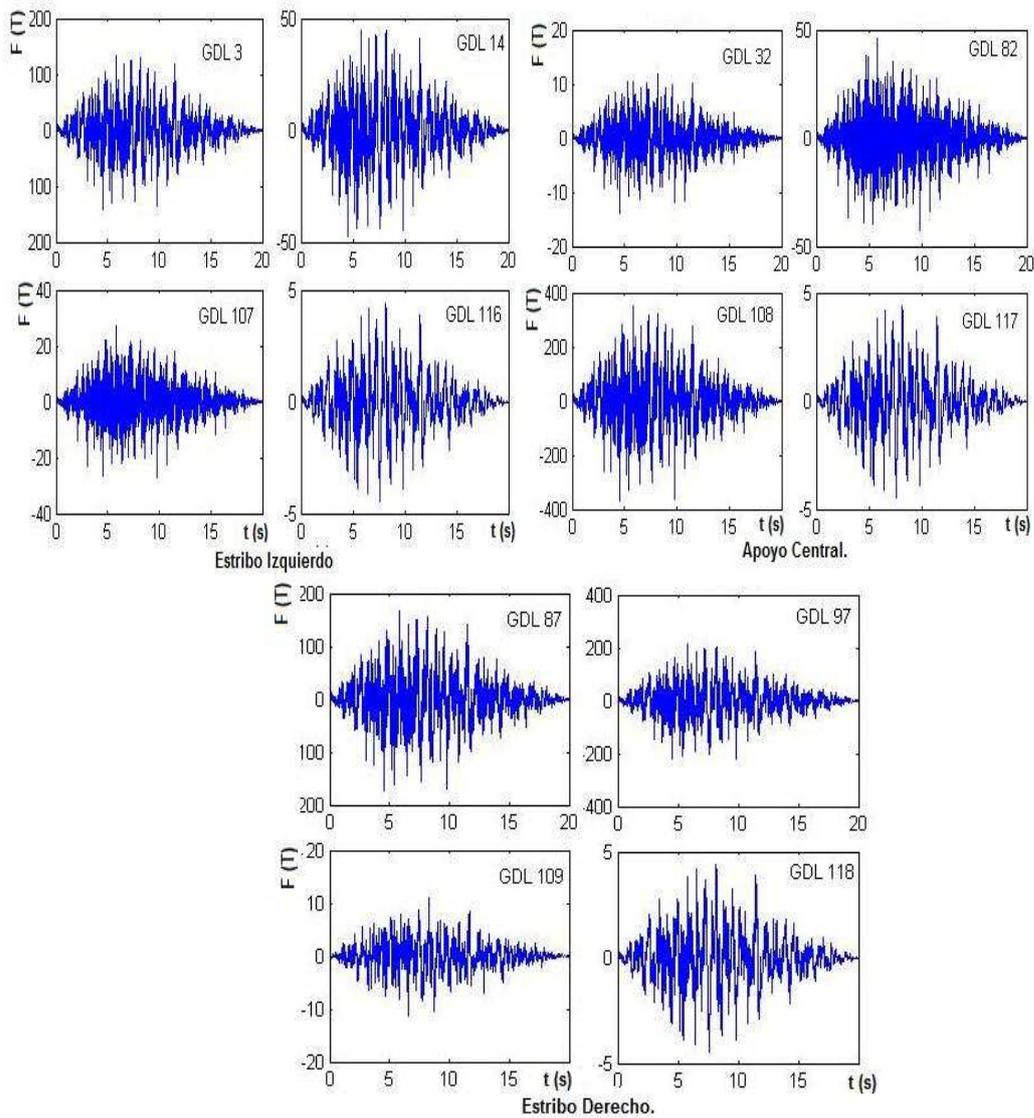


Figura 11 Respuestas en el tiempo de las fuerzas horizontales. Modelo 2

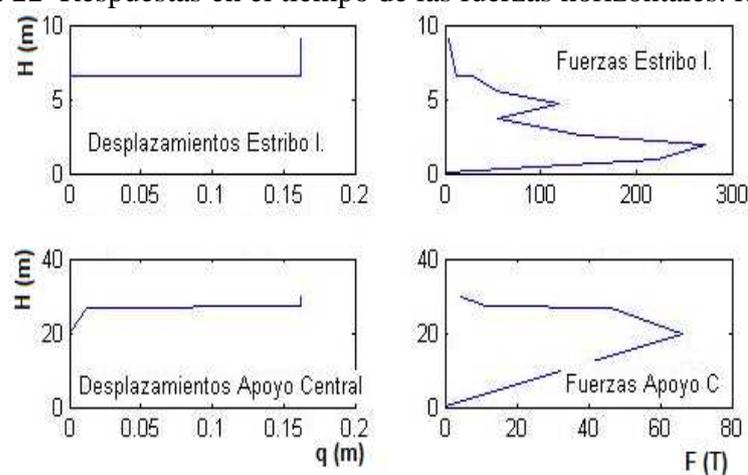


Figura 12 Respuestas máximas encontradas con el Modelo 2

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha realizado el análisis sísmico en sentido longitudinal del Puente Norte, considerando y sin considerar el suelo que se encuentra en la parte exterior de los estribos del puente, ante un sismo artificial compatible con el espectro de diseño del Código Ecuatoriano de la Construcción para el sitio del puente. El suelo exterior ha sido modelado elásticamente con elementos finitos rectangulares y el suelo que rodea a los pilotes con resortes con comportamiento no lineal.

Para los dos casos el FPS fue modelado aproximadamente con resortes de rigidez que depende del peso que gravita sobre el aislador y del radio de curvatura hallado para un período de 3 s. Adicionalmente se consideró un amortiguamiento viscoso para el FPS. Del estudio realizado se desprenden las siguientes conclusiones:

- El suelo que se encuentra en la parte exterior de los estribos no influye en la respuesta sísmica del puente. De tal manera que este suelo no se puede considerar en el análisis con lo que se simplifica el cálculo.
- Los FPS influyen notablemente en la respuesta sísmica de la subestructura (elementos que se hallan debajo de los FPS) y de la superestructura (elementos sobre los FPS). Son los FPS los que se mueven bastante durante un sismo, disipando de esta forma la energía que ingresa al Puente por el sismo.

#### AGRADECIMIENTO

La investigación realizada forma parte del proyecto: Aisladores de base de fricción de triple péndulo, financiado por la Escuela Politécnica del Ejército, por lo que los autores desean dejar constancia de su agradecimiento al Sr. Rector, Crnl. Ing. Carlos Rodríguez Arrieta.

#### REFERENCIAS

- Aguiar (1981), “Elementos finitos lineales con masa uniforme distribuida” Post Grado en Ingeniería Sismo Resistente. Prof. Simón Lamar. Materia: Dinámica de Estructuras. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Aguiar (2004), Análisis Matricial de Estructuras, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, Tercera Edición, 550 p., Quito.
- Aguiar (2007), Dinámica de Estructuras con MATLAB, Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército, 292 p., Quito.
- Beltrán (2009), “Informe de Suelos del Proyecto Esmeraldas”, Cuerpo de Ingenieros del Ejército. Grupo Vial Manabí.

- Cook R., Malkus D., Plesha M., Witt R., (2002), Concepts and applications of Finite Element Analysis, John Wiley & Sons, Inc., Fourth Edition, 720 p., University of Wisconsin, Madison.
- Fenz D., Constantinou M., (2006), “Behaviour of the double concave Friction Pendulum bearing”, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, **35**, 1403-1424.
- Oñate E., (1992) Cálculo de estructuras por el Método de Elementos Finitos. Análisis Estático Lineal. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña. Primera Edición, 838 p., Barcelona.
- Zayas V., Low S., Bozzo L., Mahin S., (1989), Feasibility and performance studies on improving the earthquake resistance of new and existing buildings using the friction pendulum system, Earthquake Engineering Research Center. University of California at Berkeley. **Report N.- UCB/EERC-89/09**, 308 p., Berkeley, California.