

EL COLAPSO DEL PUENTE SAMANÁ UN NUEVO ENFOQUE

*Gustavo Cifuentes Cifuentes.
Profesor Departamento de Ingeniería Civil,
Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.*

RESUMEN

El 3 de octubre de 1993, colapsó la superestructura del puente sobre el río Samaná en la carretera Bogotá – Medellín, en Colombia. La Facultad de Minas de la Universidad Nacional, en Medellín, llevó a cabo un estudio que señala como causa probable del colapso, la falla de la unión de la armadura inferior con un pendolón. Un nuevo estudio analítico realizado en 1996, por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional, en Bogotá, indica que el puente tenía problemas de estabilidad general, los cuales se presentan en este artículo, y se indican como posible causa del colapso. Así mismo se muestran algunas soluciones dadas al problema para un puente gemelo.

I. INTRODUCCIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Sobre la carretera que conduce de Santa Fe de Bogotá a Medellín en Colombia, se encontraba ubicado un puente sobre el río Samaná. La superestructura de este puente colapsó el 3 de octubre de 1993, cuando sobre él transitaban según el informe presentado por la Facultad de Minas de la Universidad Nacional, dos tractomulas y cuatro furgones cerca del apoyo oriental.

La superestructura del puente estaba conformada por dos arcos biarticulados, con una luz de 140 m, los cuales, a través de pendolones,

soportaban una serie de armaduras transversales, las cuales a su vez, soportaban tres vigas longitudinales sobre las cuales se apoyaba el tablero. Todos los elementos anteriores fueron fabricados de acero, con excepción del tablero, construido de concreto reforzado, el cual estaba simplemente colocado sobre las vigas longitudinales sin utilizar conectores de cortante de ningún tipo.

La sección transversal del arco estaba formada por medio de láminas metálicas y conformaba un cajón. Las armaduras transversales, apoyadas en los pendolones de la estructura, estaban constituidas por perfiles metálicos en forma de ángulos de alas iguales y, además, por perfiles metálicos en T. Los parales de las armaduras eran las almas de las vigas longitudinales, las cuales eran perfiles en L fabricados. Los pendolones, por su parte, eran tubos de sección cuadrada.

El puente estaba diseñado para dos vías de circulación; la separación entre ejes de los dos arcos era de 9,60m. En las figuras 1 y 2 se muestran fotografías correspondientes a un puente exactamente igual al descrito, fabricado con los mismos planos y especificaciones, pero construido sobre el río Opón.

Los planos de construcción fueron dibujados en 1980, y por tanto, la estructura fue diseñada para la carga correspondiente al camión o línea de carga para HS2044 de la AASHTO.

La superestructura del puente colapsó el 3 de octubre de 1993. Las posibles causas del colapso fueron estudiadas por la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, en Medellín, y el informe presentado en esa ocasión señala como causa probable del colapso la falla de la unión de la armadura inferior con el pendolón (detalle que se muestra en la figura 3).

En enero de 1996, colapsó en Colombia la estructura de otro puente en arco, éste situado en el departamento de Santander sobre el río Chicamocha. Las causas del colapso de esta estructura fueron (según el informe de la Universidad Nacional al Instituto Nacional de Vías) problemas de fatiga asociados a

concentración de esfuerzos en las uniones arco - pendolón. La preocupación general que causó el colapso de este segundo puente hicieron que el Instituto Nacional de Vías solicitara a la Universidad Nacional la revisión del estado del arte de las uniones entre los arcos y los pendolones. Este estudio fue llevado a cabo durante 1996 y en el cual, como parte de este estudio, se revisó el diseño estructural del antiguo puente sobre el río Samaná y se obtuvieron las conclusiones que aquí se presentan.

II. ANÁLISIS ESTRUCTURAL

Un análisis estructural exitoso debe incluir una concepción adecuada del modelo matemático, basada en el conocimiento del comportamiento general de la estructura para modelar, y está limitado por las herramientas de análisis utilizadas.

Para analizar la superestructura del antiguo puente sobre el río Samaná se realizaron diversos modelos de elementos finitos; la herramienta de modelación fue el programa de elementos finitos Cosmos\M. Se llevaron a cabo análisis estáticos lineales, no lineales debido a grandes desplazamientos y análisis de frecuencias de pando lineal elástico. Se efectuaron, además, análisis estáticos sobre modelos de elementos finitos detallados de las uniones arco - pendolón.

Los resultados contrastan bien con lo observado en general en las deflexiones en el puente Opón, al tomar en éste medidas muy bastas al paso de camiones. Infortunadamente a la fecha no se han podido comparar resultados de los modelos con valores de deformación o vibración medidos *in situ*.

A. Análisis general de la estructura

Para el análisis general estático, hubo problemas al modelar la totalidad de la estructura. Estos problemas fueron causados por la forma misma de la estructura, ya que las armaduras están sostenidas por cada pendolón, y los parales de las armaduras son las vigas longitudinales. Es imposible establecer qué zona de la viga longitudinal es la que actúa como miembro de la armadura, y aunque las fuerzas

internas se podrían determinar teniendo en cuenta que la armadura idealizada de esta forma es isostática, no queda claro, cuál es la interacción de la armadura transversal con las vigas longitudinales. La importancia de conocer bien la forma en que se distribuye la carga en la estructura tiene influencia en los resultados finales, teniendo en cuenta grandes desplazamientos en el arco.

Para poder trabajar adecuadamente el problema se elaboró un modelo que considera las tres dimensiones de las vigas longitudinales; por ello fue necesario utilizar elementos finitos tipo shell isoparamétricos, cuadrilaterales de cuatro nudos con capacidad de simular el comportamiento de placa y, además, esfuerzos de membrana.

Los elementos Shell se utilizaron solamente para las vigas longitudinales y el tablero del puente; la mayoría de los miembros estructurales se analizaron utilizando elementos para el análisis de pórticos espaciales, compatibles con los elementos shell. Con este tipo de elementos se analizaron los arcos, las vigas de arriostramiento que los conectan y los miembros de los cordones superior e inferior de las armaduras transversales.

Miembros tales como las diagonales de las armaduras transversales, los pendolones, el arriostramiento diagonal entre arcos y el arriostramiento diagonal inferior a nivel de las vigas longitudinales fueron representados mediante elementos tipo barra en el espacio, con capacidad de transmitir carga axial únicamente y, por tanto, con extremos articulados.

Se estudiaron dos modelos diferentes con los elementos anteriormente descritos. El primero, utilizado en la revisión del diseño y conformado por los elementos anteriores, con un tablero representado por elementos tipo Shell, con una rigidez muy baja para considerar el tablero sólo como un elemento transmisor de carga. El tablero debe estar funcionando actualmente como elemento transmisor de carga, sin prácticamente contribuir a la rigidez de la estructura, ya que no hay conectores de cortante entre el tablero y las vigas longitudinales. Para lograr la baja rigidez del

tablero se utilizó un módulo de elasticidad muy bajo para el material que modelaba estos elementos.

El segundo modelo es idéntico al primero, con la única diferencia en la rigidez de los elementos shell que representan al tablero en concreto de la estructura. En este segundo modelo se consideró que el tablero estaba conectado adecuadamente a las vigas longitudinales y se utilizó el módulo de elasticidad del concreto para los elementos que conforman el tablero del puente.

Las figuras 7 y 8 muestran dos aspectos del modelo de elementos finitos utilizado para el análisis lineal elástico de la estructura.

Los dos modelos consideran apoyos con desplazamiento impedido en las tres dimensiones del espacio en los extremos de los dos arcos y en uno de los extremos de las vigas longitudinales. En el otro extremo de las vigas longitudinales se restringe únicamente el desplazamiento vertical y horizontal perpendicular al eje de la vía.

La estructura se analizó para los dos modelos con las cargas de diseño del camión HS 20 - 44 y del camión de diseño C 40 - 95 del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. Este último como comparación únicamente, ya que el diseño se revisó con las cargas del código AASHTO.

B. Análisis de estabilidad

Al realizar el análisis general lineal elástico de la estructura, se detectaron esfuerzos altos en algunos miembros, esos esfuerzos en algunos casos eran cercanos al esfuerzo de fluencia del material.

Estos esfuerzos altos, sin embargo, no bastaban para justificar el colapso de la estructura, ya que afectaban elementos importantes pero redundantes al considerar la estructura como un cuerpo tridimensional.

Para tratar de entender el colapso se decidió estudiar la estabilidad general de los arcos, tratando el problema desde dos puntos de vista

diferentes. El primero, a través de análisis lineales de frecuencias de pandeo; el segundo, a través del análisis no lineal debido a grandes desplazamientos de la estructura.

En el análisis lineal de frecuencias de pandeo se busca resolver el problema de valores propios representado por la ecuación

$$([K] - \lambda [K_G])\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

[K] es la matriz de rigidez del sistema; $[K_G]$, la matriz de rigidez geométrica asociada con las fuerzas a lo largo de los ejes de los elementos; λ , el valor de las frecuencias de pandeo. El sistema de ecuaciones que representa la ecuación (1) indica que la rigidez de los elementos se modifica debido a la presencia de fuerzas axiales.

Las frecuencias de pandeo indican el factor por el cual debe multiplicarse la carga para obtener la carga crítica de pandeo de la estructura.

Con la técnica descrita se analizaron dos modelos para obtener sus frecuencias de pandeo; el valor más pequeño se supone que es el valor crítico, el cual corresponde al primer modo de pandeo del sistema.

Para la elaboración de los modelos se utilizaron elementos para el análisis de pórticos espaciales, representando los arcos y las vigas transversales entre ellos (figura 10).

En el arriostramiento diagonal entre arcos se consideraron elementos tipo barra en el espacio con fuerza axial únicamente.

La carga utilizada fue la fuerza axial en el arco en la condición de carga en la esa fuerza axial en el arco fue la máxima obtenida del análisis general de la estructura.

Debido a que se encuentran modos de pandeo, en los cuales ocurren desplazamientos verticales, esos desplazamientos fueron impedidos en toda la longitud del arco, lo cual permitirá sólo la existencia de desplazamientos

horizontales (para así obtener modos de pandeo lateral de la estructura).

Los dos modelos difieren en que en el primero de ellos se colocó una unión perfecta entre los arcos y la primera viga transversal (cerca de los apoyos), mientras que en el otro se supuso inexistente la viga.

En el caso del análisis no lineal debido a grandes desplazamientos se analizaron únicamente los arcos del puente con el arriostramiento entre ellos, utilizando un modelo idéntico al empleado en el análisis de frecuencias de pandeo, incluyendo la primera viga transversal. Sin embargo, para este análisis se trabajó con condiciones de borde diferentes, ya que se permitió el desplazamiento vertical y la carga no se colocó a través de fuerzas axiales equivalentes, sino que se supuso como carga vertical en los puntos en que los arcos reciben a los pendolones. Las restricciones se colocaron en los apoyos de los arcos para impedir el desplazamiento en todas las direcciones (los giros están permitidos en este modelo).

III. DISCUSIÓN DEL ANÁLISIS

A. Análisis general de la estructura

Lo primero que llama la atención de los resultados del análisis estructural son las deformadas y las magnitudes de los desplazamientos observados. Los desplazamientos debidos a carga muerta son del orden de 64 cm en el centro del puente; la contraflecha del puente según planos es de apenas 40,4 cm.

Los desplazamientos de la estructura debido a carga viva tienen un máximo de 19 cm cuando el camión HS 20 - 44 se encuentra en el inicio de la estructura; simultáneamente, en el extremo opuesto, puede tenerse un desplazamiento vertical hacia arriba de 14,5 cm. Puesto que el camión se desplaza sobre la estructura, puede suponerse un desplazamiento relativo de $19 \text{ cm} + 14,5 \text{ cm} = 33,5 \text{ cm}$. Este desplazamiento, comparado con $L / 800 = 15 \text{ cm}$, indica que la estructura tiene un problema de rigidez insuficiente.

Al suponer que el tablero está conectado a las vigas, se observó que el desplazamiento relativo pasa a ser de $10,5 \text{ cm} + 8,0 \text{ cm} = 18,5 \text{ cm}$, el cual se acerca bastante al desplazamiento permisible, aunque lo excede.

Los esfuerzos en los elementos del arco son menores que los de fluencia del material. Hay, sin embargo, esfuerzos altos en las diagonales (especialmente las exteriores), de las cerchas transversales apoyadas en los pendolones. Estos elementos deben ser reforzados en puentes de este tipo.

B. Análisis de estabilidad

Los valores obtenidos del análisis lineal de pandeo de la estructura indican un primer modo de pandeo con la forma que podría esperarse de un cuerpo que permite el giro en un extremo (extremo del arco) y en el otro extremo un desplazamiento (unión primer tramo del arco con la zona arriostrada del mismo).

Es importante anotar que el valor de la frecuencia de pandeo depende de la presencia y rigidez que aporta la primera viga transversal; este valor es 0,84 cuando se considera que ésta no existe y 1.8 cuando se supone una unión rígida entre los extremos del arco y la viga transversal inicial. Se debe tener en cuenta que la unión entre la viga y el arco se realiza soldando la viga al alma del arco, por lo cual en general se debería asumir el valor bajo para el diseño.

El valor de la frecuencia de pandeo multiplicado por la carga aplicada produce como resultado la carga crítica de la estructura. Por tanto, este análisis indica que con cargas de servicio, dependiendo del tipo de conexión de la viga transversal a los arcos, se podría esperar un factor de seguridad que quedaría entre 0,84 y 1,80, en cualquier caso insuficiente, teniendo en cuenta la posibilidad de sobrecargas en la estructura.

Los valores anteriores señalan también que el factor de longitud efectiva para pandeo, en la dirección transversal al eje del puente, podría variar en forma importante, pero, debido a la flexibilidad de la unión arco - viga transversal inicial, debería tomarse como dos.

Para el centro del arco, el análisis no lineal con grandes desplazamientos arrojó un desplazamiento total de 6,1 cm para el 40% de la carga. Para valores mayores de carga viva la estructura se muestra como inestable, en este tipo de análisis. La figura 9 muestra el comportamiento de desplazamiento versus seudotiempo como resultado del análisis no lineal por grandes desplazamientos de los arcos del puente.

Conclusiones y recomendaciones

El análisis de la estructura del puente Samaná antiguo indicó deficiencias de diseño. Las deficiencias se ven reflejadas en relaciones altura espesor inadecuadas del arco, así como en elementos sobre esforzados, tanto en el arco como en las armaduras transversales. El análisis, además, revela deficiencias importantes en rigidez de los miembros que conforman la estructura, deficiencias que se reflejan en deflexiones excesivas ante cargas vivas.

Los pendolones por su parte cumplen los esfuerzos permisibles (sus conexiones también), pero no todos cumplen la relación de esbeltez máxima permitida.

Las grandes deflexiones por la carga vivas pueden limitarse al conectar el tablero a las vigas longitudinales existentes a través de elementos mecánicos que actúen como conectores de cortante.

Se encontró que los esfuerzos actuantes en algunos elementos de la cercha (cordón superior y diagonales exterior e interior) son mayores que los permisibles; especialmente en las diagonales exteriores, donde los esfuerzos actuantes son cercanos al esfuerzo de fluencia del material.

Los análisis de estabilidad y análisis no lineal por grandes desplazamientos revelan que la estructura tiene una rigidez inadecuada, y que en condiciones en las cuales se presenten cargas importantes hacia uno de los extremos del arco, se podría esperar el colapso del mismo por pandeo o inestabilidad.

El informe de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia del colapso del

puede indicar que en el momento del colapso sobre el puente existía la carga de dos tractomulas y cuatro furgones cerca del apoyo oriental. Suponiendo que los dos camiones tuvieran 50 toneladas de peso total y los furgones veinte toneladas, se obtendría una carga cercana a las 124 toneladas en la estructura, la cual genera el colapso por inestabilidad lateral.

Es preocupante el problema de inestabilidad lateral, pues al parecer los diseños se realizaron con factores de longitud efectiva inadecuados, dadas las condiciones de apoyo de las estructuras. Definitivamente, el factor de longitud efectiva depende en forma importante del tipo de conexión utilizado en la primera viga transversal, por lo cual en futuros diseños se sugiere que esta conexión sea detallada cuidadosamente y diseñada para resistir momento.

El problema de inestabilidad lateral ha sido resuelto mediante el refuerzo del arco en puentes gemelos a Samaná, tal como se observa en las figuras 5 y 6. Otros elementos se han reforzado; por ejemplo, la figura 4 ilustra láminas de acero colocadas que pueden ayudar a evitar problemas en las diagonales exteriores de las armaduras transversales. (Ni la universidad, ni el autor del presente documento han participado en el diseño de estos refuerzos, aunque la universidad sí ha sugerido la necesidad de llevarlos a cabo).

BIBLIOGRAFÍA

1. AASHTO, Bridge Design Specifications. 1992.
2. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA. Causas del colapso del puente Pescadero. Informe para el Instituto Nacional de Vías, Santa Fe de Bogotá, 1996.
3. ———. *Estudio del estado del arte en las uniones arco-pendolón y recomendaciones para la solución definitiva del problema*. Informe para el Instituto Nacional de Vías, Santa Fe de Bogotá. diciembre de 1996.
4. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes. 1995.

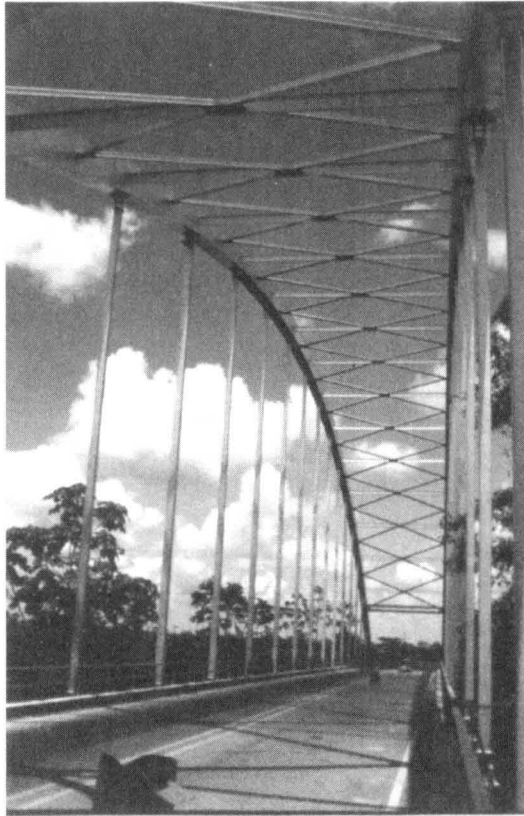


Figura 1. Puente del Opón (Gemelo del antiguo puente sobre el río Samaná).

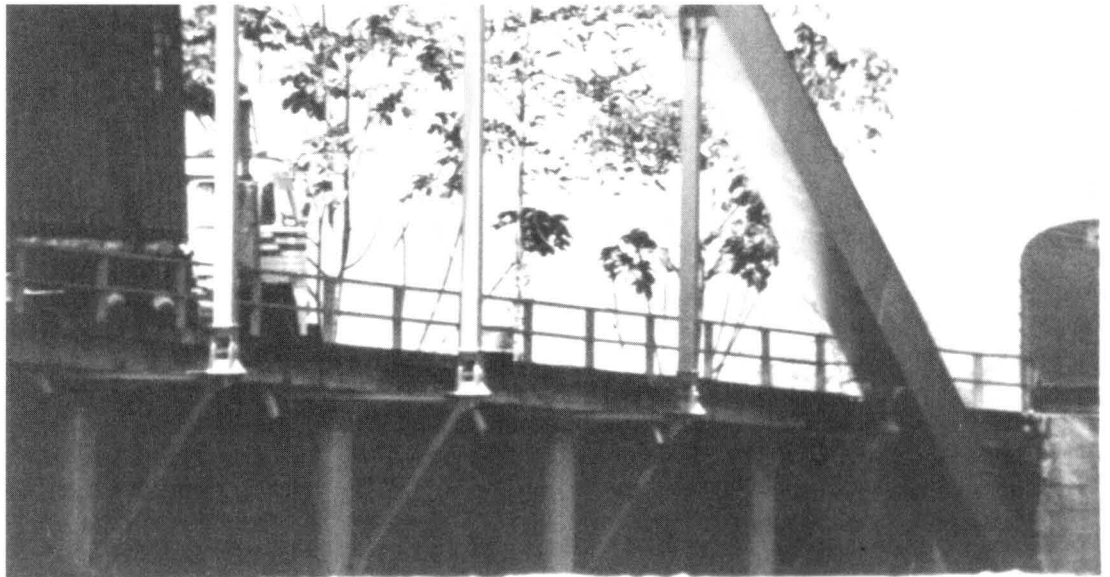


Figura 2. Puente del Opón. Detalle del extremo del arco.

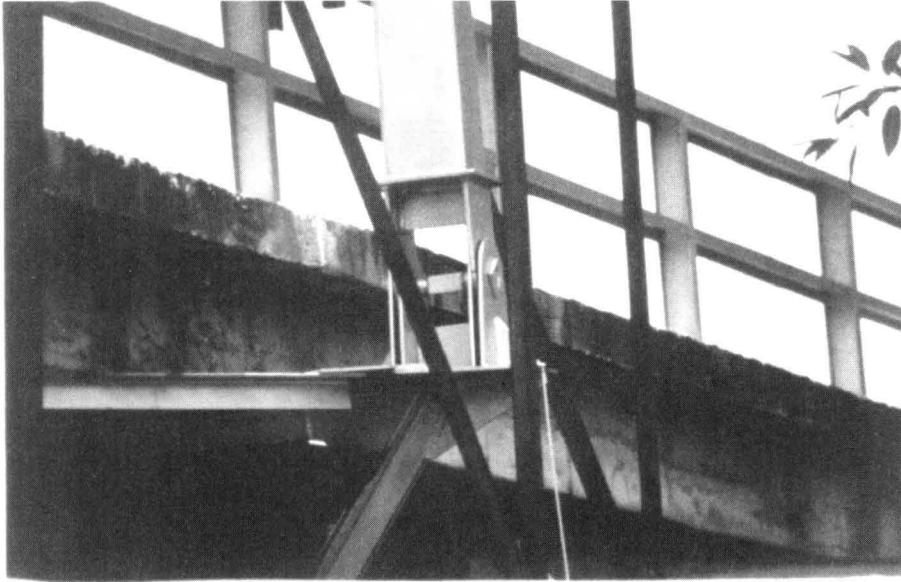


Figura 3. Puente del Opón. Detalle de la unión de las armaduras transversales con los pendolones.

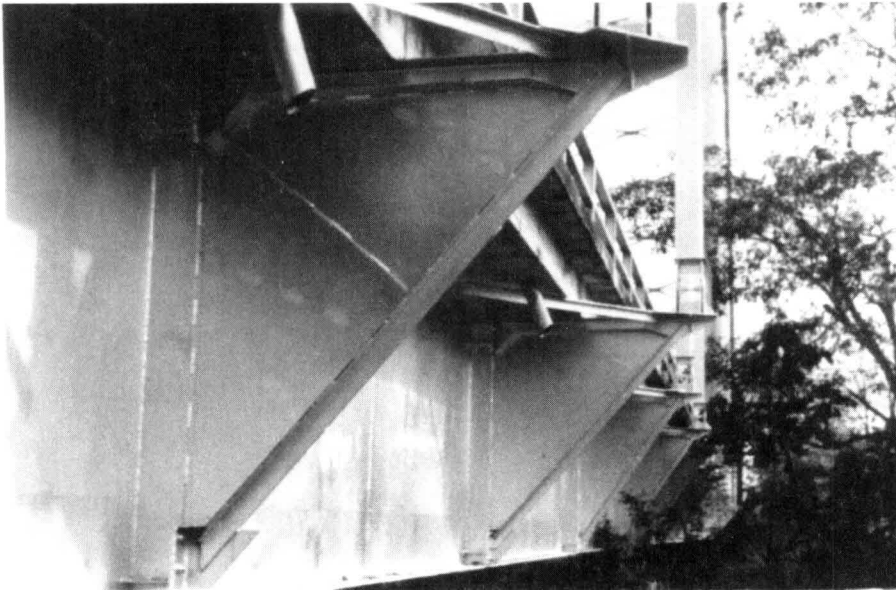


Figura 4. Puente del Opón. Refuerzo de la diagonal exterior de las armaduras transversales.



Figura 5. Puente del Opón. Refuerzo en el arco (obsérvese el tramo inicial y compárese con la figura 1).



Figura 6. Detalle del refuerzo en el tramo inicial del arco.

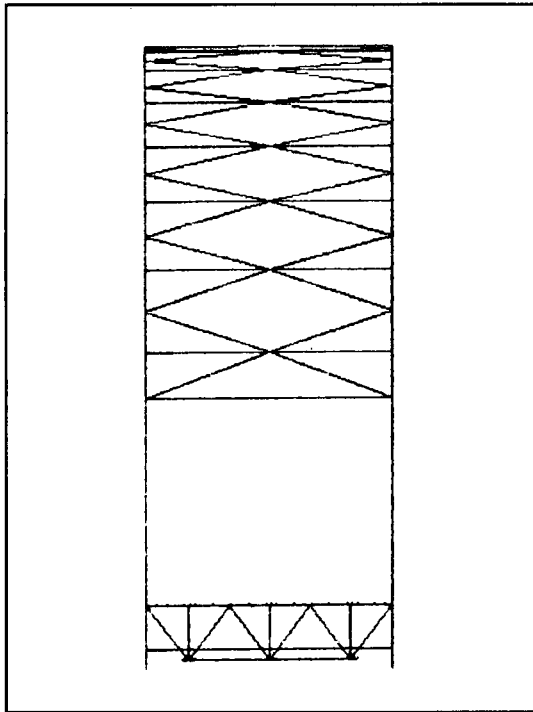


Figura 7. Modelo del puente Samaná. Vista de frente.

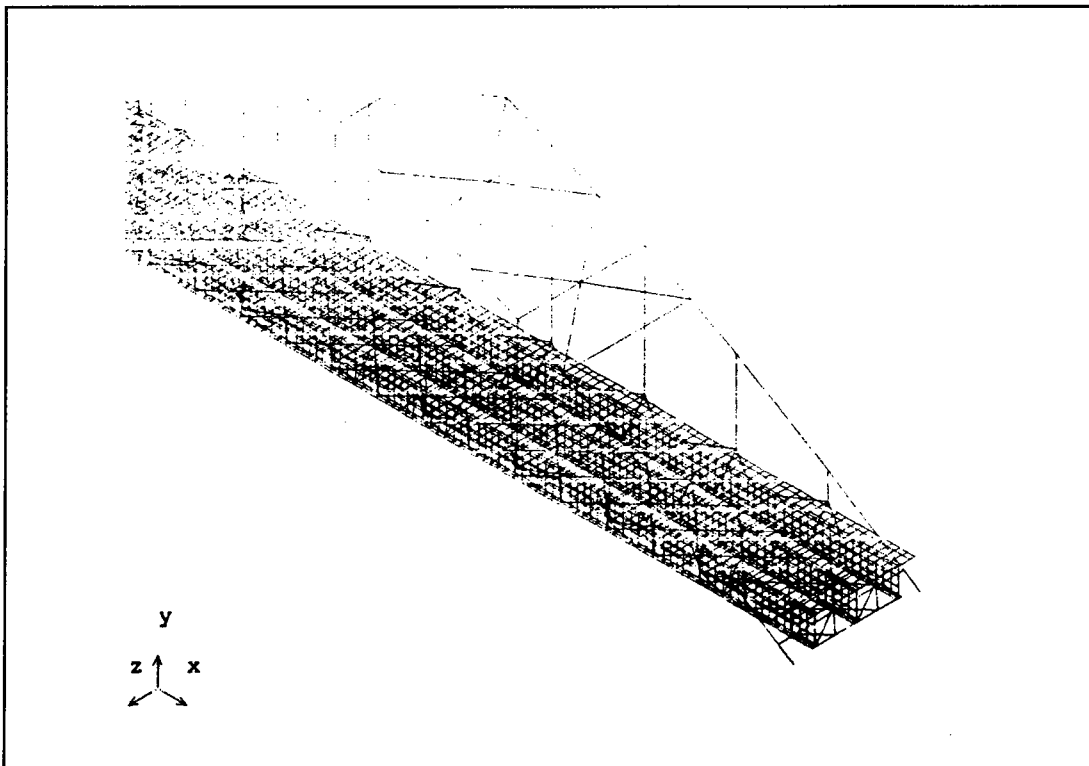


Figura 8. Detalle del modelo de elementos finitos para el análisis general de la estructura.

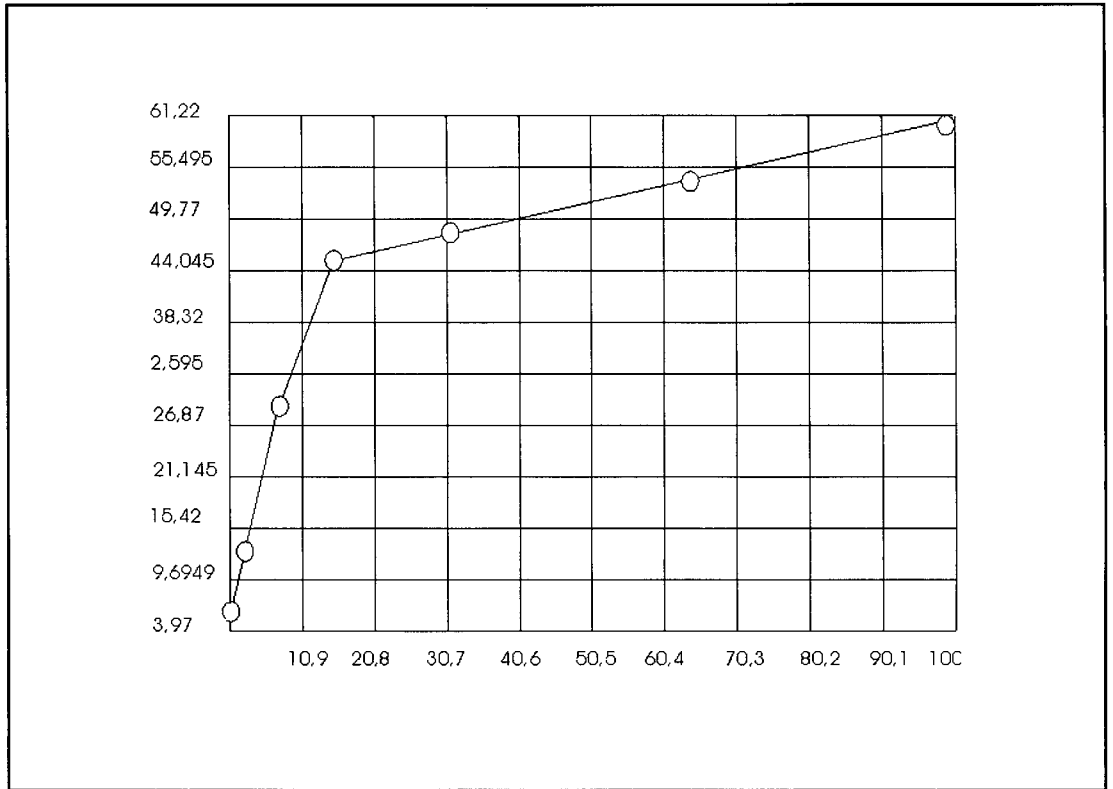


Figura 9. Gráfica de pseudotiempo vs desplazamiento para el nudo en el vértice del arco.

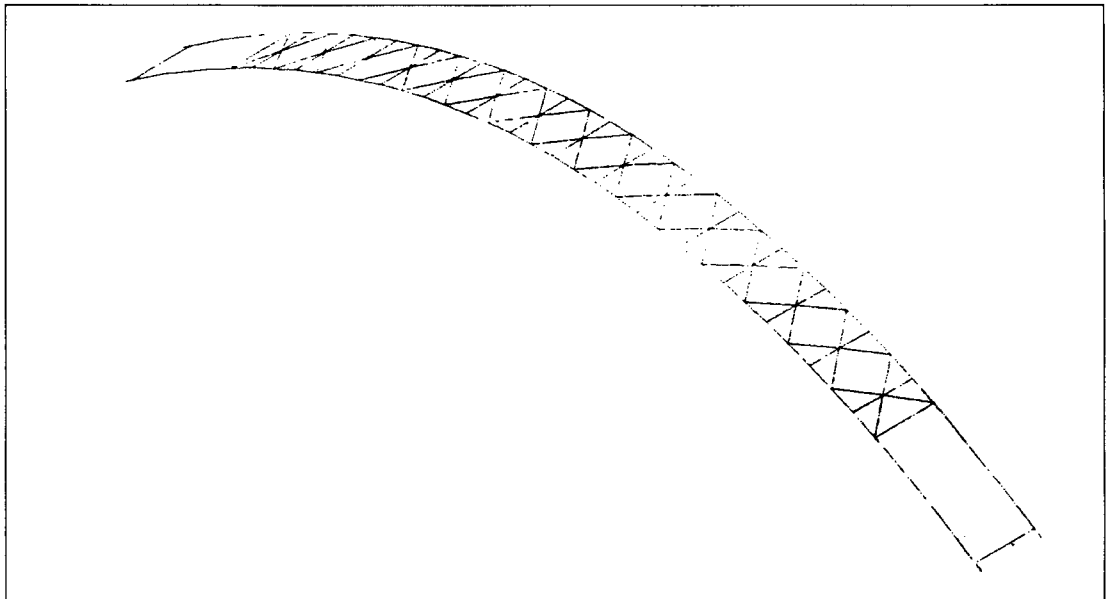


Figura 10. Modelo utilizado para el análisis no lineal y para los análisis de frecuencias de pandeo.