

# Análisis de estabilidad en puentes largos tipo Pony

Jacqueline Contreras Castaño\*

## RESUMEN

Este trabajo considera la estabilidad general de dos puentes de armadura de paso a través intermedio, con luces de 81 m y 99 m de longitud, por medio de un análisis de pandeo lineal elástico. Como resultado de este análisis se obtuvo la carga crítica, la cual se comparó con los resultados obtenidos al aplicar los requisitos del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes (artículos A.9.16.12.1 y A.9.16.12.2).

## INTRODUCCIÓN

Debido a que en el país están construyéndose puentes largos de armaduras de paso a través intermedio y en algunos de ellos se han presentado problemas de estabilidad, la Universidad Nacional de Colombia ha realizado algunos estudios recientemente y ha encontrado que a medida que se aumenta la longitud en este tipo de estructuras, los requisitos del Código Colombiano de Diseño Sísmico de Puentes, asociados con la estabilidad, son cada vez menos conservadores.

Recientemente se elaboró una tesis de grado en ingeniería civil en la cual se estudiaron tres puentes con luces de 24 m, 42 m y 60 m cada uno, diseñados con base en los requisitos del código (artículos A.9.16.12.1 y A.9.16.12.2); a los modelos tridimensionales se les hizo un análisis de pandeo elástico. De esta tesis se concluyó que el segundo requisito permite reducir la rigidez lateral hasta valores para los cuales habría problemas de falla general por estabilidad, según los análisis tridimensionales realizados en estos puentes.

Adicionalmente, a medida que se incrementa la longitud del puente la frecuencia de pandeo disminuye y, por tanto la carga crítica.

Por las razones anteriormente descritas se decidió investigar lo que ocurría con puentes de mayor longitud.

Para los análisis estáticos y de pandeo lineal elástico realizados en este estudio se hizo uso del programa COSMOS/M.

## I. MARCO TEÓRICO

El análisis de pandeo lineal elástico es una forma de estudiar la estabilidad de un cuerpo. El pandeo ocurre cuando un cuerpo convierte la energía de deformación axial en energía de deformación de flexión sin cambiar las cargas aplicadas externamente, reduciéndose la rigidez a la flexión a cero, cuando se aplican fuerzas de compresión.

Los efectos de las fuerzas axiales son calculados por una matriz de rigidez  $KG$  llamada matriz de rigidez geométrica, que se adiciona a la matriz de rigidez de rigidez convencional  $K$ .

$KG$ : es definida por la geometría de los elementos, desplazamiento y el estado de esfuerzos.

### ANÁLISIS DE PANDEO LINEAL ELÁSTICO PARA UNA COLUMNA BAJO CARGA AXIAL

Considerando una barra sometida a una fuerza axial de tensión, la energía de pandeo está dada por la expresión:

$$Ub = 1/2 \int_0^L EI (dw/dx)^2 dx$$

Aplicando un pequeño desplazamiento lateral  $w=w(x)$ , manteniendo la fuerza axial constante, cada elemento diferencial de longitud  $dx$  se alarga una cantidad  $\epsilon_m dx$ .

El trabajo producido por la fuerza es:  $P\epsilon_m dx$ , y la energía de deformación axial

$$Um = P \int_0^L \epsilon_m dx$$

Asumiendo que el desplazamiento tiene la forma de la mitad de una onda sinusoidal  $w = w_c \text{Sen} \pi x / L$  y resolviendo las integrales:

$$Ub = \pi^4 EI / (4L^3) * w_c^2$$

$$Um = \pi^2 EI / (4L) * w_c^2$$

$w_c$ : deflexión en el centro de la viga.

Si durante el pandeo la energía de deformación axial se

\*Ingeniera civil, Universidad Nacional de Colombia. Especialista en estructuras, Universidad Nacional de Colombia.

transforma en energía de flexión sin introducirse un trabajo externo:

$Ub+Um=0$ ; entonces,  $Um=-\pi^2 EI/L^2$  que es la carga de pandeo de Euler.

Si se aplica una carga lateral distribuida  $q=q_c \text{Sen} \pi x/L$  la carga  $q$  tiene un potencial:

$$\Omega = -\int_0^L q w dx = -q_c L/2 * w_c$$

$$\Pi p = Ub + Um + \Omega$$

$$\Pi p = \pi^4 EI/(4L^3) w_c^2 + \pi^2 P/(4L) w_c^2 - q_c L/2 * w_c$$

Para encontrar el valor mínimo de  $\Pi p$ :

$$\partial \Pi p / \partial w_c = 0$$

$$\pi^4 EI/(2L^3) w_c + \pi^2 P/(2L) w_c - q_c L/2 = 0$$

$$K * w_c + KG * w_c = q_c L/2$$

Si  $P > 0$ ,  $w_c$  disminuye.

Si  $P < 0$ , existe compresión  $P = -\pi^2 EI/L^2 = P_{crit}$ ;  $w_c = \text{infinito}$ ;

entonces  $K + KG = 0$

En el caso general de un sistema de varios grados de libertad se tiene:

$$\{[K] + \lambda [KG]\} = 0$$

$\lambda$ : frecuencia de pandeo

$$\lambda = P_{crit}/P$$

Si  $\lambda = 1$   $P = P_{crit}$ .

## II. DESCRIPCIÓN DE MODELOS

### A. MODELO GENERAL DE LOS PUENTES

Los puentes fueron modelados usando el programa COSMOS/M. y constan de un tablero metálico de 4,2 m de ancho apoyado sobre vigas transversales en acero de 4,6 m de longitud, separadas cada 3,0 m. Las vigas transversales se apoyan en cada extremo en el cordón inferior de una armadura en celosía.

La armadura en celosía es tipo Pratt con paneles de 3,0 m x 3,0 m y está conformada por elementos de acero calidad A-36 y de sección tipo W.

Para mejorar la estabilidad lateral de los puentes se colocaron pie de amigos en ángulo cada 3,0 m a ambos lados de la estructura.

Las armaduras se apoyaron utilizando en un extremo un apoyo de segundo género, restringiendo el desplazamiento en las tres direcciones, y en el otro extremo se usó un apoyo de primer género, permitiendo el desplazamiento longitudinal. (Véase el modelo tridimensional de cada puente en las figuras 1 y 2).

Se diseñaron los elementos teniendo en cuenta la carga muerta, la carga viva más impacto para la posición más desfavorable y las cargas laterales de 450 kg./m aplicadas en los nudos de los paneles del cordón superior de cada armadura de acuerdo con el requisito del código correspondiente al artículo A.9.16.12.1 (véanse las secciones transversales de los puentes y los elementos que los componen en las figuras 3 y 4).

### B. MODELO GENERAL DE LAS COLUMNAS

Para verificar el requisito del código correspondiente al artículo A.9.16.12.2. se consideró el cordón superior como una columna con apoyos laterales elásticos en los puntos nodales, y se aplicó la máxima fuerza axial obtenida después de cumplirse el primer requisito.

Para determinar la rigidez de cada uno de los resortes en los cuales se apoya la columna, se calculó la rigidez lateral de la sección transversal del puente aplicando fuerzas unitarias horizontales en los nudos del cordón superior y se obtuvieron los desplazamientos en la dirección de la carga.

A los modelos de las columnas apoyadas sobre resortes se les realizó un análisis de pandeo para determinar la carga crítica de las columnas. (véanse los modelos de las columnas en las figuras 5 y 6).

Después de verificar el cumplimiento de los dos requisitos del código, se hizo el análisis de pandeo lineal elástico de los puentes, teniendo en cuenta la carga muerta, la carga viva más impacto que produce la condición más crítica para los puentes (línea de carga más la carga concentrada en el centro de la luz).

## III. RESULTADOS

Los resultados obtenidos de los análisis hechos a los cordones superiores de las armaduras como columnas apoyadas sobre resortes y a los puentes tridimensionales en general se resumen en el cuadro 1.

Cuadro 1. Resultados de los análisis a cordones superiores

Longitud del puente (m)	Frecuencias de pandeo	
	Columnas	Puente tridimensional
81	12,2184	5,4752
99	9,5879	3,2306

A continuación se relacionan los resultados obtenidos por los ingenieros Jair Bernal y Omar González en los análisis hechos a los puentes con luces de 24 m, 42m y 60 m.

Cuadro 2. Resultados de los análisis a puentes con luces de 24m, 42m y 60 m.

Longitud del puente (m)	Frecuencias de pandeo	
	Columnas	Puente tridimensional
24	16,30	3,10
42	31,95	4,44
60	33,76	1,57

#### CONCLUSIONES

- De los resultados obtenidos se concluye que aunque del análisis de pandeo lineal elástico del puente tridimensional se obtuvieron resultados menores que los obtenidos en el análisis de pandeo de las columnas, los valores de carga crítica de pandeo son mayores en más del 50% de la carga muerta más carga viva más impacto. Los valores de frecuencias de pandeo obtenidos para el puente y para las columnas difieren en 44,81% y 33,69% para las luces de 81m y 99 m, respectivamente.

- Por tanto, se concluye que al cumplir el primer requisito del código está proporcionándose en el diseño del puente suficiente rigidez lateral para que cumpla el segundo requisito; en cambio, si el diseño se realiza teniendo como base el segundo requisito del código, es muy probable que no se cumpla el primer requisito.

- Comparando los resultados obtenidos para luces grandes, 81m y 99 m, con los análisis realizados anteriormente para luces de 24m, 42m y 60 m se tiene que los valores de las frecuencias de pandeo no muestran una tendencia clara de los resultados a medida que se aumenta la longitud del puente; estos valores dependen de qué tan cercano sea el diseño a los esfuerzos admisibles.

#### BIBLIOGRAFÍA

1. BERNAL, J.J. y GONZÁLEZ, O.A., *Falla por pandeo en puentes metálicos de tablero intermedio*. Tesis de grado en ingeniería civil, Universidad Nacional de Colombia, Santa Fe de Bogotá. 1997.
2. COOK, R., MALKUS, D., PLESHA M.E. *Concepts and Applications of Finite Element Analysis*. John Wiley, Estados Unidos. 1989.
3. MINISTERIO DE TRANSPORTE. INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. *Código Colombiano de diseño sísmico de puentes*. 1995.

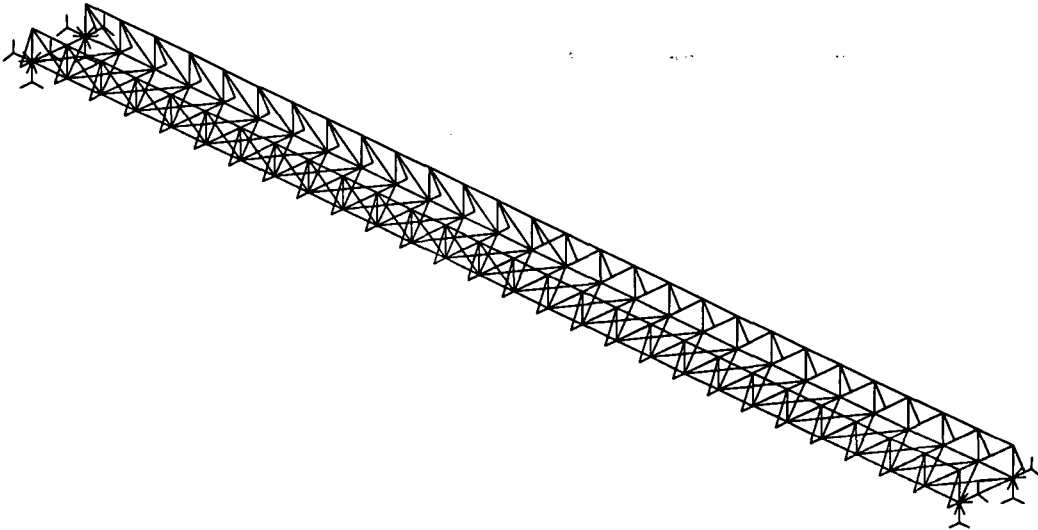


Figura 1. Modelo tridimensional puente 81,0 m.

Análisis de estabilidad en puentes largos tipo Pony

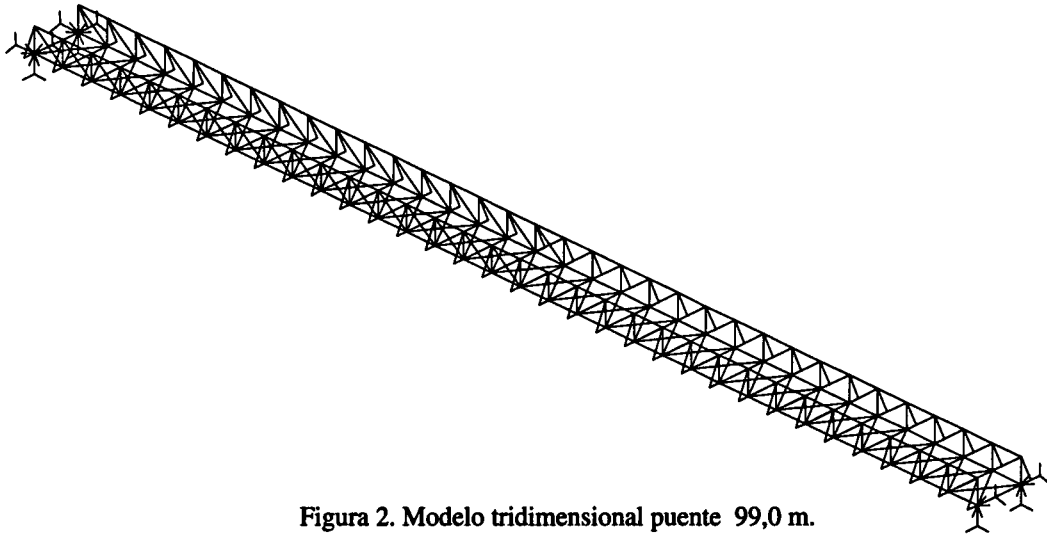
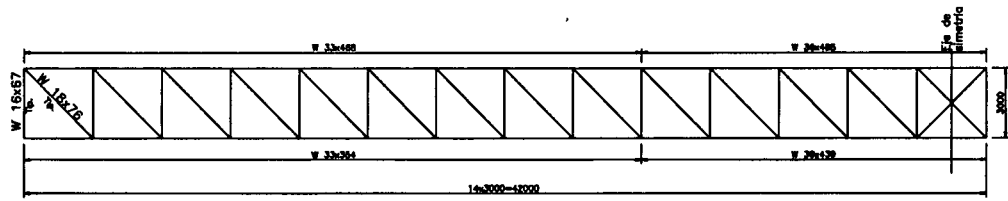
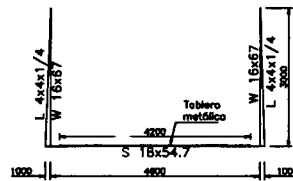


Figura 2. Modelo tridimensional puente 99,0 m.

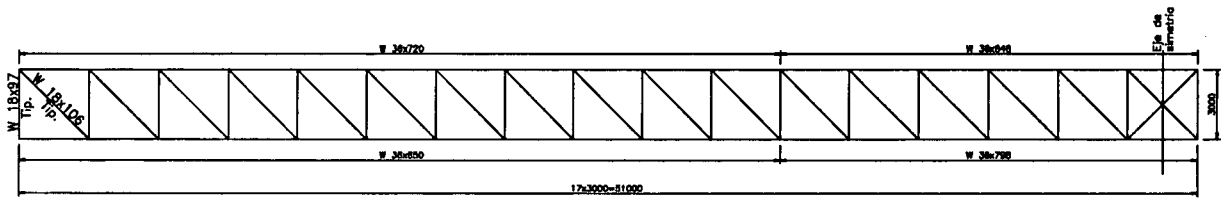


ARMADURA EN CELOSIA

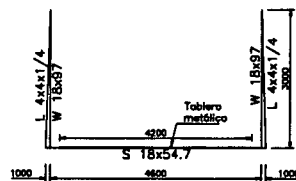


SECCION TRANSVERSAL

Figura 3. Puente 81,0 m.

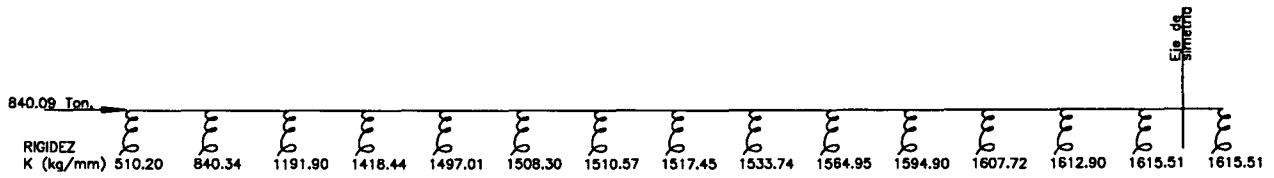


ARMADURA EN CELOSIA



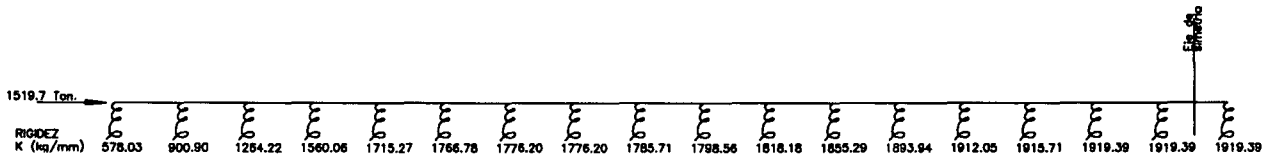
SECCION TRANSVERSAL

Figura 4. Puente 99,0 m.



MODELO DE COLUMNA CON APOYOS ELASTICOS

Figura 5. Puente 81,0 m.



MODELO DE COLUMNA CON APOYOS ELASTICOS

Figura 6. Puente 99,0 m.