

# Pasos Superiores realizados. Planteamiento estructural frente a acciones horizontales en proyectos de puentes

José Antonio Llombart y  
Vicenta Antón  
Dres. Ingenieros de Caminos C. y P.

## 1. INTRODUCCION

Vamos a exponer una serie de conclusiones obtenidas a lo largo de la realización de diversos proyectos de puentes construidos, de mediana luz, cuya descripción general incluimos.

Para ello, mencionaremos diversos conceptos relativos al diseño estructural para optimizar la respuesta frente a cargas horizontales, así como un procedimiento de análisis en el dominio elástico, que integra todos los elementos de la estructura, incluidos los apoyos elastoméricos.

## 2. DISEÑO

Los conceptos que van a manejarse son extensivos a otros muchos tipos de puentes; sin embargo, nos centraremos en la aplicación a unos Pasos Superiores sobre Autovía, ya que corresponden a un tipo de estructuras de gran actualidad por el elevado número de ellas que han de ser construidas dentro del Plan Nacional y concretamente vamos a hacer mención de las Obras de Fábrica del tramo I de la Autovía Murcia-Alicante, construidos recientemente y situados en zona sísmica de grado IX y, por tanto, con unas acciones horizontales de cálculo elevadas.

Estos puentes, de tres vanos, tienen una luz central máxima de 38 m, y unas luces laterales de 12,80 m. El tablero está formado por losa continua de hormigón pretensado, con aligeramientos y canto variable (Figuras 1 y 2). Los estribos, situados sobre terraplén, están cimentados sobre pilotes, que contribuyen a la resistencia del conjunto frente a las acciones horizontales del sismo.

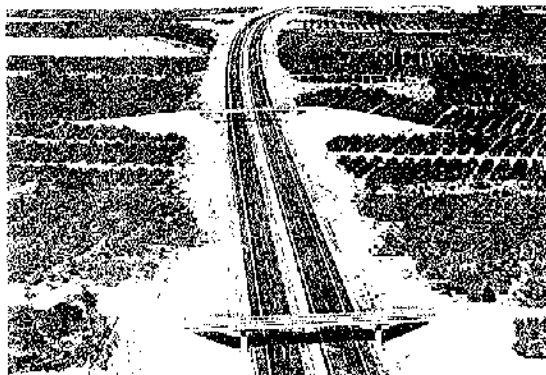


Fig. 1

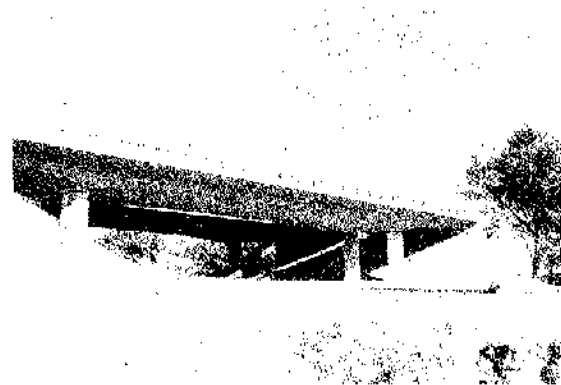


Fig. 2

El esquema resistente frente a las acciones horizontales es el siguiente:

Las fuerzas situadas en el tablero son transmitidas, en su totalidad, a través de los apoyos de neopreno, hasta la coronación de pilas y estribos, repartiéndose entre todos ellos según sus rigideces y las de los apoyos.

Los toques sísmicos se disponen con unas holguras tales, que solamente actúan en el caso de que las acciones sean superiores a las consideradas en el Proyecto, como medida de seguridad adicional.

Este esquema presenta las siguientes ventajas:

Se utiliza el mayor número de apoyos posibles para absorber las acciones, lo que disminuye riesgos.

La flexibilidad de los apoyos de neopreno bajo la actuación de cargas horizontales, da lugar a un periodo propio de vibración alto y permite un buen comportamiento de la estructura frente a acciones dinámicas.

El tablero, sometido solamente a peso propio y carga permanente, da lugar en los apoyos de estribos a reacciones positivas, que pueden cambiar de signo cuando actúan las sobrecargas del vano central (Figura 3), lo que obliga a disponer anclajes verticales. Dichos elementos están constituidos por barras de 32 mm de diámetro, ancladas en sus extremos (estribo y losa), quedando libres en la zona intermedia (péndulo), ofreciendo de este modo escasa rigidez frente a los desplazamientos horizontales. El anclaje superior en el tablero está

provisto de rosca y resulta accesible, al objeto de permitir el levantamiento del tablero para la posible sustitución de las placas de los aparatos de apoyo, en el futuro.

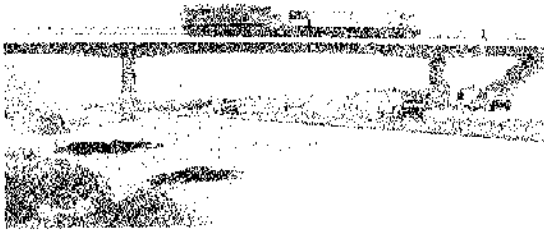


Fig. 3

### 3. ANALISIS

El análisis de este tipo de estructuras sometidas a cargas horizontales, se ha realizado satisfactoriamente a partir de un modelo de pórtico plano o pórtico espacial, que permite una simulación correcta del comportamiento de las placas de neopreno.

Vamos a admitir un comportamiento de los materiales linealmente elástico y las cargas exteriores las supondremos de carácter estático; incluido el sismo.

La asimilación de la placa de neopreno a una barra prismática convencional, no es correcta, ni aún haciendo uso de la deformación por cortante (figura 4), dado que en ésta los componentes de esfuerzo cortante y momento flector dependen tanto de los desplazamientos "y" como de los giros, mientras que en una pieza elastomérica, el esfuerzo cortante depende sólo de los desplazamientos "y" y no depende de los giros. Sin embargo, es muy sencillo adaptar un programa de cálculo matricial convencional para que permita el manejo de un tipo de barra "elastomérica" además del tipo de barra prismática normal. Únicamente hay que prever que las barras que correspondan a este nuevo tipo tienen una matriz de rigidez de barra distinta.

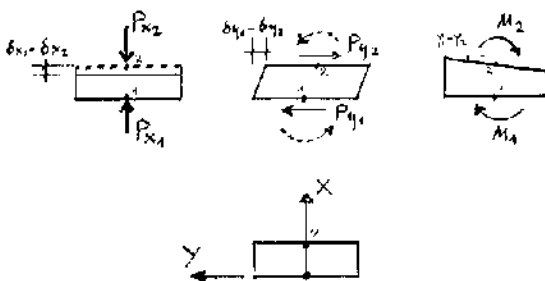


Fig. 4

Para una estructura plana la matriz de rigidez de una barra elastomérica referida a ejes locales es la siguiente.

$$\begin{matrix} P_{x1} \\ P_{y1} \\ m1 \end{matrix} = \begin{matrix} K_{11} \\ \left[ \begin{array}{ccc} E_n \cdot S/h & 0 & 0 \\ 0 & \frac{SG}{h} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a^5 \cdot bmG}{75 \cdot t^3 \cdot n} \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \delta_{x1} \\ \delta_{y1} \\ \varphi1 \end{matrix} +$$

$$+ \begin{matrix} K_{12} \\ \left[ \begin{array}{ccc} E_n \cdot S/b & 0 & 0 \\ 0 & \frac{SG}{h} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{a^5 \cdot bmG}{75 \cdot t^3 \cdot n} \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \delta_{x2} \\ \delta_{y2} \\ \varphi2 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} P_{x2} \\ P_{y2} \\ m2 \end{matrix} = \begin{matrix} K_{21} \\ \left[ \begin{array}{ccc} -E_n \cdot S/h & 0 & 0 \\ 0 & \frac{SG}{h} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{a^5 \cdot bmG}{75 \cdot t^3 \cdot n} \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \delta_{x1} \\ \delta_{y1} \\ \varphi1 \end{matrix} +$$

$$+ \begin{matrix} K_{22} \\ \left[ \begin{array}{ccc} E_n \cdot S/h & 0 & 0 \\ 0 & \frac{SG}{h} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{a^5 \cdot bmG}{75 \cdot t^3 \cdot n} \end{array} \right] \end{matrix} \begin{matrix} \delta_{x2} \\ \delta_{y2} \\ \varphi2 \end{matrix}$$

siendo:

- $E_n$ : Mod. elasticidad neopreno.
- $S$ : Area =  $a \times b$ .
- $a$ : Longitud de la placa en el plano del pórtico.
- $b$ : Ancho de la placa.
- $m$ : Número de placas.
- $h$ : Espesor neto de neopreno.
- $t$ : Espesor de cada capa intermedia de neopreno.
- $n$ : Número de capas.

Para una estructura espacial, la matriz de rigidez de barra elastomérica referida a ejes locales es la siguiente:

$$\begin{bmatrix} P_{x1} \\ P_{y1} \\ P_{z1} \\ m_{x1} \\ m_{y1} \\ m_{z1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_n \cdot S/h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & SG/h & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & SG/h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{G \cdot It}{h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a^5 \cdot b \cdot G}{75 \cdot t^3 \cdot n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a \cdot b^5 \cdot G}{75 \cdot t^3 \cdot n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{x1} \\ \delta_{y1} \\ \delta_{z1} \\ \varphi_{x1} \\ \varphi_{y1} \\ \varphi_{z1} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} -E_n \cdot S/h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -SG/h & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -SG/h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{G \cdot It}{h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a^5 \cdot b \cdot G}{75 \cdot t^3 \cdot n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{a \cdot b^5 \cdot G}{75 \cdot t^3 \cdot n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{x2} \\ \delta_{y2} \\ \delta_{z2} \\ \varphi_{x2} \\ \varphi_{y2} \\ \varphi_{z2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} P_{x2} \\ P_{y2} \\ P_{z2} \\ m_{x2} \\ m_{y2} \\ m_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_n \cdot S/h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -SG/h & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -SG/h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{G \cdot It}{h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{a^5 \cdot b \cdot G}{75 \cdot t^3 \cdot n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{a \cdot b^5 \cdot G}{75 \cdot t^3 \cdot n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{x1} \\ \delta_{y1} \\ \delta_{z1} \\ \varphi_{x1} \\ \varphi_{y1} \\ \varphi_{z1} \end{bmatrix} +$$

$$+ \begin{bmatrix} E_n \cdot S/h & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & SG/h & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & SG/h & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{G \cdot It}{h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a^5 \cdot b \cdot G}{75 \cdot t^3 \cdot n} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{a \cdot b^5 \cdot G}{75 \cdot t^3 \cdot n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_{x2} \\ \delta_{y2} \\ \delta_{z2} \\ \varphi_{x2} \\ \varphi_{y2} \\ \varphi_{z2} \end{bmatrix}$$

siendo:

$E_n$  : Módulo elasticidad neopreno.  
 $S$  : Area placa =  $a \times b$ ;

$a$  = lado paralelo a eje  $z$ ,  
 $b$  = lado paralelo a eje  $y$ .

h : Espesor neto de neopreno.  
 t : Espesor de cada capa de neopreno intermedio.  
 n : Número de capas.

$$I_t \approx \frac{a \cdot b^3}{5,5} ; \text{ siendo } b < a$$

En todas las ecuaciones anteriores se ha despreciado la parte de momento flector dependiente de los desplazamientos "y", es decir, se ha hecho nulo el segundo coeficiente de la tercera fila, en todos los casos, con el objeto de que resulten matrices simétricas y así poderlas manejar con los programas de cálculo habituales que trabajan con semibandas. En cualquier caso, dicho coeficiente es pequeño y no altera sustancialmente los resultados.

Una vez definidas las matrices de rigidez de las barras en ejes locales, el resto del proceso de cálculo es idéntico al realizado normalmente por cualquier programa de cálculo matricial.

En la figura 5 se muestra un esquema, con la discretización de la estructura según un pórtico plano, en donde se incluyen todos los elementos, tablero, apoyos, pilas, estribos y pilotes. La rigidez proporcionada por los terraplenes se simula mediante apoyos elásticos sobre los nudos incluidos en los pilotes.

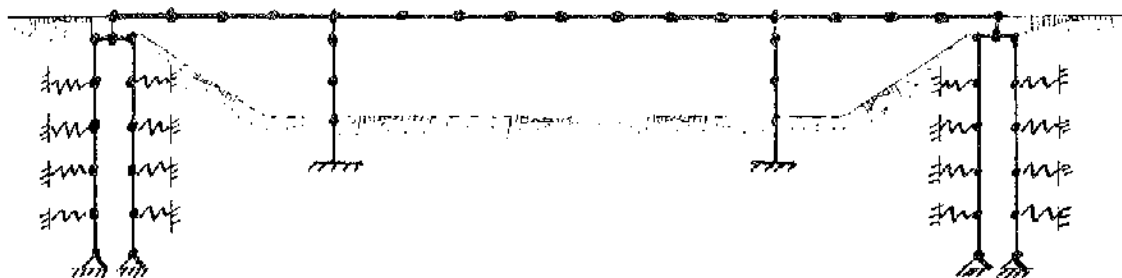


Fig. 5

Según que la dirección de la fuerza actuante sea hacia adentro o hacia afuera del terraplén, varían las constantes de muelle de los apoyos elásticos de la zona alta de los pilotes. Por ello, si la fuerza es hacia afuera del terraplén, se adopta una rigidez nula en la coronación del pilote, que se incrementa linealmente hasta alcanzar el máximo valor a la altura del pie del talud.

Si se utiliza un modelo de pórtico plano es necesario hacer un análisis de fuerzas longitudinales, que incluya fuerzas de pretensado, fenómenos reológicos y térmicos, frenado y sismo longitudinal, y, por otra parte, un análisis de fuerzas transversales para estudio de fuerza centrífuga, viento transversal y sismo transversal. En ambos casos, la discretización de la estructura es similar, pero son

distintas en general las inercias en sentido longitudinal y en sentido transversal de determinadas barras, como fustes, apoyos de neopreno y estribos.

Un modelo de pórtico espacial permite, obviamente, realizar simultáneamente los análisis longitudinal y transversal.

Por otro lado, el módulo de deformación transversal G del neopreno y el módulo de deformación longitudinal E del hormigón no son iguales para todas las hipótesis, sino que dependen del tiempo de duración de la carga.

Todo ello obliga a realizar diversos procesos de la estructura, con pequeñas variaciones en los datos para las diferentes hipótesis de carga.

La integración de resultados de las distintas hipótesis de cálculo se puede realizar directamente con la ayuda de unos archivos de datos auxiliares y un sencillo programa postproceso. El mismo procedimiento puede utilizarse para el análisis de puentes realizados por fases.

#### 4. CONCLUSIONES

Los procedimientos descritos se han aplicado en el Proyecto de numerosos Pasos Superiores realizados y, fundamentalmente, consisten en in-

tegrar en un solo cálculo el análisis del tablero (pretensado incluido), apoyos de neopreno, pilas y en algunos casos, pilotes.

Se ha podido verificar que existen notables diferencias entre los resultados obtenidos con este proceso integrado y el que se obtendría con el análisis por separado del tablero (estudiado como una viga continua sobre apoyos articulados) y las pilas, sometidas al conjunto de cargas verticales y horizontales en su coronación.

El conocimiento de la rigidez real del conjunto de la estructura y la posibilidad de estudiar su sensibilidad frente al cambio de rigidez de alguno de sus elementos (pilas, apoyos de neopreno, pilotes, respuesta elástica del terreno, etc.), proporciona grandes recursos al Projectista para el

diseño global, elección adecuada del tipo de apoyo, optimización de materiales y para la justificación del grado real de seguridad, sobre todo en estructuras situadas en zona sísmica.

Para la aplicación del método no se requieren grandes medios de cálculo, siendo suficientes los ordenadores de capacidad media, que hoy día son comunes en todas las Oficinas de Proyectos, y la utilización de programas de cálculo matricial de estructuras sobre los que se realizan las adaptaciones indicadas, en lo referente a las matrices de rigidez de los aparatos de apoyo.

## RESUMEN

Se exponen los criterios de proyecto seguidos en la realización de una serie de pasos superiores sobre Autopista, cuya particularidad consiste en que se encuentran en una de las zonas de España con máxima sismicidad (Grado IX).

La magnitud de las fuerzas horizontales derivadas de las acciones sísmicas, ha motivado la utilización de un esquema de cálculo que aporta ventajas en la optimización de materiales y proporciona recursos para lograr el diseño estructural más adecuado.

## SUMMARY

In this report is shown the project criteria followed in the completion of a series of highway overpass bridges, whose particularity consists in that they are found in one of the areas in Spain having maximum seismic movement (Grade IX).

The magnitude of the horizontal forces derived from the seismic movements has motivated the utilization of a calculation scheme which affords advantages in the good usage of materials and provides resources to achieve a more adequate structural design.

\* \* \*

## Segundo Simposio Internacional sobre "Estructuras para el cruce de los estrechos"

En Trondheim, Noruega, se va a celebrar durante los días 10 al 13 de junio de 1990, organizado por la "Sociedad de Ingenieros de Noruega" y la "Administración Pública Noruega de Carreteras", el Segundo Simposio Internacional sobre "Estructuras para el cruce de los estrechos".

Este Simposio es continuación del celebrado en Stavanger, en octubre de 1986. Desde entonces, han sido concluidas algunas nuevas obras para el cruce de estrechos, entre ellas, el largo túnel de Seikan, en Japón, y el complejo de túneles submarinos en Ålesund, en Noruega. Se ha avanzado mucho en las obras del famoso Eurotúnel entre Inglaterra y Francia y se continúa la discusión sobre si debe construirse un puente o un túnel para el cruce de los estrechos de Messina y Gibraltar. El objetivo fundamental del Simposio que ahora se anuncia es ampliar conocimientos en relación con los temas siguientes:

Tecnología. El Simposio abordará el estudio de todos los diferentes tipos de estructuras utilizados para cruzar los estrechos, es decir: puentes convencionales, puentes flotantes, tuberías sumergidas y flotantes, túneles sumergidos, túneles sumergidos perforados en roca y nuevos criterios para la construcción de ferrys de alta velocidad. Se pasará revista a los métodos actualmente aplicados en las investigaciones in situ así como a las técnicas utilizadas en los proyectos, la construcción y el mantenimiento de estas estructuras.

Una o más sesiones estarán dedicadas a los aspectos de la seguridad del tráfico; y se considera especialmente interesante obtener normas satisfactorias para el cálculo, la construcción y el mantenimiento de los túneles.

Por otra parte, se estima que las nuevas estructuras para el cruce de los estrechos pueden tener