

CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL PUENTE PEATONAL ATIRANDADO PARQUE LAS HERAS

Carlos A. Amura Ingeniero Civil F. I. U.B.A. ingamura@fi.uba.ar	Carlos F. Gerbaudo Ingeniero Civil F.C.E.F.y N. U.N.C. cgerbaudo@unc.edu.ar	Guillermo M. Gerbaudo Ingeniero Civil F.C.E.F.y N. U.N.C. ggerbaudo@unc.edu.ar
--	--	---

RESUMEN

La pasarela peatonal del Parque Las Heras, en la Ciudad de Córdoba, habilitada en 2023, es un puente atirantado de estructura mixta (hormigón/acero) construido sobre el Río Suquía.

En el presente trabajo se presentan los aspectos principales del diseño estructural de la pasarela atirantada, su concepción estructural, geometría, sustentación y funcionamiento.

En segundo término, se presentan su evaluación dinámica, con la verificación del confort de los usuarios frente a vibraciones, la calibración e interpretación de los ensayos estáticos y dinámicos y los resultados obtenidos.

Finalmente, se realizan conclusiones y recomendaciones sobre el diseño y aspectos del funcionamiento de una pasarela atirantada.

ABSTRACT

The pedestrian walkway of Las Heras Park, in the City of Córdoba, enabled in 2023, is a cable-stayed bridge with a mixed structure (concrete/steel) built over the Suquía River.

This work presents the main aspects of the structural design of the cable-stayed walkway, its structural conception, geometry, support and operation.

Secondly, its dynamic evaluation is presented, with the verification of user comfort against vibrations, the calibration and interpretation of the static and dynamic tests and the results obtained.

Finally, conclusions and recommendations are made on the design and aspects of the operation of a cable-stayed walkway.

Organiza:

CONSIDERACIONES SOBRE EL DISEÑO Y FUNCIONAMIENTO DEL PUENTE PEATONAL ATIRANDADO PARQUE LAS HERAS

Descripción de la Obra

Se trata de un puente sobre el Río Suquía, que vincula el Parque Las Heras con la Plaza Austria, en la Ciudad de Córdoba, Argentina para la circulación exclusivamente peatonal, de modo que permite un uso recreativo común, unificando a ambos espacios urbanos.

Su estructura es de naturaleza mixta (Acero/Hormigón) e incluye el uso de “tirantes” (cables de acero) para darle apoyos intermedios al tablero sobre el curso de agua. Se destaca por utilizar una columna inclinada (pilón) en la cual se anclan los tirantes en altura, con una geometría marcadamente asimétrica en la dirección longitudinal. Esta forma permite generar un “hito” urbano que destaca a la estructura, invitando a cruzarlo, integrando los espacios en un único parque.



*Figura 1. Imagen del Puente terminado desde aguas arriba.
(Fuente, foto de los autores)*

Organiza:

El anteproyecto de licitación fue elaborado por la Dirección de Vialidad – Córdoba y sobre el mismo se planteó una optimización geométrica, suprimiendo la pila Sur para liberar la circulación de la creciente (por estar dentro del lecho del río) lo que incrementó la luz libre principal a 58,20 m, sobre 81,00 m de longitud total.

También se ajustó la posición e inclinación del pilón y de todos los tirantes, para dar una relación más armónica entre el pilón y el vano principal.

Sistema Estructural

El tablero está conformado por dos vigas mixtas continuas apoyadas en los extremos en estribos de H°, en una pila de H°, que es la parte inferior del pilón y finalmente apoyadas sobre “apoyos elásticos” que son los tirantes anclados en el vano principal.

Estos tirantes están anclados superiormente en el pilón metálico (sin excentricidad) de modo que sus esfuerzos “bajan” por el pilón metálico, comprimiéndolo con una pequeña excentricidad.

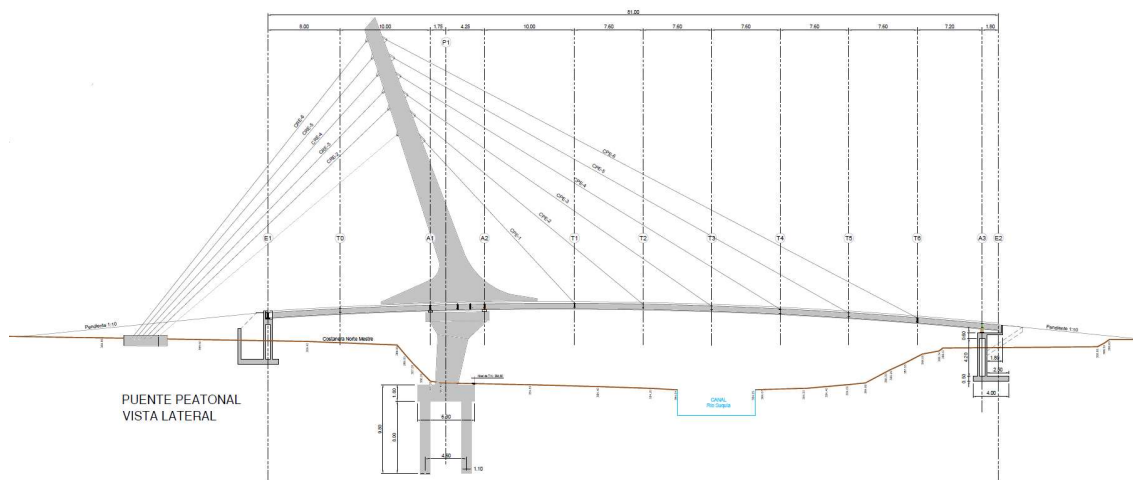


Figura 2. Esquema estructural

Opuestos al vano principal, se ubican los tirantes denominados “de retención” con la función de compensar la componente horizontal de los tiros de los tirantes del vano principal. Se anclan inferiormente a contrapesos denominados “muertos de anclaje”.

Los apoyos del tablero en ambos estribos son deslizantes, para tomar las variaciones de temperatura. El tablero se encuentra comprimido por la componente horizontal del tiro de los tirantes. En el encuentro de la parte superior metálica del pilón con la parte inferior del mismo de hormigón y el tablero se configura un “nudo” estructural al que concurren tres compresiones importantes, que evaluaremos más adelante. Todas las componentes de cargas horizontales longitudinales y la mayoría de las transversales “bajan” por corte por el pilón de H° al cabezal de fundación.

Organiza:

La estructura es simétrica con respecto al plano medio longitudinal y adopta un comportamiento espacial (3D) por la apertura lateral de los tirantes de retención, tal como puede verse en la imagen a continuación.

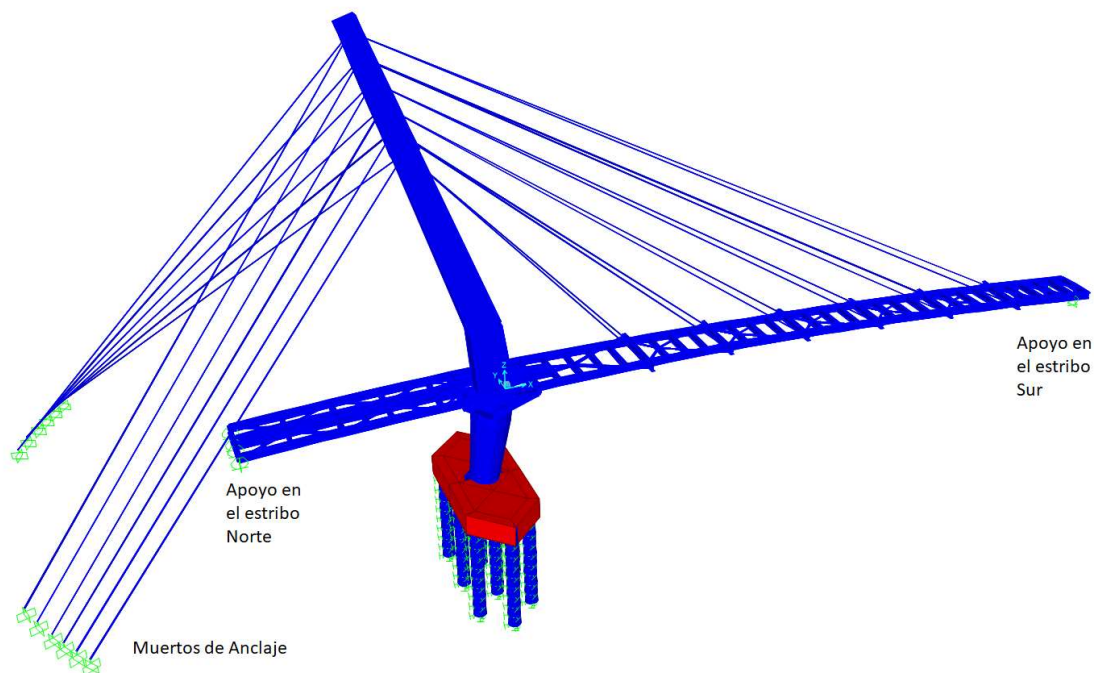


Figura 3. Modelo en 3D con distribución de tirantes

Como es el funcionamiento de un puente atirantado

La particularidad de un puente atirantado es que tiene preponderantemente esfuerzos directos (axiales) como principal recurso resistente.

O sea, las flexiones son una sollicitación complementaria, lo principal son las tracciones en los tirantes y las compresiones en pilones y tablero.

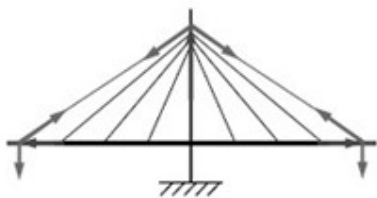


Figura 4. Se forma un sistema cerrado de fuerzas axiales

Organiza:

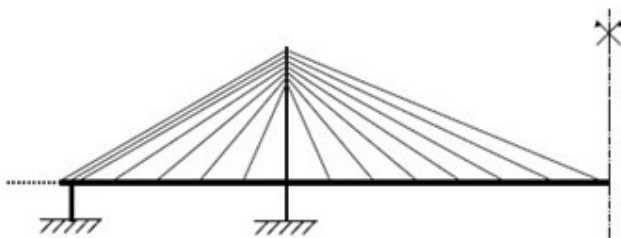


Figura 5. Caso de puente simétrico

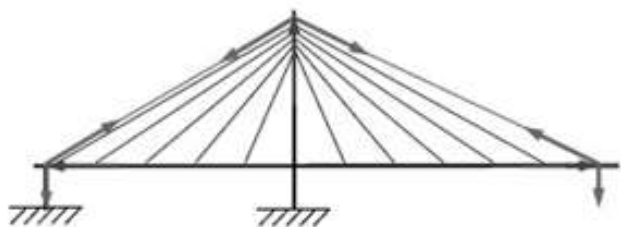


Figura 6. Medio puente con retención

Estos esquemas corresponden a puentes en reposo (sólo cargados con peso propio) que es el estado base de partida para el diseño. Según las proporciones elegidas y para evitar flexiones en el pilón, cuando el medio vano central es mayor al vano lateral, se requiere incorporar tirantes de retención.

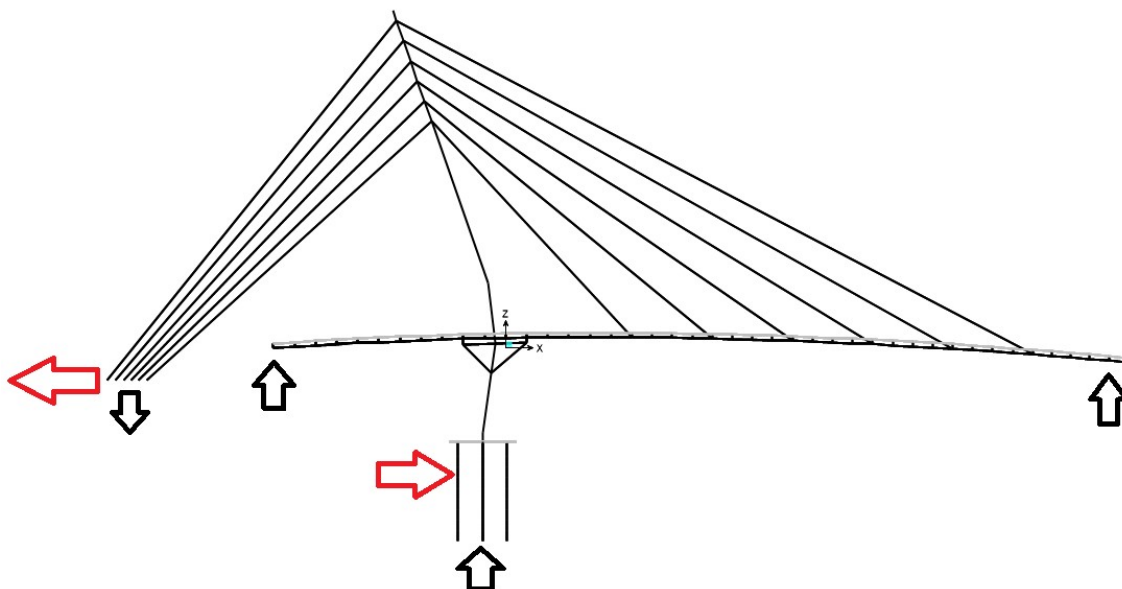


Figura 7. Reacciones en vínculos para puente asimétrico

Para los puentes asimétricos, en este caso de un único pilón, como los tiros en los cables son oblicuos ya no hay posibilidad, en el estado en reposo, de auto equilibrio de las componentes horizontales y siempre hay reacciones horizontales. Las vemos en la figura en rojo y las mismas se equilibran a través del suelo.

Organiza:

Muertos de anclaje

El tablero se sustenta mediante tirantes unidos a la pila, la cual se conecta a dos muertos de anclaje, uno Este y otro Oeste por el mismo sistema de cables.

Los muertos de anclaje se encuentran constituidos por una fundación superficial, pilotes de anclaje, pantalla frontal y contrafuertes de H° A°, como se observa en la Figura 8.

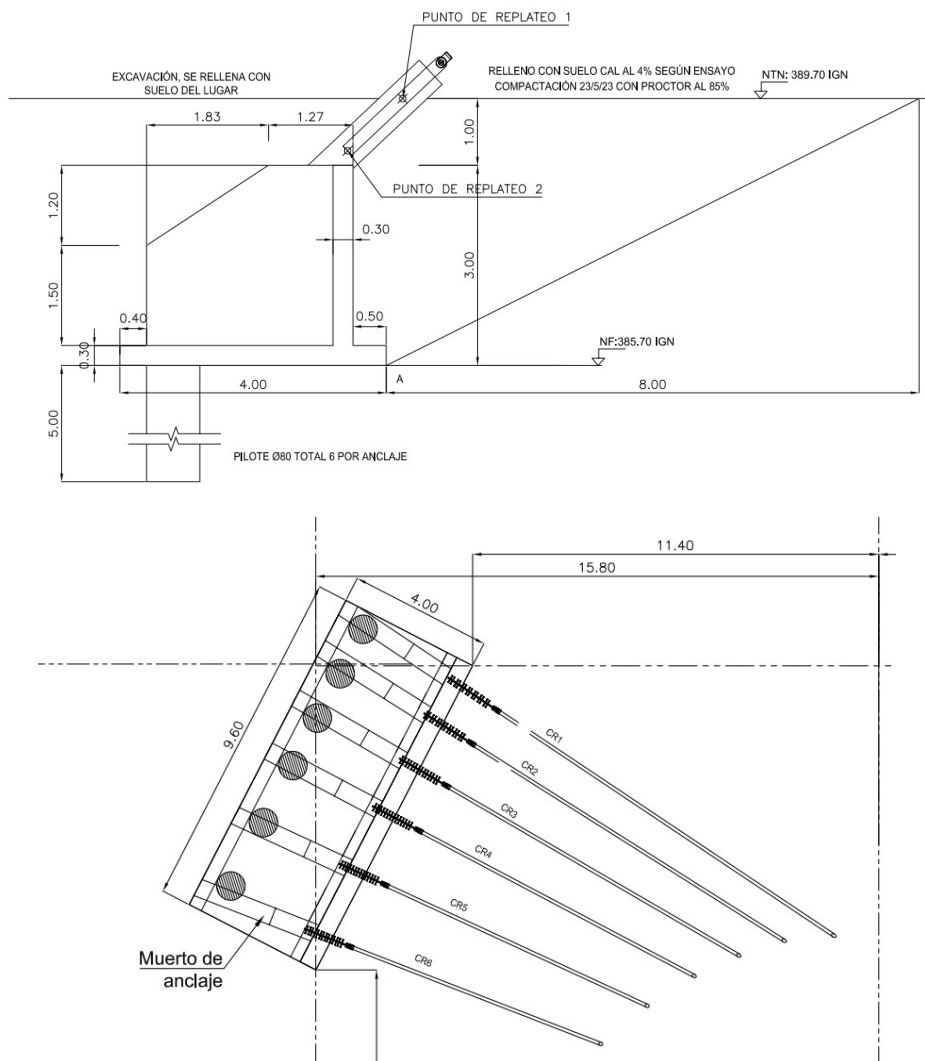


Figura 8. Vista y planta del muerto de anclaje

Organiza:



Figura 9. Imagen del muerto de anclaje

Las siguientes fuerzas actuantes sobre el muerto son las siguientes:

- Peso Propio (D)
- Empuje en reposo (E_0)

La componente del empuje en reposo resulta de la siguiente expresión:

$$E_0 = \frac{K_0 * H^2 * \gamma_{suelo}}{2} * L \quad (1)$$

Donde:

K_0 = Coeficiente de empuje en reposo = 0,3

H = Altura de suelo

γ = peso específico del suelo = 1,8 tn/m³

L = Largo del anclaje

- Empuje pasivo (E_p)

El cálculo del coeficiente de empuje pasivo surge de la siguiente expresión:

$$K_p = \tan^2\left(45 + \frac{\phi}{2}\right) \quad (2)$$

En lo referido al empuje pasivo, la ASSHTO recomienda un factor de reducción para la componente debida al empuje pasivo igual a 0,45. Este coeficiente está relacionado con las deformaciones necesarias para alcanzar la capacidad del suelo.

Organiza:

Por lo tanto, para el cálculo del empuje pasivo se considerará un coeficiente K_p efectivo igual a $K_p \times 0,45$.

Para la determinación de los valores de tensión y empuje se utilizan las siguientes expresiones:

$$\sigma_i = K_{p_{efectivo}} * \gamma_{suelo} * h_i \qquad E_p = \frac{\sigma_i * H * L}{2} \qquad (3)$$

Donde: $L = \text{Largo del muerto de anclaje}$ $H = \text{Altura total}$

- Tiro de los tirantes (T_v y T_h)
Surge de los análisis del tablero, en función de las fuerzas de tiro iniciales y del método constructivo.
- Capacidad lateral de los pilotes (V_r)
- Resistencia al arrancamiento de los pilotes (F_r)

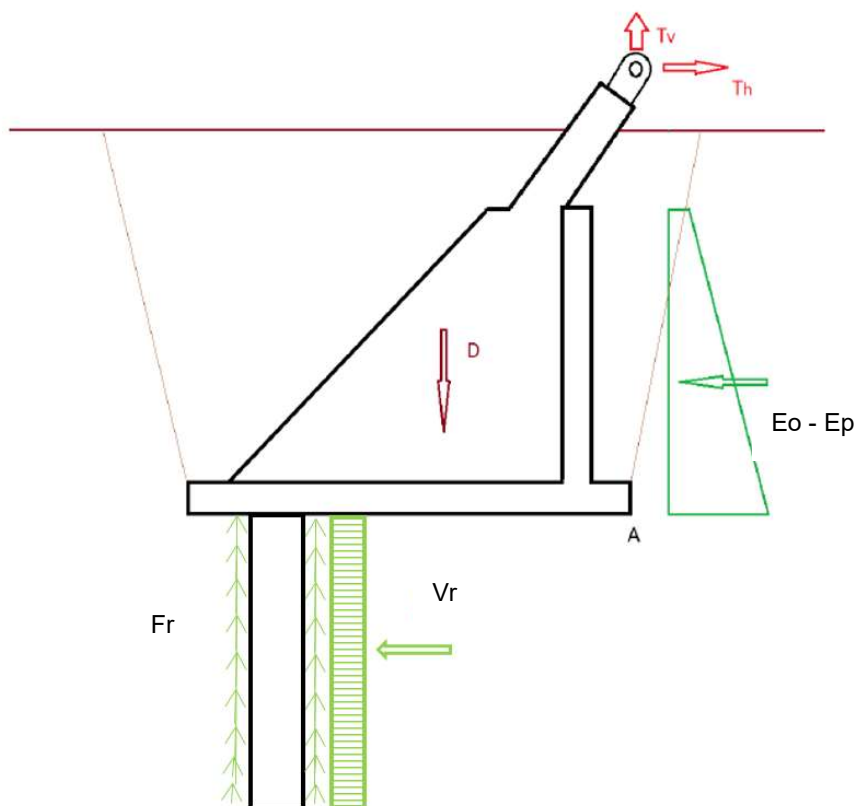


Figura 10. Esquema de cargas sobre el muerto de anclaje

Organiza:

Con estas cargas deben realizarse las siguientes verificaciones:

- Verificación al vuelco

En la Tabla 3 se calcula los momentos estabilizantes y desestabilizantes a partir de la magnitud de cada componente de fuerza con su respectivo brazo de palanca con respecto al punto "A".

- Verificación al arrancamiento

Debido a la componente vertical del tiro de los cables de retención, existirá una tendencia al levantamiento de la estructura por parte de dicho componente que debe ser equilibrada por las componentes del peso de la estructura de hormigón, por el peso del suelo y la resistencia al arrancamiento de los pilotes.

- Verificación al deslizamiento

En la verificación al deslizamiento se compara la fuerza desestabilizante debida al empuje en reposo, con respecto a la sumatoria de las componentes horizontales de las fuerzas estabilizantes.

Las fuerzas estabilizantes resultan de la siguiente expresión:

$$F. Estabilizantes = N * tg(\delta) + Ep + Vr \quad (4)$$

Donde:

N = Fuerzas verticales hacia abajo - Fuerzas verticales hacia arriba [tn]

$\delta = (2/3) * \varphi$ φ = Angulo de fricción de arena y grava de fundación = 30°

Estribos

La infraestructura de la pasarela peatonal se encuentra conformada por un pilón central y por 2 estribos (Norte y Sur).

El estribo Norte (Figura 12), es una estructura de Ho Ao conformado por una pantalla frontal alivianada con casetones de poliestireno expandido, una base de fundación superficial, una pantalla trasera de confinamiento, un conjunto de 3 contrafuertes y en el extremo superior del estribo se encuentran los muros ala.

Por otro lado, el estribo Sur (Figura 13), es una estructura de Ho Ao materializada con una pantalla frontal alivianada con casetones de poliestireno expandido, una base de fundación superficial de H° A° y al igual que el estribo Norte, en el extremo superior, la materialización de los muros ala.

Organiza:

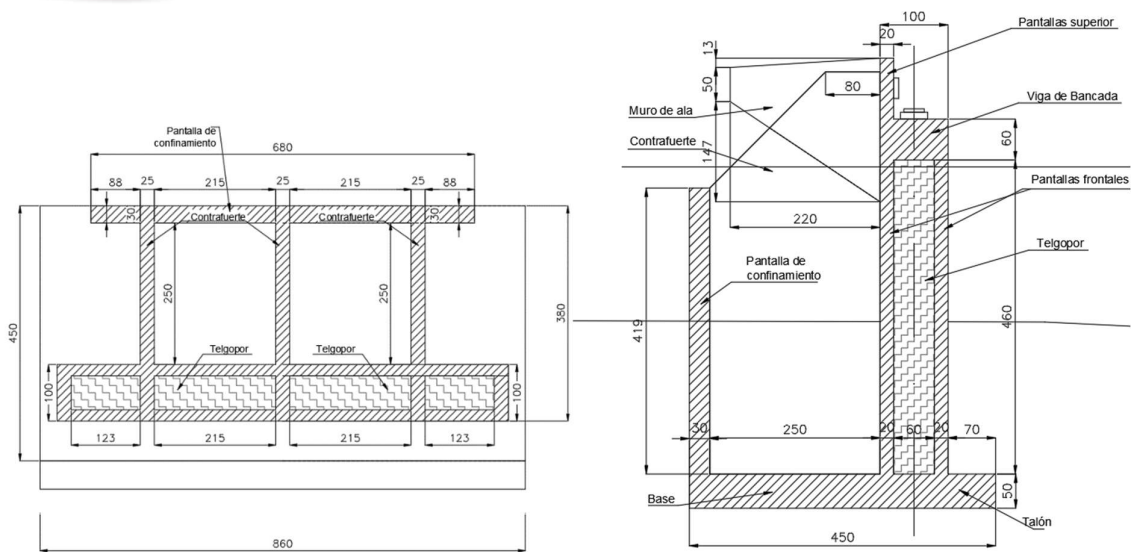


Figura 11. Vista frontal y corte del estribo Norte.



Figura 12. Imagen del Estribo Norte.

(Fuente, foto de los autores)

Organiza:

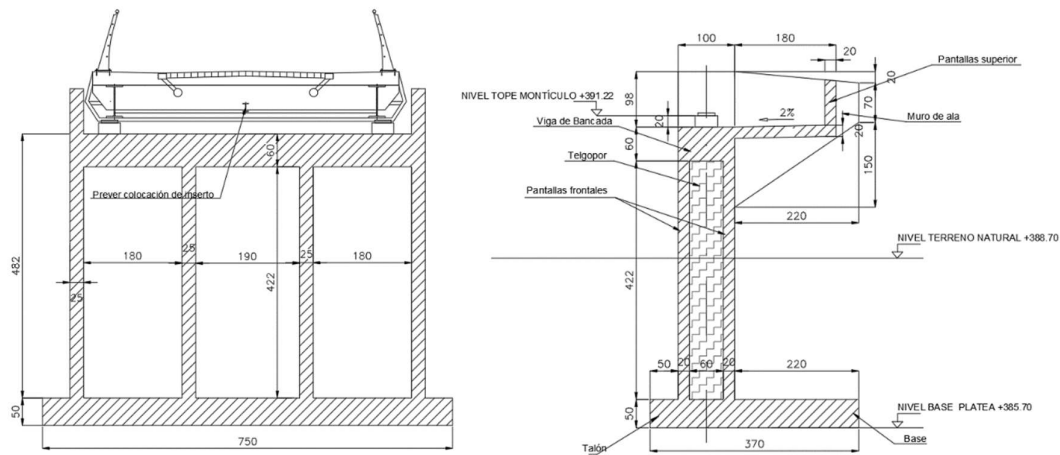


Figura 13. Vista frontal y corte del estribo Sur

Pilón

La pila se compone de dos partes, la parte superior metálica donde se anclan los obenques y la parte inferior de hormigón armado que sirve de apoyo al tablero y transmite la carga a la fundación.

La forma del pilón de hormigón es compleja, con curvas y orientadas con una deliberada inclinación.

Para poder explicarla, se la presenta como una pila de cuatro elementos:

- 1) Un primer elemento, el inferior que arranca desde el centro geométrico de la tapa del cabezal y es un tronco de cono, precisamente incrustado en el cabezal con 240 cm de diámetro inferior, 340 cm de diámetro superior, altura de 572 cm y una inclinación respecto a la vertical de $7,72^\circ$.
- 2) Sobre el cono se ubica un tronco de transición, cuya superficie lateral es un conoide limitado inferiormente por la sección transversal del tronco de cono y superiormente por una elipse inscrita en el fondo del tercer elemento.
- 3) El tercer elemento es un paralelepípedo de $740 \times 590 \times 100$ centrado con respecto al eje del puente.
- 4) Finalmente, sobre esta "placa" se colocan 8 pedestales, que son troncos de columna de $h = 20$ cm destinados a recibir los apoyos metálicos.

Organiza:



5)

Figura 14. Imagen del pilón

El pilón metálico, ubicado desde la cota del tablero, hasta su tope, con una extensión total de 33 m, tiene la particularidad de ser de sección variable, con unas dimensiones transversales que en su altura pasan de un mínimo de 1,50 m en el tope a un máximo de 5,90 m en su unión al tablero/pilón de H°. Presenta variaciones lineales de esta altura de sección, con un cambio en su variación a 5,50 m sobre el tablero.

Organiza:

Tirantes

Se utilizaron tirantes con horquilla de la serie H1000 (activos en articulación con el tablero y pasivos en articulación con el pilón) formados por 2, 3 o 4 cordones según el nivel de sollicitación.

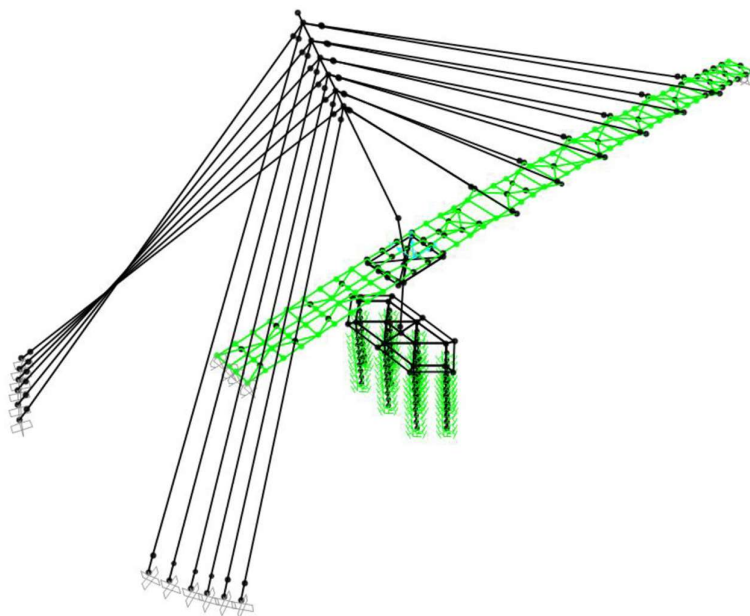


Figura 15. Modelación para el análisis del montaje de los tiranes

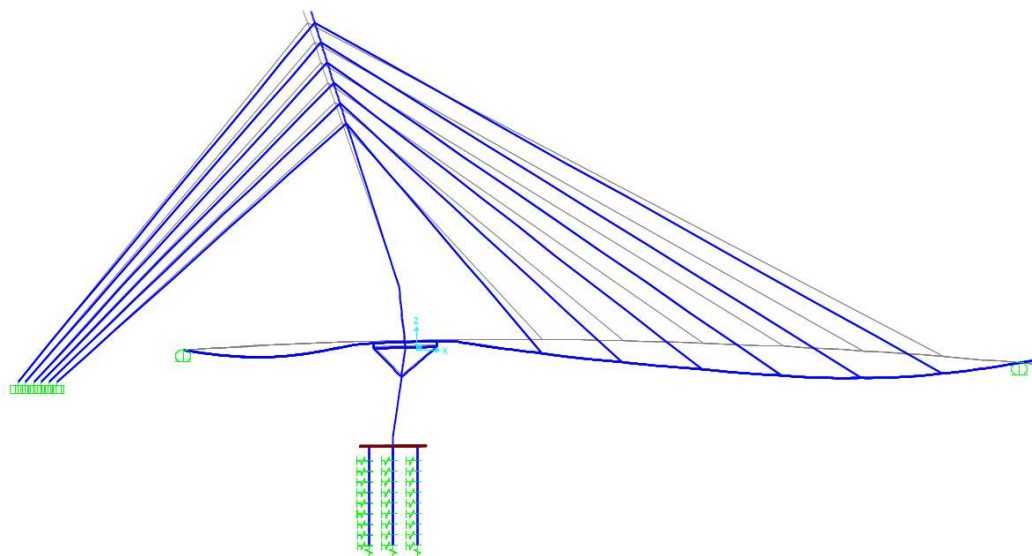


Figura 16. Deformada (magnificada) para máxima carga peatonal.

Organiza:

Se debe destacar que, en este tipo de estructuras, el proyectista entrega el diseño y usualmente continúa colaborando con la dirección de obra ya que es quien debe establecer un plan de montaje, sobre todo de los tirantes, ya que es indispensable realizar un control de la geometría que permita al puente adoptar en su rasante las condiciones de proyecto para la situación de reposo.



*Figura 17. Estado de la obra al terminar el montaje de los tirantes
(Foto gentileza del Ing. Rodrigo Manzano)*

Tablero

Está conformado por dos vigas longitudinales armadas doble “T” con placa superior de H° y un sistema de arriostramiento adecuado para el montaje. Revestido en chapa.

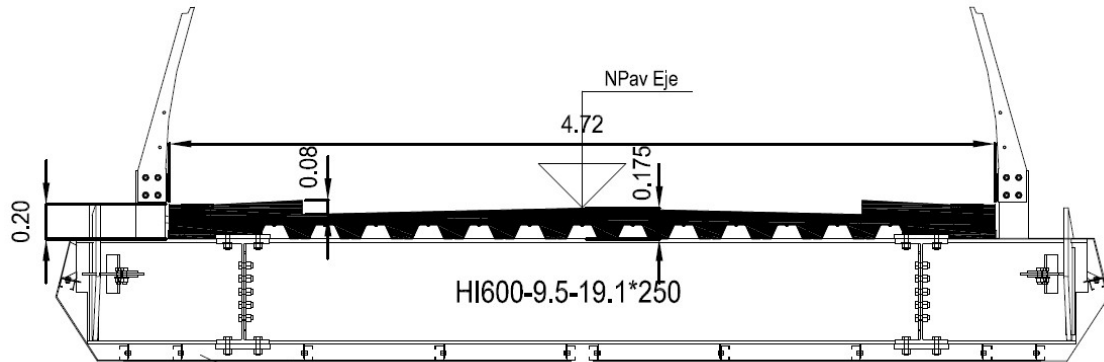


Figura 18. Sección del tablero mixto

Organiza:



Figura 19. Imagen de la parte metálica del tablero

Análisis dinámico

En puentes peatonales es de suma importancia cuidar las posibles percepciones o molestias que los usuarios puedan experimentar al transitar, o sea las condiciones de confort, exigencia propia de las estructuras flexibles, que no se presentan en los puentes usados por vehículos. En el diseño, se evaluó el comportamiento dinámico en cuanto a los modos y frecuencias de vibración y desplazamientos, velocidades y aceleraciones estimados para el tablero bajo la excitación peatonal.

De la experiencia obtenida en el “Puente del Milenio” sobre el Támesis en Londres y otros casos recientes, se ha desarrollado la Technical guide: **Footbridges** de la Sétra de la que se obtuvo:

Por su ubicación entre dos parques y uso recreativo, ubicamos a la pasarela en Clase III

→ *"Clase III: pasarela de uso estándar, que ocasionalmente podrá ser transitada por grandes grupos de personas pero que nunca será cargada en toda su zona de apoyo"*

El comportamiento dinámico va a estar caracterizado por la respuesta determinada por la masa y la rigidez de la estructura más el efecto del amortiguamiento expresado en los modos y frecuencias de vibración. Consideramos que este comportamiento conlleva pequeñas deformaciones y por lo tanto es válido un análisis lineal.

Organiza:

Como el tablero es una estructura compuesta por dos materiales de amortiguamiento distinto, realizamos una interpolación:

CEB information bulletin No. 209 (Ref. [7]), an important summary document dealing with the general problem of structure vibrations provides the following values for use in projects:

Type of deck	Critical damping ratio	
	Minimum value	Average value
Reinforced concrete	0.8%	1.3%
Prestressed concrete	0.5%	1.0%
Metal	0.2%	0.4%
Mixed	0.3%	0.6%
Timber	1.5%	3.0%

Tabla 1. Amortiguamientos recomendados por CEB

$$\xi_{\text{mode}} = \frac{\sum_{\text{material } m} \xi_m EI_m}{\sum_{\text{material } m} EI_m} = (166574 \cdot 0,4\% + 186653 \cdot 1,3\%) / 353227 = 0,88\% \quad (9)$$

Se observa que el amortiguamiento estimado es menor al 1%.

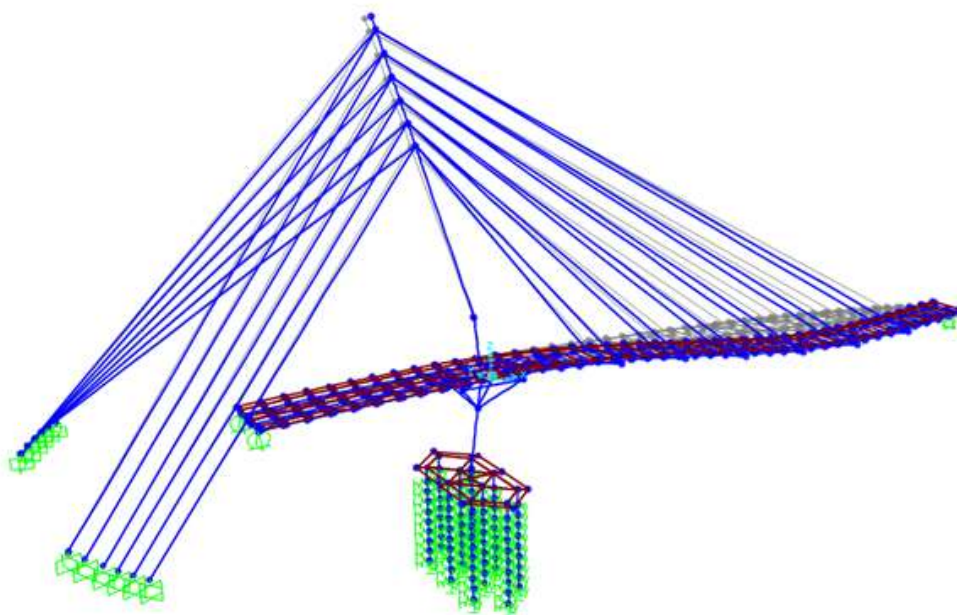
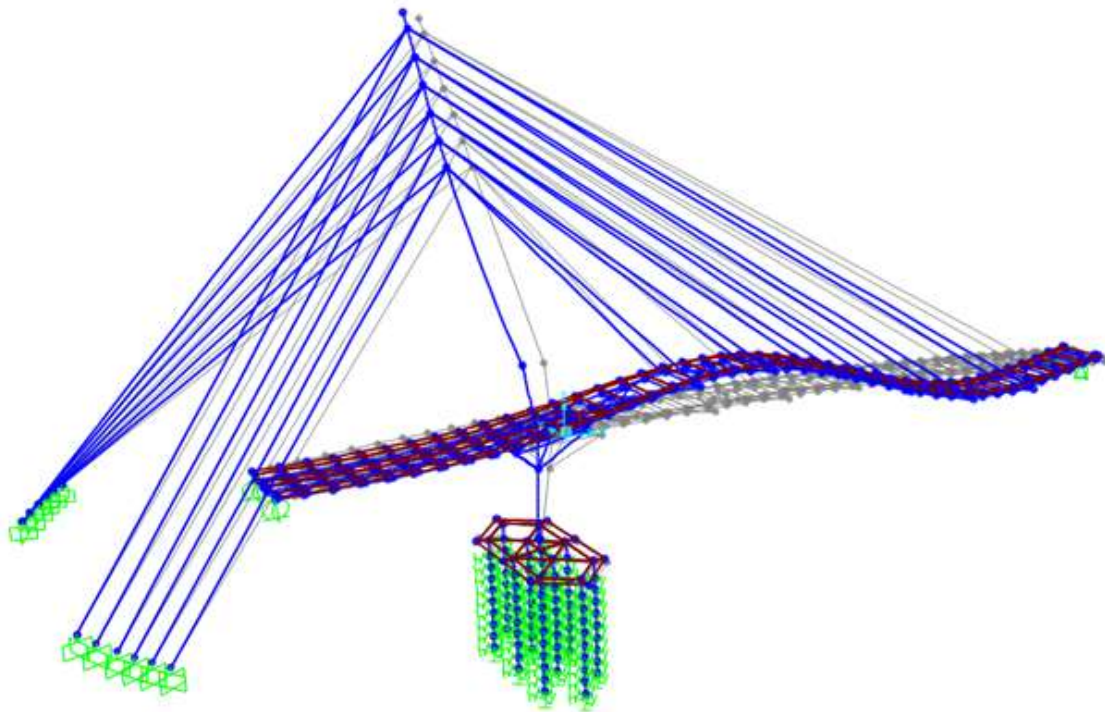


Figura 20. Primer modo, desplazamientos verticales

$f = 0,960$ Hz con peatones $f = 0,986$ Hz sin peatones

Organiza:



*Figura 21. Segundo modo, desplazamientos longitudinales y verticales
 $f = 1,643$ Hz con peatones $f = 1,678$ Hz sin peatones*

Ensayos de carga Estáticos y Dinámico

Fueron realizados ensayos de carga, tanto estáticos como dinámicos, para comprobar las hipótesis formuladas en etapa de diseño y poder sacar conclusiones sobre el comportamiento de la estructura.

El ensayo estático se realizó según este esquema:

Organiza:

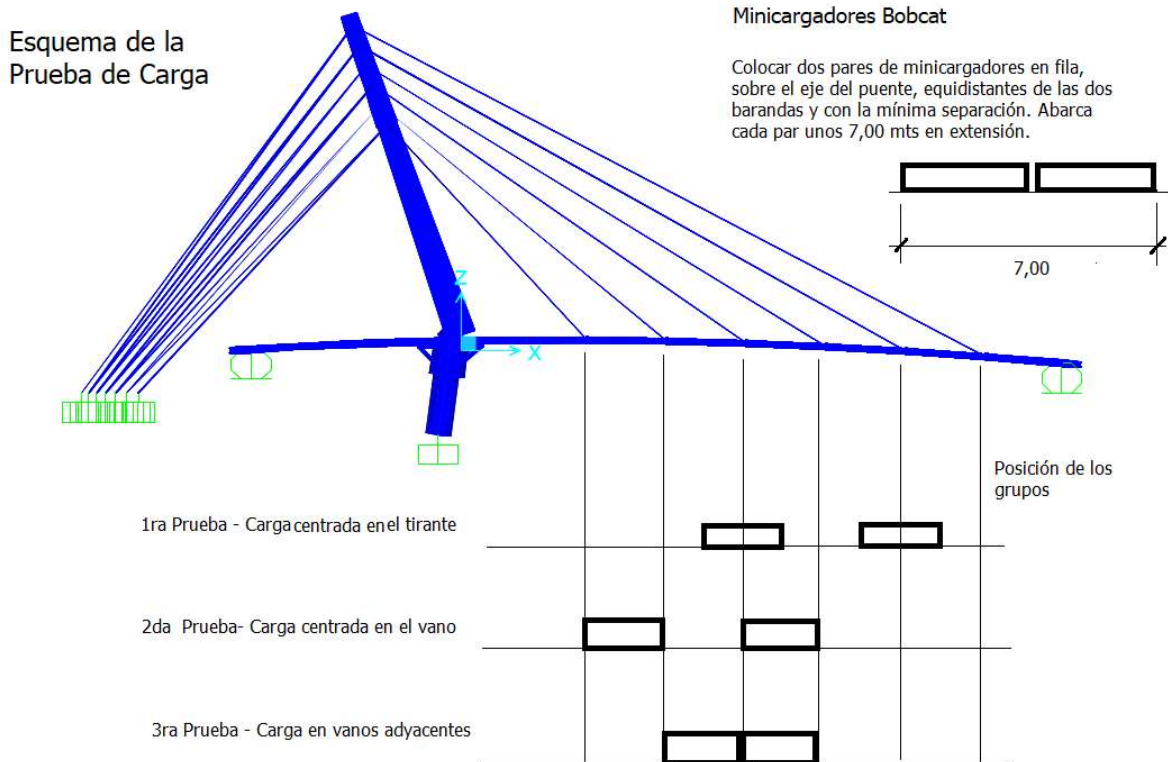


Figura 22. Esquema de la prueba de carga estática

Las mediciones efectuadas pusieron de manifiesto que la estructura tiene rigideces del orden del doble de lo obtenido en los modelos de diseño. Las flechas en el tablero se ubicaron entre el 50 y el 70% de las previstas, con una recuperación elástica casi completa.

Y el ensayo dinámico arrojó resultados de este tipo:

Tabla 2. Relación de amortiguamiento [%]

Prueba	Modo 1 1.39 Hz		Modo 2 2.74 Hz		Modo 3 4.89 Hz		Modo 4 7.26 Hz	
	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2	Canal 1	Canal 2
1	0.17	0.33	0.32	0.46	1.08	0.73	0.50	0.48
2	0.22	0.27	0.28	0.52	1.41	0.77	0.48	0.46
3	0.23	0.25	0.24	0.52	1.72	0.68	0.44	0.44
Promedio	~0.25		~0.40		~1.00		~0.50	

Tabla 2. Resultados obtenidos en la prueba dinámica.

Mediciones efectuadas por el Ing. Antonio M. Prato

Organiza:

Los amortiguamientos medidos resultaron muy pequeños, como era de esperar. La mayor rigidez medida estáticamente y la forma de los modos permitieron deducir que para los modos con traslación longitudinal los apoyos móviles ubicados entre el tablero y los estribos Norte y Sur permanecían sin deslizamiento en la vibración.

Los resultados de los ensayos permitieron calibrar el modelo dinámico y así ubicar cada modo de vibración dentro de los rangos definidos en la recomendación de Sétra:

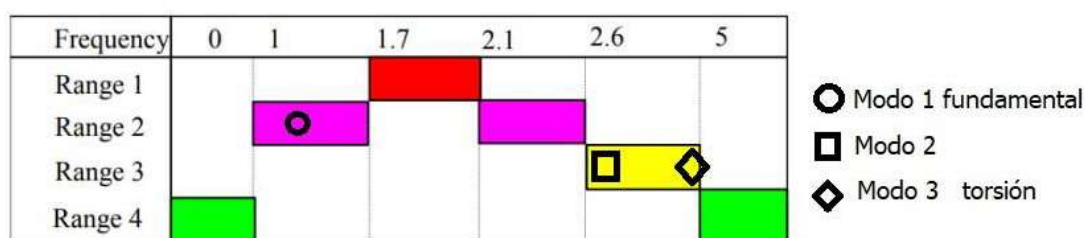


Table 2.3: Frequency ranges (Hz) of the vertical and longitudinal vibrations

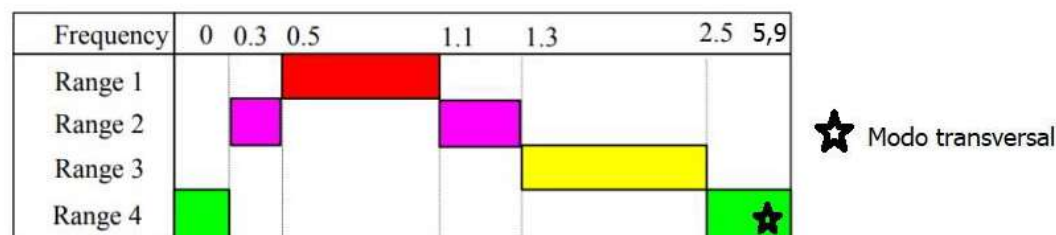


Table 2.4: Frequency ranges (Hz) of the transverse horizontal vibrations

Figura 23. Rangos de comportamiento obtenidos

Considerando que el Rango 1 es inaceptable, los 2 y 3 tienen alguna y baja percepción de movimiento y el rango 4 resulta con movimientos imperceptibles, se comprobó que las condiciones de confort resultaron aceptables.

Organiza:

Referencias:

- H1000 Stay Cable System – Freyssinet
- Technical guide – **Footbridges** – Octubre 2006
Assesment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading
Sétra – Service d'Études techniques des routes et autoroutes



october 2006

Technical guide

Footbridges

Assessment of vibrational behaviour of footbridges
under pedestrian loading

- CEB Information bulletin N° 209
Practical guidelines. CEB, B. I. 209, August 1991.

Organiza: