

Diseño de puente peatonal urbano bajo consideraciones HIVOSS

Eduardo Martel¹, Agustín Aramayo¹, Guillermo Robledo¹ y Raúl Middagh²

Resumen

El diseño de pasarelas urbanas con alto y variado tránsito peatonal, ha sido objeto de una amplia revisión, particularmente a partir de los inconvenientes sufridos en el Puente del Milenio (Londres, Inglaterra) el día mismo de su inauguración, que obligaron a su clausura temporaria y posterior reajuste mediante dispositivos para modificar sus parámetros de comportamiento dinámico. En este trabajo se describen las previsiones tomadas a nivel de diseño para evitar este tipo de inconvenientes y las verificaciones realizadas corroborando la aptitud de la pasarela para preservar el satisfactorio comportamiento dinámico y el confort de tránsito peatonal asociado. Los reglamentos vigentes en Argentina no contienen información, recomendaciones ni previsiones acerca de acciones específicas sobre pasarelas; en particular acerca de efectos dinámicos como vibración inducida por peatones. Se hizo un relevamiento de las normas y reglamentos de los países más avanzados en la materia, como así también de publicaciones de investigación recientes.

Palabras clave: pasarela, metálica, dinámico, vibración, tránsito humano.

1. Introducción

Se trata de dos pasarelas destinadas al cruce de vías de Ferrocarril Belgrano, entre calles Sui-pacha y Marco Avellaneda, para dar continuidad de tránsito peatonal a las calles Córdoba y Mendoza, en la ciudad de San Miguel de Tucumán.

Se describen en este trabajo los análisis estructurales realizados y las verificaciones tendientes a definir la aptitud estructural de los principales elementos constitutivos y del conjunto del sistema estructural de las pasarelas

1. Departamento de Construcciones y Obras Civiles, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán – Avenida Independencia 1800, San Miguel de Tucumán, Tucumán, Argentina.

2. Metalúrgica Di Bacco, Ruta Nacional No. 9, Km. 1298, Tucumán, Argentina.

proyectadas. No se incluye en esta etapa un detalle riguroso del procedimiento de dimensionado/verificación de los elementos individuales, ni el análisis de las conexiones entre elementos estructurales principales ni los cálculos de detalles de las rigidizaciones y de los detalles constructivos.

Las pasarelas proyectadas se enmarcan dentro de una tipología que se podría identificar como bowstring bridge, una estructura del tipo autocompensada que resulta en sollicitaciones simples sobre las fundaciones. El arco es del tipo rebajado, con una luz de 54.65 m, proviendo una estética agradable y coherente con el entorno. Los arcos están en planos inclinados intersectantes superiormente, tal como se ilustra en las Figuras siguientes.

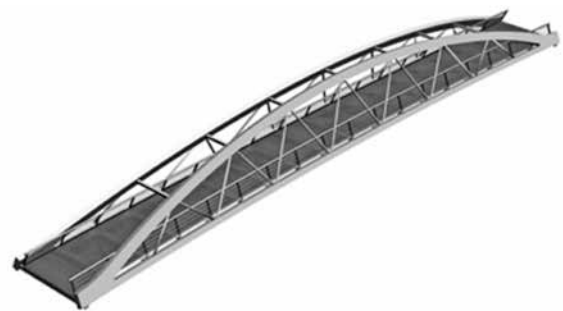


Fig. 1. Tipología de Pasarela Bowstring

2. Descripción y caracterización de la

estructura de la pasarela

La estructura resistente de la pasarela se basa en la tipología bowstring. Esta tipología se diferencia de los arcos atirantados en que se dispone de elementos reticulados diagonales en el plano constituido por el arco y el tensor, mientras que en los arcos atirantados puros los elementos de vinculación entre arco y tensor son verticales y resisten mediante tracción el tablero. El reticulado en el bowstring logra que el arco y el tensor trabajen conjuntamente generando un híbrido entre un arco atirantado y una viga con cordón superior curvo, adecuado a las solicitaciones emergentes de las gravitacionales.

Para el caso de bowstring resultan entonces arcos rebajados con baja esbeltez, característica que se considera adecuada para los efectos vibratoriales que se pueden registrar en pasarelas peatonales de peso relativamente reducidos como es el caso en tratamiento.

Adicionalmente, el bowstring comparte con el arco atirantado una importante ventaja ya que se trata de una estructura autocompensada, en el sentido de que la fuerza de atirantamiento propia de los arcos (en este caso magnificadas por tratarse de un arco rebajado) es tomada internamente por el tensor, evitando la transferencia a las fundaciones de importantes fuerzas; con la simplificación resultante para las mismas y los consecuentes beneficios económicos y de tiempo de ejecución.

Por último, también gracias a la característica de autocompensada, este tipo de estructura resistente plantea una ventaja constructiva definitiva, cual es la posibilidad de poder desarrollar la construcción completamente en taller, siendo el único condicionante en este sentido las limitaciones para el transporte. Aun teniendo en cuenta dichas limitaciones, la posibilidad de construir la estructura en un cantidad discreta de partes a ser montadas en el site genera importantes beneficios en tiempo, dinero, calidad y seguridad.

Para el caso actual, se ha completado la caracterización del diseño dotando a los dos planos resistentes longitudinales de una inclinación que logra que los planos sean física y visualmente convergentes hacia un arco virtual superior al tablero. Esto confiere a los viandantes una

sensación de seguridad y contención e invita a los mismos al tránsito y permanencia en la pasarela, que se convierte así en un elemento convocante. Se espera de esta manera que con este rasgo distintivo, sumado a la agradable y sobria estética que las pasarelas presentan a la distancia desde los corredores vehiculares y peatonales circundantes que completan el Paseo del Bicentenario, se conviertan con el paso del tiempo en un elemento icónico para la ciudad.

Los arcos son circulares. Los tensores, por su parte, no son rectos sino que tienen una curvatura suave a modo de contraflecha.

Las vinculaciones entre los dos planos resistentes se realiza en dos instancias: a nivel del tablero para circulación peatonal, vinculando los tensores y a nivel de los arcos, vinculando los mismos.

Las vinculaciones a nivel del tablero se realizan mediante vigas transversales y diagonales, generando un reticulado horizontal juntamente con los tensores a los que vinculan.

El solado se materializa mediante placas prefabricadas de hormigón pretensado. Las placas van colocadas mediante pernos a las vigas transversales de vinculación entre tensores. Sin embargo, las uniones son diseñadas de manera de lograr una sujeción simple; las placas no tienen continuidad entre ellas ni resultan colaborantes en la acción de los tensores; en consecuencia, no constituyen elementos estructurales a nivel global, siendo su función resistente solamente la de soportar el tránsito peatonal entre los vanos constituidos por las vigas transversales de tablero.

Para todos los elementos estructurales de las pasarelas se ha adoptado secciones cajón y tubulares formadas por chapas metálicas y caños metálicos.

En las Figuras 2 y 3 se muestra para ilustración la sección transversal del arco (en su unión con un arriostamiento típico) y del tensor (en su unión con una viga transversal de tablero) respectivamente.

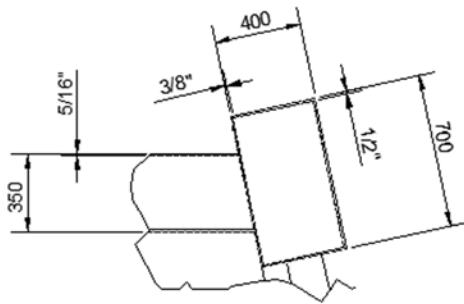


Fig. 2. Sección Transversal Arco en unión con arriostramiento transversal horizontal.



Fig. 3. Sección Transversal Tensor en unión con Viga Transversal Tablero

3. Consideraciones para el diseño

Por tratarse de un proyecto con características especiales de ubicación, funcionalidad y exposición, se ha seguido un proceso de diseño intenso y extendido en el tiempo en el que se han tenido en cuenta un importante conjunto de parámetros técnicos que se resumen brevemente en los apartados que siguen a continuación.

3.1. Consideraciones generales

De las investigaciones internacionales más recientes y sus resultados recogidos en los últimos apartados incorporados a los Códigos, Reglamentos y Normas vigentes en los países tecnológicamente más avanzados, se puede encontrar limitaciones y recomendaciones que rigen para pasarelas livianas susceptibles a problemas de vibración por cargas antrópicas. Estas han sido extraídas y aplicadas consistentemente para el actual proyecto de la pasarela del Bicentenario y han guiado el proceso de diseño que ha resultado en la versión final motivo de esta memoria de cálculo.

Consecuentemente con el relevamiento bibliográfico realizado, en el diseño ha primado la búsqueda de una adecuada rigidez ante las distintas sollicitaciones, particularmente las dinámicas, a las que puede llegar estar sometida la estructura en su vida útil.

3.2. Consideraciones particulares

Debido a restricciones de la Secretaría Nacional de Regulación del Transporte (SNRT) y del propio Ferrocarril, se debe prescindir de plantear apoyos intermedios para las pasarelas.

El gálibo peatonal fue definido por la Secretaría de Obras Públicas de la Provincia de Tucumán, siendo mostrado en la Figura 4 sobre un ancho de tablero básico de 4 m. de ancho.

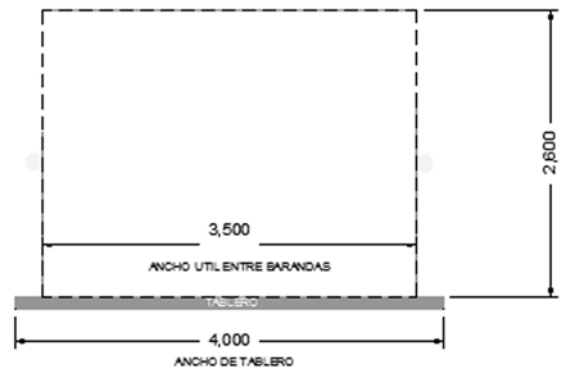


Fig. 4. Gálibo peatonal requerido

Bajo estos condicionantes principales para el diseño estructural, se realizó una búsqueda bibliográfica conducente a definir la tipología adecuada para una pasarela liviana y netamente urbana teniendo en cuenta las investigaciones más recientes sobre diseño, cálculo, ejecución y comportamiento de pasarelas con características similares a la estudiada.

Como concepto de diseño, el mismo es gobernado por la rigidez de la estructura ante acciones dinámicas más que por la resistencia global de la estructura y la de sus elementos componentes principales.

La rigidez flexional longitudinal ante cargas estáticas y dinámicas por tránsito peatonal gravitacionales se logra mediante dos planos resistentes consistentes cada uno en un bowstring híbrido rebajado, que combina el trabajo en arco con el de viga reticulada. La rigidez transversal resulta de generar adecuadas vinculaciones en-

tre los elementos principales de los planos resistentes longitudinales, para lograr el trabajo de los mismos ante solicitaciones derivadas de la acción del viento y de la sincronización lateral de marcha humana. Finalmente, la rigidez torsional se materializa con los planos inclinados de los bowstring y los planos horizontales a nivel de tablero y de arcos, que en conjunto componen un cajón trapecial de sección variable y con paredes formadas por elementos discretos.

Las limitaciones y recomendaciones contenidas en los códigos extranjeros y publicaciones consultadas generan condicionantes para el comportamiento de la pasarela que involucran principalmente a) la rigidez del conjunto aportada por la combinación de las individuales de sus elementos componentes y por las conexiones entre los mismos, b) la masa de los elementos estructurales y de los componentes funcionales (solado de tablero, baranda) y c) la masa asociada reglamentariamente al tránsito peatonal esperado en la pasarela.

Estas limitaciones fueron determinantes para el logro del diseño final al que se arribó luego de ajustes iterativos realizado al mismo y conducentes a una solución técnico-económica factible.

4. Análisis

4.1. Método de análisis y descripción de los modelos

Para el análisis de la estructura se procedió a su modelización mediante modelos matemáticos basados en el Método de Elementos Finitos.

Los modelos desarrollados fueron, por un lado, modelos globales para analizar el comportamiento general de la estructura, y modelos parciales para analizar comportamientos individuales de elementos estructurales principales y de uniones entre los mismos. Para los modelos globales en general se usaron elementos finitos de viga (frame), mientras que para los parciales se emplearon además elementos de cáscara (shell). Los elementos frame y shell contienen en sus formulaciones las características necesarias para captar y describir adecuadamente el comportamiento de los elementos representados.

A continuación, se muestra uno de los mode-

los matemáticos desarrollados, que corresponde a un modelo global con elementos frame.

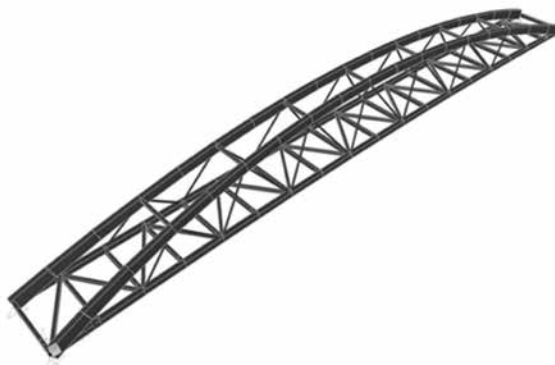


Fig. 5. Modelo de elementos finitos.

Para la definición geométrica del modelo se tomaron los planos de proyecto respectivos.

En la Figura 6 se muestra el plano resistente conformado por el arco superior, el tensor y el reticulado que los vincula. El arco y el tensor configuran el arco atirantado, el cual con el añadido del reticulado constituido exclusivamente por diagonales define la caracterización de bowstring predominante de la estructura.

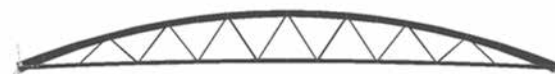


Fig. 6. Plano Resistente Bowstring

En puentes carreteros, las cargas predominantes son las gravitatorias y eventualmente las eólicas; si bien el efecto de estas últimas puede ser controlado por un diseño aerodinámico dado por la forma y disposición de los elementos estructurales y/o por el uso de elementos auxiliares como deflectores para evitar la formación de vórtices y de enmascaramientos sobre las superficies expuestas al viento para mejorar su perfil aerodinámico.

Sin embargo, para el caso de puentes peatonales cobran importancia preponderante las cargas antrópicas. Estas resultan definitorias y pueden llegar a gobernar el diseño estructural teniendo en cuenta parámetros de diseño no solamente dados por las convencionales limitaciones surgidas del comportamiento tensional-resistente y deformacional, sino también por el confort en la marcha de los viandantes y la

susceptibilidad a efectos vandálicos devenidos de resonancia intencional provocada con eventual peligro de colapso. Esto es particularmente aplicable para el caso de pasarelas metálicas livianas.

Los planos resistentes bowstring proveen una adecuada rigidez ante solicitaciones dinámicas del tipo de las derivadas de la marcha humana. Estas tienen una amplia variabilidad, son eminentemente aleatorias y con posibilidad de excitar una gran variedad de modos de vibración. Ante este tipo de efectos, la configuración bowstring puede proveer una respuesta adecuada, aunque no convencional aún para este tipo de estructuras; por ejemplo, se pueden presentar casos de carga críticos por efectos dinámicos que generen compresión en las diagonales. Efectivamente, esto se ha podido comprobar en el análisis del presente caso.

Por otra parte, en la Figura 7 se puede apreciar el tablero del puente. El mismo está conformado por los 2 tensores de los arcos (éstos no mostrados en la Figura 7), que constituyen a su vez las vigas longitudinales del tablero. Transversalmente se disponen vigas horizontales que estabilizan lateralmente a los tensores y sirven de apoyo a las losetas que constituyen el solado del tablero para tránsito peatonal. La rigidez en su plano del tablero, que aporta la mayor parte de la rigidez transversal del puente, se completa con las diagonales dispuestas en zig-zag que terminan de generar un reticulado horizontal ligeramente curvo.

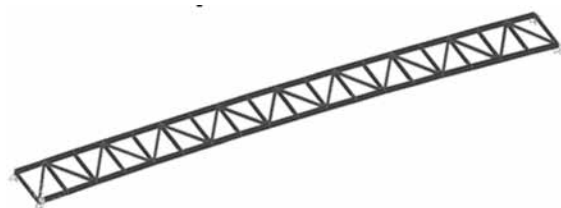


Fig. 7. Detalle de Modelo de elementos finitos de tablero

El solado del tablero no ha sido modelado por no cumplir una función estructural a nivel global de la estructura. Las losetas de hormigón pretensado que constituyen el solado han sido calculadas de manera preliminar a los fines de ser tenidas en cuenta como parte de las cargas gravitatorias por su peso propio, para la deter-

minación de cargas sobre vigas transversales como parte del sistema de transmisión de cargas de tránsito peatonal al tablero y, finalmente, como contribución a la masa del tablero para el análisis del comportamiento dinámico y vibracional del puente.

Los arcos a su vez se encuentran arriostrados entre sí mediante elementos transversales que les permiten al mismo tiempo generar un plano resistente transversal curvo, como lo muestra la Figura 8.



Fig. 8. Detalle de Modelo de elementos finitos de arcos y arriostramientos.

Los planos resistentes transversales dados por el tablero (Figura 7) y por los arcos arriostrados (Figura 8), conjuntamente con los planos resistentes dados por las vigas bowstring (Figura 6), definen un sistema estructural cuyo análisis debe comprobar que presenta un comportamiento en resistencia y rigidez adecuado ante las cargas y combinaciones reglamentarias y cuyos efectos han sido contextualizados en las consideraciones vertidas en el Capítulo 3.

4.2. Cargas

Los modelos fueron sometidos a las condiciones de carga y sus combinaciones reglamentarias. Las cargas sísmicas aplicadas al modelo se obtuvieron de un análisis dinámico modal espectral, según lo indicado en el apartado 14.1.6 b) del INPRES-CIRSOC 103 Parte I. La estructura fue solicitada con los espectros de aceleraciones recomendados por el reglamento INPRES-CIRSOC 103 Parte I para la zona de emplazamiento de la obra y para el tipo de suelo existente.

Este análisis permite obtener información de los esfuerzos debidos a los modos de vibración, y calcular los totales mediante la realización de una superposición modal.

En este caso se realizó la superposición modal por el método de la Combinación Cuadrática

Completa (CQC), que tiene en cuenta el posible acoplamiento modal.

5. Comportamiento dinámico

Las Figuras 9 a 16 muestran el comportamiento dinámico mediante las deformadas correspondientes a distintos modos propios de vibración para la estructura completa o partes de ella.

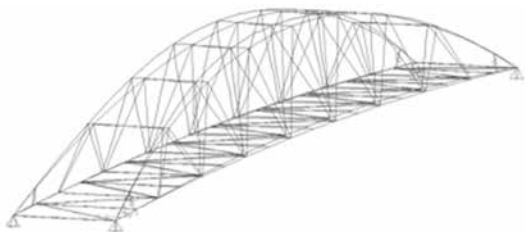


Fig. 9. *Modo Fundamental de Vibración (Modo 1) – Estructura Completa*

Para una mejor visualización del primer modo, en la Figura 10 se aprecia una vista de la sección transversal del puente.



Fig. 10. *Modo Fundamental de Vibración (Modo 1) – Vista transversal.*

Por su parte, la Figura 11 muestra el segundo modo propio de vibración (Modo 2). Para claridad de la visualización, solo se ha representado el conjunto arco-tensor.



Fig. 11 *Segundo Modo de Vibración (Modo 2) – Vista longitudinal Conjunto Arco-Tensor.*

Similarmente, para la visualización del tercer modo propio de vibración (Modo 3) en la Figura 12 sólo se muestra en planta el conjunto forma-

do por los dos arcos y sus arriostramientos.

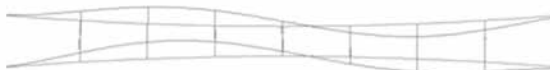


Fig. 12. *Tercer Modo de Vibración (Modo 3) – Vista planta. Conjunto Tensores-Vigas Transversales.*

De la misma manera, en la Figura 13 se halla representado el cuarto modo propio de vibración.



Fig. 13. *Cuarto Modo de Vibración (Modo 4) – Vista planta. Conjunto Tensores-Vigas Transversales.*

Por su parte, en las Figuras 14 y 15 se ha representado toda la estructura para mostrar el quinto modo y sexto modo de vibración (Modo 5 y Modo 6).

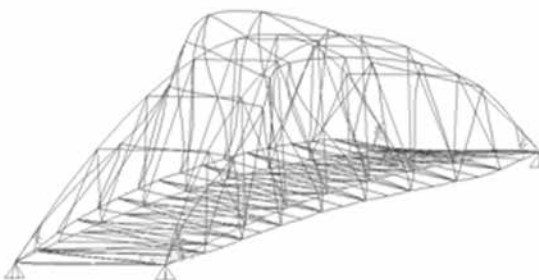


Fig. 14. *Quinto Modo de Vibración (Modo 5) – Perspectiva*

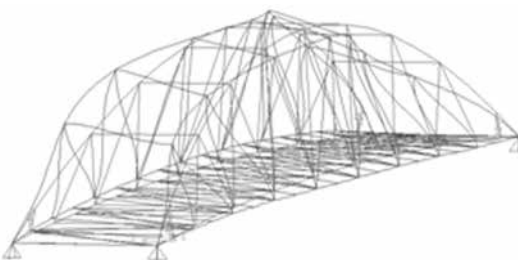


Fig. 15. *Sexto Modo de Vibración (Modo 6) – Perspectiva.*

A su vez, en la Figura 16 se ha representado el Séptimo Modo (Modo 7) mediante una vista lateral.



Fig. 16. *Séptimo Modo de Vibración (Modo 7) – Vista longitudinal*

En estructuras complejas y con sistemas resistentes con un grado apreciable de ortotropía del tipo del analizado, no se obtienen modos propios puros. Sin embargo, de un primer análisis de estas figuras descriptivas de los modos propios de vibración de la estructura, se encuentra que el modo fundamental de vibración (Modo 1) es preponderantemente Lateral (horizontal), mientras que el Modo 2 es preponderantemente Longitudinal (vertical). Los siguientes modos, Modo 3 y Modo 4 corresponden a modos superiores Laterales. Los Modos 5 y 6 se caracterizan por presentar rasgos preponderantemente Torsionales el Modo 5 y Torsional con participación Lateral el Modo 6.

Por su parte, el Modo 7 vuelve a ser preponderantemente Longitudinal-vertical, correspondiendo al segundo modo con estas características.

En la Tabla 2 se resume los resultados hasta el Modo 12, modo para el cual ya se captura más del 90% de la participación modal en las direcciones horizontal y vertical, tal como se hace notar al final de la Tabla.

Para las determinaciones dinámicas resumidas en la Tabla 2 se ha considerado parcialmente la masa de los peatones, siguiendo las especificaciones reglamentarias consultadas que forman parte de la documentación de referencia de este informe. En particular, para este estudio se ha adoptado una masa de peatones de 70 Kg/m² de acuerdo a las especificaciones de SETRA (Service d'Études Techniques de Routes et Autoroutes).

Tabla 2: Principales Propiedades Dinámicas del Puente

MODO	Período (seg.)	Frecuencia (Hz)	Descripción	Estado
1	0.62	1.60	Lateral	>1.2 VERIFICA
2	0.40	2.51	Vertical	>2.3 VERIFICA
3	0.34	2.91	Lateral	
4	0.32	3.17	Lateral	
5	0.22	4.53	Torsional	
6	0.21	4.80	Torsional-Lateral	
7	0.20	4.98	Vertical	>4.5 VERIFICA
8	0.16	6.44	Lateral	
9	0.14	7.40	Lateral	
10	0.13	7.63	Torsional	
11	0.12	8.40	Vertical	
12	0.10	9.53	Lateral	

Masa total desplazada	
Masa X	92.53 %
Masa Y	95.74 %

Los límites referenciados en la Columna de Estado en las filas destacadas en azul se refie-

ren a la aptitud del comportamiento dinámico registrado según especificaciones de Códigos de Referencia.

6. Conclusiones

-Se ha presentado el estudio y análisis de un puente peatonal cuya estructura resistente corresponde a tipología bowstring, consistente en arcos atirantados rebajados y reticulados mediante diagonales.

-Se han expuesto las normas y reglamentos aplicables y las referencias bibliográficas pertinentes a este tipo de estructuras, y las consiguientes condiciones de resistencia, rigidez y funcionamiento del puente peatonal proyectado.

-Los estudios desarrollados y los análisis realizados con el aporte de modelos matemáticos basados en el Método de los Elementos Finitos han mostrado el adecuado comportamiento general del puente proyectado.

-Las características dinámicas del puente resultan satisfactorias para garantizar la seguridad estructural y el confort en la marcha peatonal según las últimas especificaciones de códigos extranjeros aplicables a pasarelas metálicas urbanas.

Referencias

- Factores de Carga y Resistencia. Introducción al Método según el "Load and Resistance Factor Design" del American Institute of Steel Construction 1983 – Biblioteca de Apoyo CIRSOC. 1993.
- AISC – LRFD 2010 – American Institute of Steel Structures.
- HIVOSS (Human Induced Vibration of Steel Structures) – Design of Footbridges Guideline 2010. Comisión Europea.
- HIVOSS (Human Induced Vibration of Steel Structures) – Design of Footbridges Background 2010. Comisión Europea.
- Technical guide. Footbridges. Assesment of vibrational behavior of footbridges under pedestrian loading. Service d'Études Techniques des Routes et Autoroutes. 2006. France.
- Guideline for the design of footbridges. Fédération Internationale du Béton (fib), 2005
- AASHTO. LRFD Guide Specifications for the



Design of Pedestrian Bridges. 2009. USA.

