

# Comportamiento estructural y criterios de diseño de los puentes extradados: visión general y estado del arte

## Structural behavior and design criteria of extradosed bridges: general insight and state of the art

José Benjumea\*<sup>1</sup>, Gustavo Chio\*, Esperanza Maldonado\*

\* Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga. COLOMBIA

Fecha de recepción: 01/ 08/ 2010  
Fecha de aceptación: 01/ 10/ 2010  
PAG. 383 - 398

### Resumen

Durante los últimos 10 años, los puentes extradados se han convertido en una solución estructural atractiva alrededor del mundo, gracias a los buenos resultados obtenidos con las primeras realizaciones en Japón. Esta nueva tipología, reconocida generalmente como una solución intermedia entre los puentes atirantados y los de pretensado de viga cajón construidos por voladizos sucesivos, se ha convertido en una opción interesante. Por consiguiente, dado el interés que hoy en día existe alrededor de este tipo de puente, en este trabajo se presenta el contexto histórico que describe su origen, y se exponen la influencia de los principales elementos estructurales en el comportamiento del puente, y los criterios de diseño que han sido propuestos por investigadores en el tema. De esta manera, se espera ofrecer una visión general de la concepción y el comportamiento estructural de los puentes extradados para que sea considerada una alternativa más de tipología estructural de puentes en nuestro medio.

Palabras Clave: Puentes, puentes no convencionales, puentes extradados, comportamiento estructural de puentes, criterios de diseño de puentes.

### Abstract

Over the past 10 years, Extradosed bridges have become an attractive structural type around the world, due to the good results obtained with the first bridges constructed in Japan. This new typology, generally recognized as an intermediate solution between cable stayed bridges and cantilever constructed prestressed box-girder bridges, because these take advantages of design and constructions methods of the other two typologies, has become an interesting option. Therefore, given the interest that exist about this type of bridge, in this paper the historical context that describes its origin, the influence of the principal structural elements and the design criteria proposed by researchers are presented. In this way it is expected to offer a general insight into the design conception and structural behavior of Extradosed Bridges, so that they may be considered as an alternative structure for bridges in the Americas.

Keywords: Bridges, non-conventional bridges, extradosed bridges, extradosed bridges, structural behavior of bridges, design criteria.

## 1. Introducción

Uno de los aportes más significativos a la ingeniería de puentes, en el siglo XIX, ha sido la introducción del pretensado como solución a la necesidad de controlar los esfuerzos en los elementos de un puente. Inicialmente, esta técnica se utilizó por medio de tendones de pretensado interno y externo, hasta la aparición en 1925 de los puentes atirantados modernos con el Acueducto de Tempul, desarrollado y construido por Eduardo Torroja (Torroja, 1927). En 1988, Jacques Mathivat propone el concepto de cables extradados, que son tendones de pretensado externo situados por fuera y por encima del tablero, desviados en torres de poca altura (Mathivat, 1988).

<sup>1</sup> Autor de correspondencia / Corresponding author:  
E-mail: josemiguelbenjumea@gmail.com



Seis años más tarde se construye en Japón el primer puente con pretensado extradadosado: el Odawara Blueway (Ogawa et al., 1998a). A partir de ese momento, el uso de esta tipología ha ido en incremento, siendo especialmente notorio en los países asiáticos, en los cuales la actividad sísmica alta no ha sido impedimento para optar por estos puentes. Sin embargo, en algunos países la tipología parece ser desconocida, desaprovechando las bondades que este tipo estructural ofrece. En este trabajo se presenta una introducción a la tipología, resaltando los rasgos básicos que permiten definir su conducta estructural, y los criterios de proyecto establecidos en la literatura.

## 2. Contexto histórico

En la actualidad se distinguen dos corrientes que otorgan a distintos ingenieros el origen de los puentes con pretensado extradadosado. La primera atribuye el honor de la creación del concepto a Cristhian Menn, pues en 1980, propone para el Puente de Ganter en Suiza (Figura 1) salvar un valle de hasta 140 metros de altura con una superestructura conformada por una viga cajón atirantada por cables embebidos en muros de concreto y pilares suficientemente rígidos para resistir los fuertes vientos de la zona (Virlogeux, 2002 y Mermigas, 2008). La configuración adaptada para los cables acarrea innovación técnica para la fecha, sin embargo, la estructura ha sido más admirada en la comunidad ingenieril por su apariencia y encaje en el paisaje (Virlogeux, 1999).

En la segunda corriente, otros autores (Ogawa et al., 1998a; Chio, 2000; Hino, 2005; Kasuga, 2006; Ishii, 2006) atribuyen el concepto y la denominación de esta tipología a Mathivat, quien propone como solución de concurso del viaducto Arrêt Darré en Francia, un puente en donde se sustituían los tendones internos en el ala superior de la viga, por cables externos dispuestos en una torre de poca altura sobre las secciones de apoyo en pila y por la parte superior del tablero (Figura 2). La solución presentada por Mathivat, que fue rechazada, suponía un ahorro de 30% en materiales respecto de una solución de viga cajón y además permitía el uso efectivo de los cables, al ser tesados al mismo nivel que los tendones de preesforzado convencional (Mermigas, 2008).

De acuerdo a Virlogeux (1999) una parte del concepto propuesto por Mathivat, estaba basada en la “distorsión de las especificaciones de los códigos” en pro de un uso más eficiente de los tendones, puesto que las restricciones para la variación de los esfuerzos producidos por la carga de tráfico son mucho más rigurosas para los cables de los puentes atirantados que para los tendones de preesforzado.

Sin embargo, la controversia relativa al origen de los puentes extradosados ha sido resuelta, pues de acuerdo a Mermigas (2008), poco influyó que Menn conociera las ideas de Mathivat para los puentes extradosados, ya que cada ingeniero reflejó en sus propuestas, las tendencias y visiones de sus respectivos países de orígenes.



Figura 1. Puente de Ganter en Suiza, 1980 (Janberg, 2009)  
Figure 1. Ganter Bridge in Switzerland, 1980 (Janberg, 2009)

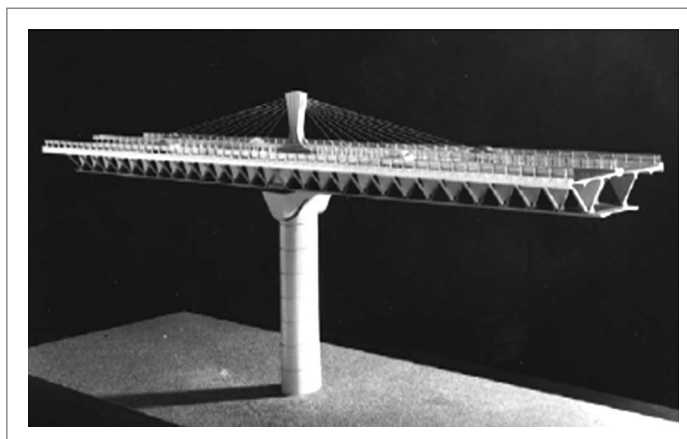


Figura 2. Propuesta para el viaducto Arrêt Darré (Virlogeux, 1999)  
Figure 2. Proposed Viaduct for Arrêt Darré (Virlogeux, 1999)

El Puente de Ganter, sirvió de inspiración para la realización de otros puentes similares, como el de Barton Creek (Estados Unidos, 1987 (Gee, 1991)) y el de Papagayo (México, 1991 (Fernandez, 1999)) considerados una tipología de puente con aleta trasera (Fin Back Bridge), y el de Socorridos (Portugal, 1993 (Reis & Pereira, 1994)) identificado como puente con panel de cables (Cable Panel Bridge). Algunas desventajas como el impedimento de reemplazar los tirantes, y los costos adicionales de erección de los muros de concreto, no han permitido que estas tipologías sean ampliamente utilizadas. Por otra parte, la propuesta de Mathivat inspiró a los japoneses, quienes en 1994 construyen el Puente Odawara Blueway (Figura 4), considerado por algunos como (Chio, 2000; Kasuga, 2002; Ishii, 2006; Dos Santos, 2006) el primer puente extradosado en el mundo. Se recomienda al lector interesado en este puente, revisar las referencias Ogawa et al., 1998a, Kasuga, 2002 y Kasuga, 2006.



Figura 3. Puente de Socorridos en Portugal, 1993 (GRID Ltda, n.d.)  
Figure 3. Socorridos Bridge in Portugal, 1993 (GRID Ltda., n.d)



Figura 4. Puente Odawara Blueway en Japón, 1994 (Kasuga, 2006)  
Figure 4. Odawara Bridge in Japan, 1994 (Kasuga, 2006)

### 3. Concepto del puente extradosado

Los puentes de hormigón con pretensado extradosado han surgido como una nueva tipología de puentes para luces medias. Mediante la utilización del hormigón y la tecnología del pretensado, se busca, en unión con los tendones de acero como tirantes, plantear una solución marcadamente favorable hacia estas estructuras. En los puentes extradosados, los tendones de pretensado se disponen exteriormente al canto de la sección y por la parte superior del tablero, siendo anclados en torres de poca altura, o desviados en estas por medio de sillars de anclaje ubicadas en la cima de los pilonos (Chio y Aparicio, 2002). A partir de su configuración morfológica, los puentes extradosados son reconocidos como puentes intermedios entre los puentes atirantados y los de pretensado de viga cajón, ver Figura 5. Esta aseveración se afirma también desde el punto de vista de la cantidad de materiales requeridos, tal como se observa en la Figura 6, donde Mermigas (2008) comparó el espesor promedio de concreto (volumen de concreto de la viga/área del tablero), y por otra parte Kasuga (2002) comparó la cuantía de tendones requeridos, para puentes atirantados, extradosados y puentes de viga cajón pretensados construidos por voladizos sucesivos, encontrando en ambos gráficos que el consumo de los materiales principales de los puentes extradosados, recae en una zona intermedia entre las otras dos tipologías.

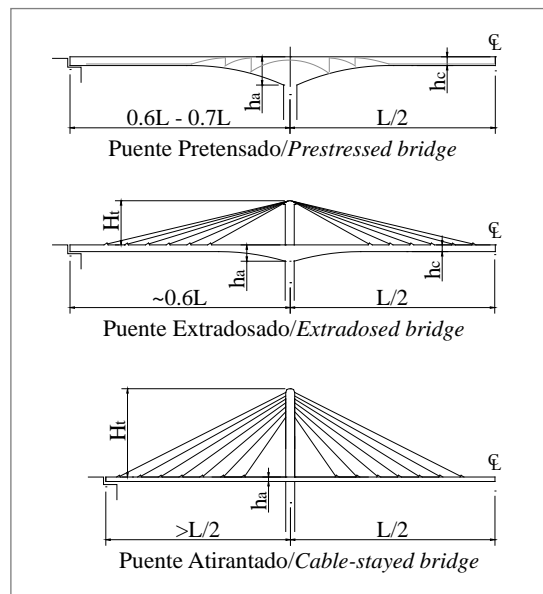


Figura 5. Comparación entre puentes pretensados, extradosados y atirantados  
Figure 5. Comparison among prestressed bridges, extradosed bridges and cable-stayed bridges

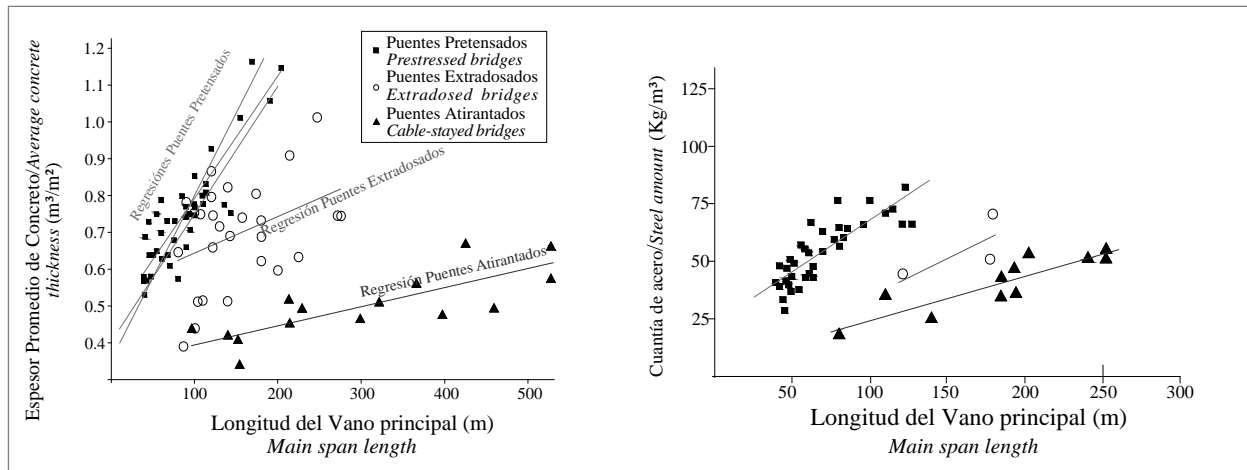


Figura 6. Comparación del consumo de materiales para puentes pretensados construidos por voladizos sucesivos, extradosados y atirantados: Izquierda) Espesor promedio de concreto (Modificado de Mermigas, 2008) . Derecha) Cuantía volumétrica de acero (Modificado de Kasuga, 2002)

Figure 6. Comparison of consumption material for prestressed consecutive cantilever, extradosed and cable-stayed bridges. Left: average concrete thickness (Modified from Mermigas, 2008). Right: Volumetric steel amount (MModified from Kasuga, 2002)

#### 4. Comportamiento estructural

Debido a que los puentes extradosados concurren en una zona intermedia entre los puentes pretensados y los atirantados, su comportamiento estructural puede asimilarse a una de estas tipologías, dependiendo de los criterios de diseño que hayan sido adoptados en la fase de proyecto. En general, un puente extradosado de tablero rígido tendrá un comportamiento similar al de un puente pretensado, logrando así evitar las altas oscilaciones de tensión en los tirantes y por consiguiente los problemas de fatiga asociados a los anclajes y tendones que se tendrían en un puente extradosado de tablero esbelto, cuyo comportamiento es más similar al de un puente atirantado. Su construcción requiere del conocimiento de las tecnologías actualmente aplicadas a la construcción de puentes de hormigón pretensado de tramo recto y a los puentes atirantados, que es realizada generalmente por medio del método de voladizos sucesivos pero con la ayuda de tirantes, que no son provisionales, sino definitivos.

En los puentes con pretensado extradosado, el pretensado es mixto, una parte es interno (dentro del canto) y el otro es extradosado. Cada uno de ellos tendrá características propias que las hacen diferenciable en su disposición como en su comportamiento dentro del puente.

Para los puentes extradados cuyo comportamiento es más similar al de un puente de vigas pretensadas, las cargas permanentes son transportadas hasta la cimentación mediante la acción combinada de un mecanismo de cortante – flexión ejercido por el tablero y por la tracción ejercida por los tirantes. En el otro caso, la carga se transmite por medio de un par de fuerza axial entre los tirantes y el tablero, similar a los puentes atirantados.

#### 4.1 Influencia del canto del tablero y altura de la torre

De acuerdo a Chio (2000), para un tablero de canto constante, a medida que este se hace más esbelto, la deformada del tablero será más sensible a la carga viva, y tanto las oscilaciones de tensión en los tirantes debido a la carga viva ( $\Delta\sigma_L$ ) como los esfuerzos longitudinales en las fibras superior e inferior en el tablero aumentan. Si la altura de la torre disminuye, el trabajo realizado por el tablero aumenta, lo que genera un incremento en sus esfuerzos debido a la sobrecarga. En cuanto a la oscilación de tensión en los tirantes, estas aumentan con el incremento en la altura de la torre, siendo mayor su impacto que el producido por la modificación en el canto del tablero.

La interacción entre el tablero y la torre para puentes sostenidos con tirantes se puede explicar extrapolando los resultados obtenidos por Ruiz-Terán (2005) y Ruiz-Terán & Aparicio (2007) en puentes con atirantamiento inferior: en puentes de tirantes como el puente extradado, la eficacia del sistema de atirantamiento depende de la rigidez relativa del tablero con respecto a la del sistema de atirantamiento. A medida que la relación entre rigideces disminuye, debido a una disminución en el canto del tablero o un aumento en la altura de la torre, la eficacia del sistema de atirantamiento aumenta, y por lo tanto la participación de los tirantes en la movilización de las cargas también, haciéndolos más sensibles ante las sobrecargas.

#### 4.2 Influencia de la unión tablero-pilar

Cuando el tablero se encuentra apoyado sobre los pilares, ver Figura 7, la acción de la sobrecarga en el vano principal produce deflexiones, hacia abajo en este vano y hacia arriba en los vanos laterales. Sin embargo, si el tablero se fija al pilar, ver Figura 8, el puente cambia a un esquema tipo pórtico donde la rigidez aportada por el pilar restringe una parte de las rotaciones de los elementos, que se refleja en una disminución de las deflexiones y momentos en los vanos laterales y central, presentando, a su vez, reducción de la variación de tensión en los tirantes.

Debido a la mayor esbeltez del tablero, el efecto de la carga viva en el momento flector en un puente extradadosado es mayor en comparación que en un puente de viga cajón pretensado, por lo tanto, es claro que la reducción de las acciones sobre los elementos por medio de la modificación de la vinculación entre el tablero y el pilar, resulta en beneficios para los elementos estructurales. Sin embargo, en el caso de solicitaciones sísmicas, la fijación del tablero y la pila puede resultar en un aumento en las fuerzas sobre estas, afectando de manera significativa el diseño y los costes de la subestructura. De acuerdo a Otsuka et al. (2002), las fuerzas en los pilares para un puente atirantado de igual longitud en el vano principal que un puente extradadosado, son menores (20%-30% en cortante y 50%-60% en momento flector) debido al efecto de amortiguamiento de la estructura suspendida, lo que no sucede en puentes extradadosados y viga cajón con conexiones rígidas entre el tablero y los pilares. En el puente de Shin-Karato en Kobe, Japón, se emplearon pilares separados de la superestructura por medio de apoyos de caucho, para reducir las solicitaciones dinámicas en estos (Tomita et al., 1999).



Figura 7. Puente Shin-Karato, Japón, 1998 (Tomita et al., 1999)  
Figure 7. Shin-Karato Bridge, Japan, 1998 (Tomita et al., 1999)

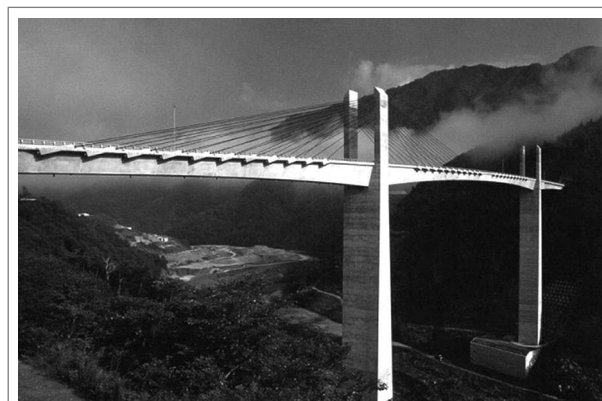


Figura 8. Puente Tokunoyama en Japón, 2006 (JSCE, n.d.)  
Figure 8. Tokunoyama bridge, Japan, 2006 (JSCE, n.d.)



#### 4.3 Influencia de las cartelas en el tablero

A diferencia de los puentes atirantados, en los extradosados los tirantes situados más próximos a las torres son ineficaces frente a la compensación de las cargas permanentes. Por lo tanto, debido a que generalmente la construcción de estos puentes se hace por el método de voladizos sucesivos, en el arranque es conveniente el uso de un tablero con canto variable.

Según Chio (2000), para un puente extradosado con luz principal ( $L$ ) y acartelamiento tipo parabólico, ver Figura 9, al aumentar la relación entre la altura del tablero en la sección de apoyo en pila ( $h_a$ ) y la altura del tablero en el vano central ( $h_c$ ), el primer tirante puede ubicarse más lejos de la torre ( $L_b$ ), y las variaciones de tensión en estos disminuyen. La modificación de la longitud de la cartela ( $L_a$ ) no es tan influyente en la variación de la tensión en los tirantes. En cuanto al tablero, un aumento de las relaciones  $\frac{h_a}{h_c}$  y  $\frac{L_a}{L}$ , genera menores flechas, y aunque ocurre un leve aumento en los esfuerzos sobre la sección de apoyo en pila, a nivel tensional, se produce una disminución de estas en el tablero.

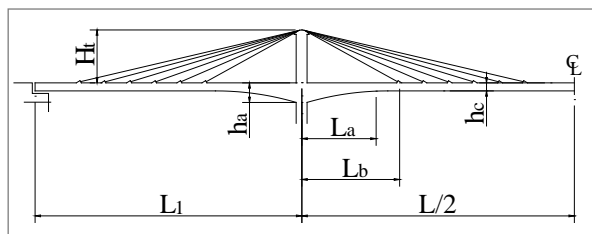


Figura 9. Nomenclatura de las dimensiones del acartelamiento del tablero

Figure 9. Dimension nomenclature for deck corbelling

#### 4.4 Influencia de la longitud del vano lateral

Kasuga (2006) sostiene que debido a la similitud de la conducta estructural de los puentes extradosados con los de viga cajón pretensados, la longitud de los vanos laterales debe elegirse de manera proporcional a estos, generalmente entre 0.6 y 0.8 de la longitud del vano principal. Sin embargo, Chio (2000) aclama que para un puente extradosado con canto constante del tablero, el uso de relaciones  $\frac{L_1}{L}$  mayores a 0.60, produce fuertes incrementos en las deflexiones, esfuerzos y tensiones en el tablero, en comparación a un puente con vanos laterales más cortos. De acuerdo a Chio (2000), la variación de la longitud del vano lateral ( $L_1$ ) tiene efectos significativos en los momentos flectores del tablero en el vano lateral, los cuales disminuyen a medida que decrece la relación  $\frac{L_1}{L}$ . En el vano central y en los tirantes,

la disminución de la longitud del vano lateral produce menores deflexiones y momentos flectores, y mayores oscilaciones de tensión respectivamente, aunque en ambos casos los cambios no son significativos. Sin embargo, el uso de vanos laterales cortos  $\frac{L_1}{L}$  menores a 0.4) y, por lo tanto, de cables actuando como tirantes de retención similares a los de los puentes atirantados, genera reacciones de levantamiento en los apoyos laterales que requerirán de soluciones tecnológicas para paliar el problema.

## 5. Diseño

Un puente extradadosado puede diseñarse desde dos enfoques, debido a la libertad con que se cuenta para elegir la distribución de rigidez entre los cables y el tablero para soportar la carga viva. En el primer enfoque, se usa una distribución de rigideces apropiada entre el tablero, los cables y la subestructura, de modo tal que la variación de tensión en los cables debido a la carga viva, no sobrepase los límites establecidos por las especificaciones (ver numeral 5.1.4) y estos puedan ser tesados al máximo. En general, un tablero rígido acompañado de vinculación fija entre la torre, el tablero y los pilares, tal y como se usó en los primeros puentes extradadosados, corresponde al primer enfoque.

El segundo enfoque de diseño, que consiste en puentes con torres rígidas y tableros esbeltos, se atribuye a Menn, quien en 1987 presentó sus ideas acerca de las ventajas que acarrea el uso de torres rígidas en los puentes atirantados (Menn, 1987, citado en Mermigas, 2008, p.8). Menn trasladó sus ideas a los puentes extradadosados con la concepción de los puentes Sunniberg (Suiza, 1998; Drinkwater, 2007), y la propuesta para el Puente de Poya (Suiza, 1989) que no fue aceptada por el jurado (Menn, 1991). Bajo este enfoque, el tablero se diseña lo más esbelto posible de modo tal que la carga viva sea transmitida directamente a los pilares, como un par de fuerzas axiales en los cables y la viga, similar a los puentes atirantados (Mermigas, 2008). Este diseño produce valores altos de oscilación de tensión en los tirantes, debido a carga viva, y por lo tanto estos elementos se deben tensar a un nivel inferior que el del primer enfoque, haciendo un uso poco eficiente de estos elementos.

De acuerdo a Mermigas (2008), en general, el enfoque del puente extradadosado con tablero rígido no ofrece ninguna ventaja significativa sobre el enfoque con torre rígida, distinta de su capacidad para abarcar múltiples pilares sobre apoyos simples.



Pocas investigaciones han sido desarrolladas para definir criterios de proyecto para puentes extradadosados, sobre todo de los puentes extradadosados cuyo comportamiento estructural es más similar al de los atirantados, de aquí la necesidad de profundizar en el tema. Sin embargo, a continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas por algunos estudios del tema. En cuanto a estos, debe ser claro que los criterios de proyecto presentados por los investigadores se basan en condiciones particulares de cargas y tensiones admisibles límites distintas para cada estudio, o en el caso de los ingenieros reconocidos, en la experiencia obtenida por los proyectos desarrollados. Por lo tanto, estos criterios no deben ser tomados como una camisa de fuerza a la hora de proyectar un puente extradadosado, lo cual limitaría la posibilidad del ingeniero para explorar diversas configuraciones y materiales.

## 5.1 Criterios de diseño

### 5.1.1 Canto del tablero y altura de la torre

En el artículo publicado en 1988, Mathivat propone un tablero con canto constante, de esbeltez  $L/h$  entre 30 y 35, y una altura de la torre de modo que  $L/H_t$  sea igual a 15. Komiya (1999 citado en Mermigas, 2008, p. 54), sugiere para tableros empotrados en la pila, un canto con esbelteces de 35 en la sección de apoyo en pila y 55 en el centro del vano principal, y alturas de torre variando entre  $L/12$  y  $L/8$ . Chio (2000) propone como criterio de proyecto un canto en la sección de apoyo en pila de  $L/30$  y en el centro de luz de  $L/45$ , esto es,  $h_a/h_c$  igual a 1.5. Recomienda además, una altura de la torre igual a  $L/10$ , de modo que las oscilaciones de tensión en los tirantes debido a la sobrecarga estén acotadas por el valor de 80 MPa. Dos Santos (2006) propone una altura de tablero constante de  $L/33$  y una altura de la torre de  $L/10$ , sin embargo, debido a que este último no tuvo en cuenta los efectos de fluencia en el concreto y relajación en el acero, la sugerencia es de limitada aplicación.

### 5.1.2 Longitud soportada por cables

Debido a que los tirantes más próximos a la torre son ineficaces, para una disposición de los tirantes en forma de abanico, Chio (2000) recomienda que el primer tirante esté anclado entre 0.18 y 0.25 de la luz principal. Este valor difiere del valor sugerido por Mathivat, según el cual el primer tirante debe estar a 0.1 de la luz principal.

De acuerdo a Komiya (1999 citado en Mermigas, 2008, p. 59) el costo combinado de los cables extradados y tendones internos, para los primeros tirantes anclados a 0.14, 0.20, y 0.24 de la luz principal, está dentro del 2% de diferencia entre cada uno, siendo el arreglo más económico el que corresponde a un primer tirante anclado a 0.20 de la luz principal.

### 5.1.3 Longitud del Vano lateral

Para puentes extradados con tablero rígido, Chio (2000) recomienda longitudes de los vanos laterales menores que el 60% de la longitud del vano principal, pero mayores al 40%. Dos Santos (2006) sugiere longitudes entre 60% y 65 % del vano principal. Soportado en la similitud del comportamiento de puentes extradados y los de vigas cajón pretensadas construidos por voladizos sucesivos, Kasuga sugiere una longitud del vano lateral entre el 60% y 80% de la luz principal. Las sugerencias previas no son de gran aplicabilidad a los puentes extradados que son mas similares a los atirantados: Mermigas (2008) encontró que para un puente extradado de tablero esbelto y luz principal de 140 m, no es posible el uso de vanos laterales de longitud mayor al 50% de la longitud del vano principal, debido a que los momentos son muy significativos, y exceden la capacidad del tablero.

### 5.1.4 Esfuerzo admisible en los cables en Estado Limite de Servicio (ELS)

En su propuesta, Mathivat (1998) empleó un esfuerzo admisible en los tirantes de  $0.6 f_{pu}$ , criterio adoptado en los primeros puentes extradados construidos (Kasuga, 2002; Ogawa et al., 1998b; Tomita et al., 1999), ya que su vinculación rígida entre el tablero y los pilares, sumado a luces principales entre 90 y 180 metros, producían valores bajos de variación de tensión en los tirantes debido a la carga viva. Sin embargo, la aparición de puentes con luces más grandes vencidas por tableros esbeltos, provocaban grandes variaciones de tensión debido a la carga viva, por lo cual el esfuerzo admisible en los tirantes se redujo, utilizando en algunos casos valores menores al límite de  $0.45 f_{pu}$ , normalmente empleado en los puentes atirantados, como en el Puente de Kanisawa (Japón, 1998 (Kikuchi & Tabata, 1998)) en donde se empleó un esfuerzo máximo de  $0.40 f_{pu}$ .

Este inconveniente permitió observar que no existía una distinción clara entre el esfuerzo admisible a adoptar en puentes atirantados y puentes extradados, lo que podría colocar del lado de la inseguridad algunos puentes extradados si se regulara el valor de  $0.6 f_{pu}$ .

Ogawa y Kasuga (1998, citado por Kasuga, 2002, p.10) definieron el índice  $\beta$ , que expresa la distribución de carga entre los tendones y el tablero, debido a una carga vertical uniforme aplicada en el vano principal. Para algunos puentes extradosados y atirantados construidos en Japón, Kasuga (2006) graficó la variación de esfuerzos en los tirantes debido a carga viva ( $\Delta\sigma_L$ ) versus el índice  $\beta$ , mostrando que el máximo esfuerzo permisible en los tirantes no debía ser determinado a partir del tipo de estructura, si no que dependía de la fatiga en los cables debido a la variación de tensión por carga viva ( $\Delta\sigma_L$ ), ver Figura 10.

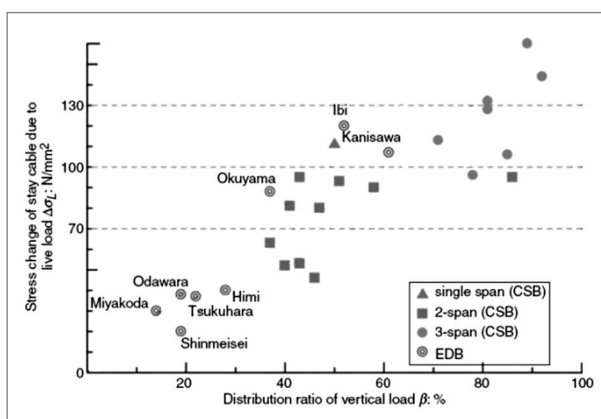


Figura 10. Parámetro  $\Delta\sigma_L$  contra  $\beta$  para puentes extradosados (EDB) y atirantados (CSB). (Modificado de Kasuga, 2006)  
 Figure 10. ( $\Delta\sigma_L$ ) Parameter against  $\beta$  index for extradosed bridges (EDB) and cable-stayed bridges (CSB). (Modified from Kasuga, 2006)

Para tener en cuenta el efecto de la variación de tensión por carga viva en la elección del esfuerzo permisible en los tirantes, distintas especificaciones han sido propuestas, ver Figura 11. En Japón, The Japan Prestressed Concrete Engineering Association's Specifications propone un esfuerzo admisible que varía entre  $0.40f_{pu}$  y  $0.6f_{pu}$  para variaciones de tensión debido a carga viva entre 70 y 100 MPa cuando el sistema de tirantes está conformado por cuerdas, y entre 100 y 130 MPa cuando se usan alambres prefabricados (Kasuga, 2006). En las recomendaciones del Service d'études sur les transports les routes es leurs aménagements (SETRA, 2001) el esfuerzo admisible ( $f_a$ ) en los tirantes se calcula a partir de la función compuesta:

$$f_a = \begin{cases} 0.6f_{pu} & , \text{ si } \Delta\sigma_L < 50 \text{ MPa} \\ 0.46 \left( \frac{\Delta\sigma_L}{140} \right)^{-0.25} & , \text{ si } 50 \leq \Delta\sigma_L \leq 140 \text{ MPa} \\ 0.46f_{pu} & , \text{ si } \Delta\sigma_L > 140 \text{ MPa} \end{cases} \quad (1)$$

De acuerdo a Dos Santos (2006) es favorable adoptar una variación de tensión máxima en los tirantes de 50 MPa para puentes extradados, ya que los efectos de la vibración y de las tensiones de flexión en la región de anclaje de los cables en el extradós del tablero, pueden ser ignorados por el factor de seguridad implícito.

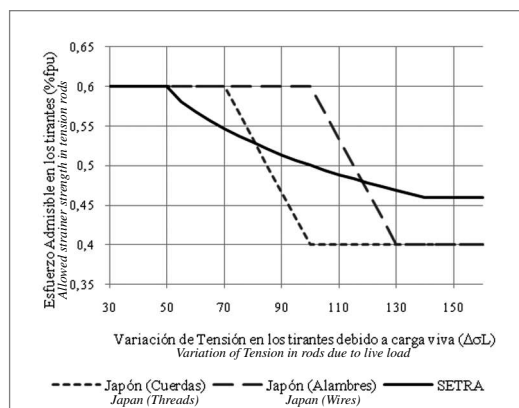


Figura 11. Esfuerzo admisible máximo en los tendones extradados como función de  $\Delta\sigma_L$   
 Figure 11. Maximum allowable stress in extradosed tension rods in function of  $\Delta\sigma_L$

## 6. Conclusión

El concepto de puentes extradados nace en 1988 con la propuesta del ingeniero francés Jacques Mathivat. Sin embargo, la idea no tuvo acogida total en el continente de origen y fue seis años más tarde cuando se construye el primer puente extradado en Japón. Desde entonces, gracias a que distintos ingenieros de puentes reconocidos a nivel mundial, entre los que se destacan Akio Kasuga y el prestigioso profesor Christian Menn, optaron por esta tipología y obtuvieron buenos resultados, los puentes extradados se han convertido en una solución estructural competitiva con los de pretensado de viga cajón y los atirantados, para luces principales entre los 100 y 200 m.

El comportamiento estructural de estos puentes, depende de la interacción entre cada uno de los elementos estructurales que lo componen, por lo tanto, debido a que comparten similitudes morfológicas y constructivas con los atirantados y los de pretensado de viga cajón, se puede por medio de la modificación de los elementos estructurales, lograr comportamientos similares a las dos tipologías. Esto ha llevado al desarrollo de dos enfoques para el diseño de los puentes extradados.

En el primero, mediante una distribución apropiada de rigideces entre el tablero, los cables y la subestructura, se busca que la variación de tensión en los cables debido a la carga viva sea baja. En el segundo enfoque, desarrollado por Menn, se busca un comportamiento similar al de los puentes atirantados, empleando tableros esbeltos y torres rígidas, que aumentan la eficacia del atirantamiento frente a la sobrecarga, a costa de altas variaciones de tensión en los cables debido a la carga viva.

Pocas investigaciones han sido desarrolladas para definir criterios de proyecto para los puentes extradados, de modo tal que las bondades que ofrece esta tipología salgan a luz y permitan a los ingenieros proyectistas adoptarla dentro de su abanico de posibilidades. Sin embargo, existen en la literatura algunas propuestas de diseño para este tipo de puentes, que pueden ser utilizadas para un primer predimensionamiento del puente extradado a proyectar.

## 7. Agradecimientos

Este trabajo forma parte de los resultados del proyecto de investigación titulado Aplicación de puentes de hormigón con pretensado extradado en Colombia, el cual es financiado por la Universidad Industrial de Santander, UIS, y por el Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas, COLCIENCIAS.

---

## 8. Referencias / References

- Chio G. (2000), Comportamiento Estructural y Criterios de Diseño de los Puentes con Pretensado Extradado. Tesis Doctoral. Barcelona: Universidad Politécnica de Cataluña.
- Chio G. y Aparicio A. (2002), El puente con pretensado extradado, un nuevo tipo estructural. *UIS Ingenierías*, 1(1), 67-73.
- Dos Santos D. (2006), Comportamento Estrutural de Pontes com Pretensão no Extradado. Tesis de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- Drinkwater L. (2007), Analysis of the Sunniberg Bridge. [internet] Department of Architecture, University of Bath. Available at: [http://www.bath.ac.uk/ace/uploads/StudentProjects/Bridgeconference2007/conference/mainpage/Drinkwater\\_Sunniberg.pdf](http://www.bath.ac.uk/ace/uploads/StudentProjects/Bridgeconference2007/conference/mainpage/Drinkwater_Sunniberg.pdf). [Fecha de Acceso: 15 de Octubre de 2009].
- Fernández L. (1999), Tierra sobre el agua, visión histórica universal de los puentes. 1a Ed. Madrid: Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.
- Gee A. (1991), Concrete Fin-back Bridge in USA. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 90(1), 91-122.
- Grid (2010), Grid Ltda. (n.d.), Socorridos Bridge. [Photograph] Available at: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=15736>. [Fecha de Acceso: 14 de Abril de 2010].
- Hino S. (2005), The Great Himiyume Bridge, Highway entrance to Nagasaki: The world first extradosed bridge using corrugated steel plate webs. *Civil Engineering, JSCE*, 42.
- Ishii, M. (2006), Sistemas Estruturais de Pontes Extradado. Tesis de Mestrado. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

- Janberg N. (2009), Ganter Bridge. [Photograph] Available at: <http://en.structurae.de/photos/index.cfm?JS=153412>. [Fecha de Acceso: 14 de Abril de 2010].
- JSCE (2009), Japanese Society of Civil Engineers. (n.d.), Tokunoyamahattoku Bridge. [Photograph] Available at: [http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Tokunoyamahattoku\\_Bridge](http://www.highestbridges.com/wiki/index.php?title=Tokunoyamahattoku_Bridge). [Fecha de Acceso: 20 Febrero de 2009].
- Kasuga A. (2002), Construction of Extradosed Bridges in Japan, In: Japan International Cooperation Agency & The Road Engineering of Malaysia, Seminar on Design and Construction of Prestressed Concrete Cable-Stayed Bridges. Kuala Lumpur, Malaysia.
- Kasuga A. (2006), Extradosed Bridges in Japan. *Structural Concrete*, 7(3), 91-103.
- Kikuchi M. & Tabata T. (1998), Extradosed Prestressed Concrete Bridge – Kanizawa Bridge. In: FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte), Prestressed Concrete in Japan, Proceedings of XIII FIP Congress - National Report . Amsterdam, Holland, 147-150.
- Mathivat J. (1988), Recent developments in prestressed concrete bridges. *FIP Notes*, 2, 15-2.
- Menn C. (1991), An approach to bridge design. *Engineering Structures*, 13(2), 106-112.
- Mermigas K. (2008), Behaviour and Design of Extradosed Bridges. MSc Thesis. Toronto: University of Toronto.
- Ogawa A., Kasuga A. & Okamoto H. (1998a), Prestressed Concrete Extradosed Bridge – Odawara Blueway Bridge. In: FIP (Fédération Internationale de la Précontrainte), Prestressed Concrete in Japan, Proceedings of XIII FIP Congress - National Report . Amsterdam, Holland, 47-50.
- Ogawa A., Matsuda T. & Kasuga A. (1998b), The Tsukuhara Extradosed Bridge near Kobe, *Structural Engineering International*, 8(3), 172-173.
- Otsuka H., Wakasa T., Ogata J., Yabuki W. & Takemura D. (2002), Comparison of structural characteristics for different types of cable-supported prestressed concrete bridges. *Structural Concrete*, 3(1), 3-21.
- Reis A. y Pereira A. (1994), Soccoridos Bridge: A Cable-Panel Stayed Concept. In: International Conference A.I.P.C.-F.I.P.: Ponts suspendus et à haubans: cable-stayed and suspension bridges. Deauville, France, 343-350.
- Ruiz-Terán A. (2005), Puentes Atirantados no Convencionales, Comportamiento estructural y Criterios de Diseño. Tesis Doctoral. Santander: Universidad de Cantabria.
- Ruiz-Terán A. y Aparicio A. (2007), Parameters governing the response of under-deck cable-stayed bridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34(8), 1016-1024.
- SETRA. (2001), Haubans - Recommendations de la commission interministérielle de la précontrainte. Service d'études techniques des routes et autoroutes. 2001.
- Tomita M., Tei K. y Takashi S. (1999), Shin-Karato Bridge in Kobe. *Structural Engineering International*, 9(2), 109-110.
- Torroja E. (1927), Acueducto-sifón sobre el río Guadalete. *Revista de Obras Públicas*, 2477, 193-195.
- Virlogeux M. (1999), Recent evolution of cable-stayed bridges. *Engineering Structures*, 21(8), 737-755.
- Virlogeux M. (2002), New Trends in Prestressed Concrete Bridges. *Structural Concrete*, 3(2), 67-97.