

Disponible en [www.hormigonyacero.com](http://www.hormigonyacero.com)  
Hormigón y Acero, 2025  
<https://doi.org/10.33586/hya.2025.4011>

## ARTÍCULO EN AVANCE ON LINE

### **Funicularidad de arcos mediante postensado externo**

Rodrigo Martín-Sáiz

DOI: <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4011>

Para ser publicado en: *Hormigón y Acero*

Por favor, el presente artículo debe ser citado así:

Martín-Sáiz, R. (2025) Funicularidad de arcos mediante postensado externo  
, *Hormigón y acero*, <https://doi.org/10.33586/hya.2025.4011>

Este es un archivo PDF de un artículo que ha sido objeto de mejoras propuestas por dos revisores después de la aceptación, como la adición de esta página de portada y metadatos, y el formato para su legibilidad, pero todavía no es la versión definitiva del artículo. Esta versión será sometida a un trabajo editorial adicional, y una revisión más antes de ser publicado en su formato final, pero presentamos esta versión para adelantar su disponibilidad.

En el proceso editorial y de producción posterior pueden producirse pequeñas modificaciones en su contenido.

© 2025 Publicado por CINTER Divulgación Técnica para la Asociación Española de Ingeniería Estructural, ACHE

# Funicularidad de arcos mediante postensado externo

## *Funicularity of arches by means post-tensioning*

Rodrigo Martín-Sáiz

*Dr. Arquitecto, Profesor Lector, Departamento de Tecnología de la Arquitectura.*

*Universidad Politécnica de Catalunya. Orcid: 0000-0002-5232-3886.*

[rodrigo.martin@upc.edu](mailto:rodrigo.martin@upc.edu)

\*Autor de correspondencia: Av. Diagonal 649, 08028 Barcelona;

[rodrigo.martin@upc.edu](mailto:rodrigo.martin@upc.edu)

**Resumen:** Este artículo presenta un procedimiento para convertir cualquier forma de arco en funicular mediante postensado externo. El postensado externo introduce fuerzas sobre el arco. Estas fuerzas se suman a las cargas gravitatorias para que la forma del polígono funicular resultante sea, precisamente, la forma del arco. Además, se consigue una compresión uniforme en todos los tramos del arco y reacciones horizontales nulas en los extremos. Se ha utilizado la estática gráfica para definir las fuerzas y el trazado de los cables de postensado. También se definen los límites geométricos y las reglas de relacionan entre los distintos parámetros de diseño. Finalmente, se muestran ejemplos de aplicación de este procedimiento de diseño en arcos con formas circulares y no circulares.

**Palabras clave:** Arcos; línea de empujes; polígonos funiculares; postensado externo; estática gráfica.

**Abstract:** This paper presents a procedure to transform any arch shape into a funicular arch using external post-tensioning. The external post-tensioning introduces forces on the arch. These forces are added to the gravitational loads so that the shape of the resulting funicular polygon is, precisely, the shape of the arch. In addition, uniform compression is achieved in all sections of the arch and zero horizontal reactions at the ends. Graphical statics has been used to define the forces and the arrangement of the post-tensioning cables Geometric limits and relationship rules between the design parameters are also defined. Finally, examples of application of this design procedure in arches with circular and non-circular shape are shown.

**Keywords:** Arches; Thrust line; funicular polygons; external post-tensioning; graphic statics

## **1 Introducción**

### ***1.1 Diseño de arcos***

El diseño de los primeros arcos se basaba en la experiencia de la construcción. Así, se repetían los diseños exitosos y se descartaban los que fracasaban. Poco a poco se fueron formulando reglas geométricas sencillas que relacionaban la luz y la flecha con el espesor del arco y el tamaño de los estribos (1, 2). La forma geométrica más utilizada en estos primeros arcos era la circular simple, como el arco de medio punto, el arco rebajado y arco de herradura; o la combinación de dos o más arcos de circunferencia, como el arco ojival y el arco carpanel.

El desarrollo posterior de una teoría mecánica de los arcos (3) y de la estática gráfica (4) permitió comprender que el éxito del diseño depende principalmente de dos condiciones: la primera es que el espesor del arco pueda inscribir al menos una línea de empujes con la forma de un polígono funicular resultante de las fuerzas que actúan en él; la segunda es que los estribos situados en los extremos resistan el empuje sin que se produzcan deformaciones relevantes que modifiquen la forma original del arco. Esto ha permitido diseñar arcos y bóvedas funiculares de menor espesor que los primeros. Algunos de estos diseños se han convertido en iconos de la arquitectura clásica y moderna, por ejemplo, la cúpula de la catedral de Sant Paul en Londres (5), los puentes metálicos de Garabit en Francia (6) y de María Pía en Portugal (7), muchas de las construcciones modernistas de Antoni Gaudí (8) y de César Martinell (9), los hangares para dirigibles en el aeropuerto de Orly (10), el puente de Salginatobel (11), el arco

Gateway en Sant Louis (12), los silos horizontales de Eladio Dieste (13) o el arco parabólico en Morano sul Po (14).

### ***1.2 Arcos atirantados y arcos postensados***

En algunos edificios góticos y renacentistas con arcos y bóvedas, especialmente en Italia, se colocaban tirantes de madera o de hierro para absorber la reacción horizontal en los apoyos (15-16). Esto permitía reducir la dimensión de los estribos y así aligerar la construcción.

En el S. XIX se construyeron muchas estructuras abovedadas de vidrio que cubrían galerías comerciales, museos y estaciones. Estas estructuras estaban formadas normalmente por arcos metálicos. Con el fin de aligerar estos arcos, el ingeniero ruso V. Shukhov ideó un sistema de tensores entrecruzados que no solo servían para absorber el empuje horizontal en los apoyos, sino también para arriostrar el arco en su propio plano (figura 1a). Esto permitía reducir su dimensión y aligerar la construcción. Los tensores estaban postensados para evitar que se comprimiesen en ninguna situación de carga. Este sistema se utilizó, al menos, en las Galerías GUM, en el Museo Pushkin en Moscú, y en sala de máquinas de la Exposición de Todas las Rusias celebrada en Nizhni-Novgorod en 1896 (17-18).

Desde los años ochenta del siglo pasado hasta la actualidad, la ingeniería alemana Schlaich Bergermann und Partner (SBP) ha utilizado en varios de sus diseños de vidrio abovedadas un sistema de tirantes postensados concurrentes para el atirantado y arriostramiento de arcos metálicos (figura 1b), por ejemplo, en el Museo de Historia Natural de Hamburgo (19), en los patios del Bosh Area en Stuttgart (20) o en el DG Bank en Berlín (21).

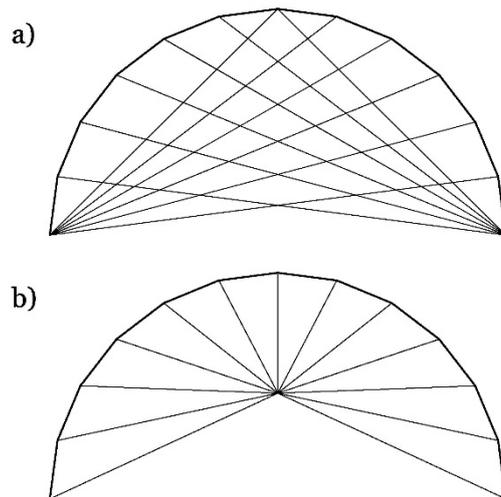


Figura 1. Sistemas de arriostramiento de arcos metálicos mediante tirantes postensados: a) entrecruzados, según el diseño de A. Shukhov; o b) concurrentes, según el diseño de la ingeniería SBP.

El postensado de un arco produce un incremento de la compresión. Este incremento de la compresión reduce la excentricidad de la línea de empujes hasta hacerla irrelevante. Esta excentricidad es debida a una falta de concordancia entre la forma funicular de la línea de empujes y la forma del arco. La falta de concordancia puede darse incluso en arcos con formas funiculares, ya que las acciones variables modifican la forma de la línea de empujes.

El postensado externo ha sido utilizado en arcos de mampostería. En unos casos se disponen unos cables radiales que unen el arco de mampostería con un tirante paralelo al mismo arco por la cara interior (22-23). Al tensar el tirante, los cables radiales transmiten unas fuerzas centrípetas al arco de mampostería, incrementando su compresión (figura 2a). La fachada del Pabellón del Futuro de la Exposición Universal de Sevilla en 1992 (24) es, sin duda, uno de los mejores ejemplos de arcos de mampostería con postensado externo. En otros casos se disponen cables adosados a la cara exterior, siguiendo la forma del arco (25). Al tensar estos cables también se

generan unas fuerzas radiales centrípetas que incrementan la compresión del arco (figura 2b).

En un postensado interno los cables están situados dentro de la sección, siguiendo la forma del arco. Este tipo de postensado ha sido utilizado en arcos de hormigón, como los del hangar construido para el ejército americano en Rapid City (26), o en arcos de mampostería, como los de la iglesia del Padre Pío en San Giovanni Rotondo (24). En estos dos casos la forma de los arcos es funicular, pero las cargas variables modifican la forma de la línea de empujes, lo cual produce momentos flectores. El postensado introduce un esfuerzo de compresión adicional que reduce la excentricidad entre la forma del arco y la línea de empujes modificada por las acciones variables. Esto permite optimizar el espesor del arco.

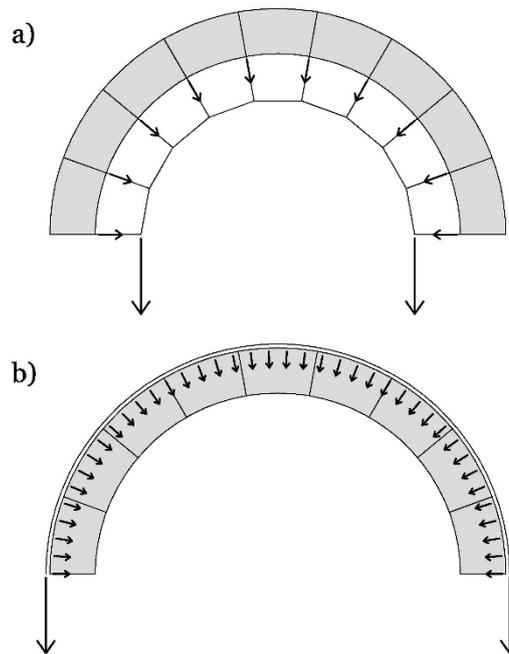


Figura 2. Postensado externo de arcos de mampostería: a) mediante cables radiales y tirante paralelo por la cara interna; b) mediante cables adosados a la cara exterior del arco.

### ***1.3 Funicularidad de arcos mediante postensado externo***

Desde finales del pasado siglo y sobre todo principios de éste, la estática gráfica ha sido recuperada para el diseño de estructuras funiculares debido a su gran potencial en el desarrollo de herramientas gráficas de diseño asistido por ordenador (26-29). Así, la estática gráfica se utiliza actualmente no solo como herramienta de *form-finding*, sino también para la minimización de los esfuerzos en estructuras que combinan elementos solo comprimidos y solo traccionados tales como celosías o arcos atirantados (30).

Una estrategia reciente para el diseño de arcos, desarrollada primero por Lachauer y Van Mele (31, 32) y más tarde por L. Todisco (33-38), consiste en utilizar la estática gráfica para convertir cualquier forma en funicular mediante un postensado externo. Este postensado introduce una serie de fuerzas en la estructura. El polígono funicular resultante de la suma de estas fuerzas y las fuerzas gravitatorias es, precisamente, el que se inscribe la forma de la estructura. Es decir, el postensado externo puede modificar la forma de la línea de empujes de una determinada hipótesis de carga para que coincida exactamente con la forma de un arco cualquiera (39).

En el planteamiento de L. Todisco, el arco se discretiza en un polígono de lados iguales. El postensado introduce fuerzas radiales, por encima o por debajo del arco, que típicamente se alinean con las bisectrices de los ángulos en cada vértice del polígono. Por efecto de estas fuerzas la línea de empujes resultante tiene la misma forma que el polígono. Sin embargo, con este postensado, la compresión en el arco no es uniforme y las reacciones horizontales en los apoyos no siempre resultan nulas. Únicamente cuando el postensado se sitúa por el intradós del arco es posible equilibrar por completo los empujes horizontales en los extremos.

La propuesta presentada en este artículo aborda ambos objetivos, el de la compresión uniforme en el arco y el del equilibrio de las reacciones horizontales,

simultáneamente mediante lo que denomina postesado ideal. Este postesado ideal permite reducir el esfuerzo de compresión en el arco respecto de las que se producen cuando las fuerzas introducidas por él mismo tienen una dirección radial.

#### ***1.4 Postensado ideal de un arco***

El postensado ideal de un arco es aquel que alcanza tres objetivos principales: El primero es anular las reacciones horizontales en los apoyos. Esto permite eliminar los estribos y aligerar los soportes. El segundo es modificar la forma de la línea de empujes para que, en situación de cargas permanentes, coincida exactamente con la forma del arco. Y el tercero es que, además, el esfuerzo de compresión sea uniforme en todos los tramos. Esto permite optimizar el espesor del arco.

En el caso de los arcos de mampostería, el postensado ideal tiene que garantizar que la línea de empujes se mantenga dentro del arco incluso cuando actúan sobre él cargas variables. Esto también permite la optimización del espesor del arco. Además permite reducir eventualmente las cargas muertas sobre el arco, que ya no condicionan su estabilidad. En el caso de arcos esbeltos, normalmente metálicos o de madera, el postensado externo ideal, además, mejora las condiciones de arriostramiento en su propio plano. Esto también permite optimizar el dimensionado de su sección.

Este trabajo presenta un procedimiento para definir el postensado externo ideal de un arco, para que pueda ser utilizado en el refuerzo de arcos de mampostería o en el diseño de arcos esbeltos de mediana y gran luz. Este procedimiento se basa en métodos de estática gráfica fácilmente programables en herramientas que puedan ser implementadas en programas de diseño asistido por ordenador.

## 2 DESARROLLO

### 2.1 Parámetros de diseño

A continuación se enumeran los parámetros utilizados en el proceso de diseño del postensado externo ideal de un arco circular según se muestran en la figura 3:

- $L$ : luz
- $f$ : flecha
- $h$ : distancia entre la clave y el tirante
- $t$ : espesor del arco en su propio plano
- $G_i$ : Carga puntual gravitatoria permanente en un vértice  $i$  del polígono inscrito en el arco
- $P_i$ : Fuerza puntual de postensado en un vértice  $i$  del polígono inscrito en el arco
- $N$ : Esfuerzo axial de compresión en un tramo del arco
- $R_h$ : Fuerza de reacción horizontal en el apoyo del arco

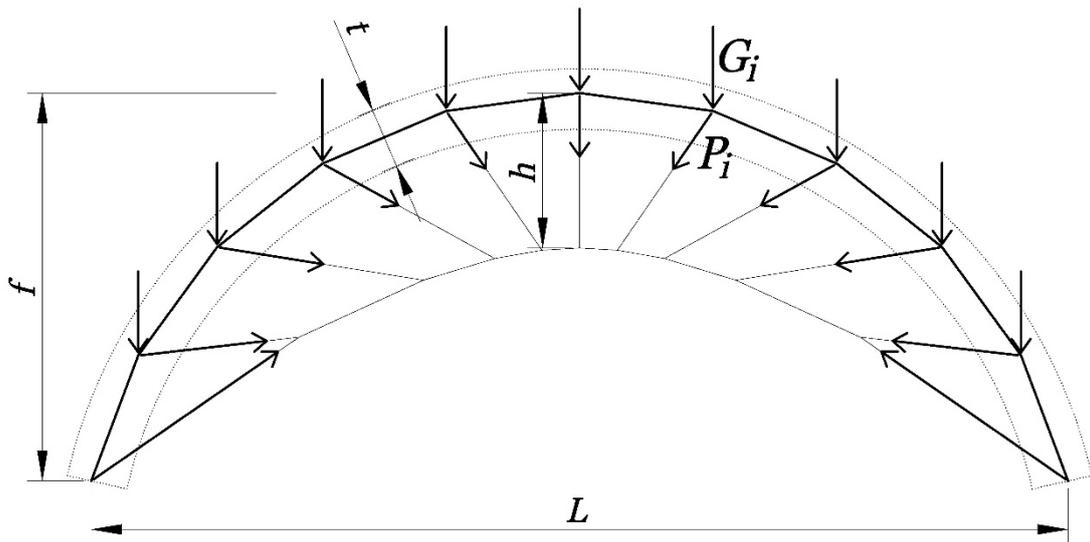


Figura 3. Arco circular con los parámetros de diseño del postensado externo ideal.

## 2.2 Proceso de diseño para arcos circulares

El proceso de diseño del postensado externo ideal de un arco circular empieza discretizando el arco en un polígono inscrito de  $n$  lados iguales (en rojo en la figura 3a). Luego se definen unas fuerzas gravitatorias permanentes  $G_i$  que actúan sobre los vértices del polígono. Después, mediante estática gráfica, se obtienen las fuerzas de postensado  $P_i$  que actúan sobre los mismos vértices, de tal manera que la inclinación de los lados del polígono funicular (comprimido) resultante sea idéntica a la inclinación de los lados del polígono inscrito en el arco circular y, además, de tal manera que el esfuerzo de compresión  $N$  sea idéntico en todos los lados del polígono (figura 4b). A continuación, también mediante estática gráfica, se define otro polígono funicular (traccionado) resultante solo de las fuerzas  $P_i$ , de tal manera que la reacción horizontal  $R_h$  en sus extremos sea igual a la reacción horizontal del polígono funicular comprimido (figura 4c). Así, el arco, además de ser funicular y tener compresión uniforme, no transmite empujes en sus extremos. La forma de este segundo polígono es la que describe el tirante situado por debajo del arco (en azul en la figura 4a).

Teniendo en cuenta unos mismos parámetros de diseño  $L$ ,  $f$ ,  $h$  y  $G_i$ , mediante estática gráfica podemos encontrar un segundo diseño de postensado centrípeto (figura 5) en el cual las fuerzas de postensado están alineadas con las bisectrices de los ángulos del polígono y son concurrentes en el centro del arco de circunferencia.

Aparte de las diferencias formales evidentes en la configuración resultante de los cables de postensado (figuras 4a y 5a), resulta una diferencia en el esfuerzo axial de compresión en el arco: en el primer diseño  $N$  es uniforme (figura 4b) mientras que en el segundo diseño (figura 5b) la compresión varía entre  $N_{\min}$  en la clave del arco y  $N_{\max}$  en el arranque, siendo  $N_{\min}$  igual al valor de  $N$  en el primer diseño para los mismos valores de  $L$ ,  $f$ ,  $h$  y  $G_i$ . En definitiva, en el primer diseño de postensado externo ideal (figura 4)

no solo se consigue que el esfuerzo de compresión en el arco sea uniforme en todo el arco, sino también que sea menor que el que obtendríamos con un postensado centrípeto.

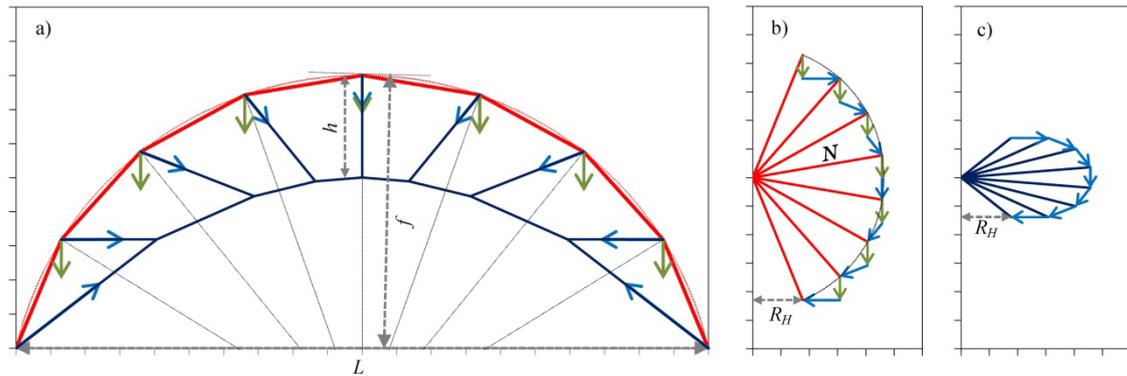


Figura 4. Diseño mediante estática gráfica del postensado externo de un arco circular de compresión uniforme: a) Polígono comprimido (en rojo), cables de postensado (en azul oscuro), cargas gravitatorias (en verde) y fuerzas de postensado (en azul claro). b) Fuerzas en el polígono funicular comprimido. c) Fuerzas en el polígono funicular traccionado.

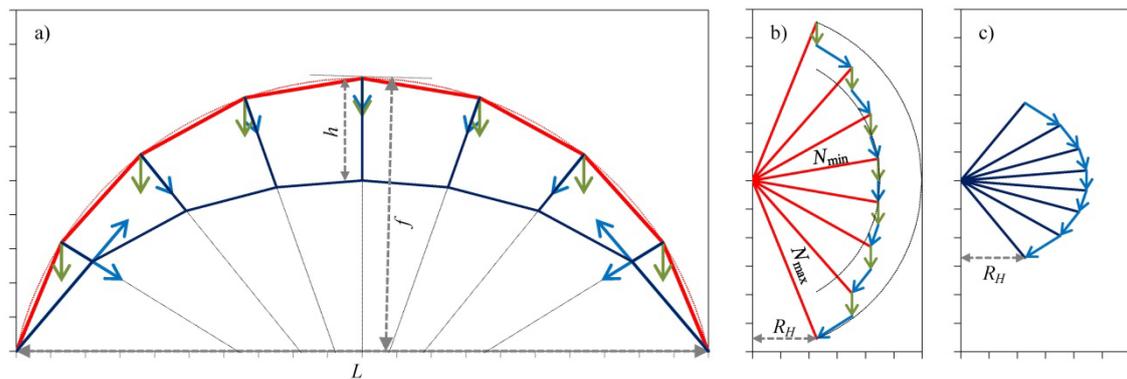


Figura 5. Diseño mediante estática gráfica del postensado centrípeto de un arco circular: a) Polígono comprimido (en rojo), cables de postensado (en azul oscuro), cargas gravitatorias (en verde) y fuerzas de postensado (en azul claro). b) Fuerzas en el polígono funicular comprimido. c) Fuerzas en el polígono funicular traccionado.

### 2.3 Parametrización del diseño para arcos circulares

Mediante la programación de este proceso en una aplicación para el diseño asistido por

ordenador, a través de la estática gráfica, podemos definir de forma rápida y precisa muchos diseños distintos de arcos circulares con postensado externo ideal, variando uno o varios de sus parámetros. Así, encontramos los límites geométricos del diseño y las reglas básicas de relación entre los distintos parámetros. Ambas cosas permiten parametrizar una parte del proceso y dar rápidamente con el diseño más adecuado a un caso concreto.

Un límite geométrico del diseño del postensado externo ideal de un arco se produce cuando todos los cables confluyen en un punto situado por debajo de la clave del arco (figura 6a). Entonces la distancia entre la clave y el tirante es máxima ( $h_{\max}$ ). Además, si comparamos las figuras 6a y 6b con las figuras 4a y 4b, podemos observar que, para un mismo arco con un mismo estado de cargas  $G_i$ , el esfuerzo de compresión  $N$ , las fuerzas de postensado y la reacción horizontal  $R_H$  son las menores de todas las posibles cuando  $h$  es máxima.

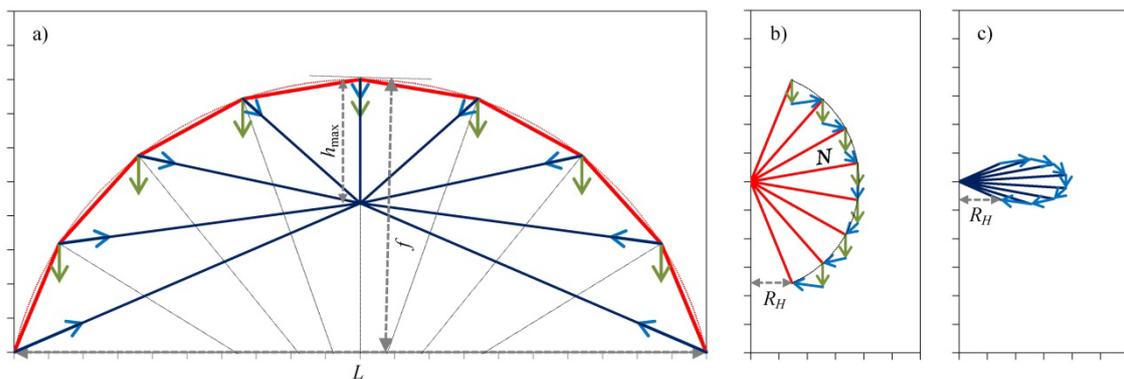


Figura 6. Diseño mediante estática gráfica del postensado externo de un arco circular de compresión uniforme con distancia máxima entre la clave y el tirante: a) Polígono comprimido (en rojo), cables de postensado (en azul oscuro), cargas gravitatorias (en verde) y fuerzas de postensado (en azul claro). b) Fuerzas en el polígono funicular comprimido. c) Fuerzas en el polígono funicular traccionado.

La figura 7 muestra la curva que relaciona la razón  $L/f$  y la razón  $L/h_{\max}$  para arcos con flechas comprendidas entre  $L/2$  y  $L/10$ , y cargas  $G_i$  distribuidas uniformemente. Según

esta curva,  $h_{\max}$  disminuye a medida que el arco es más plano.

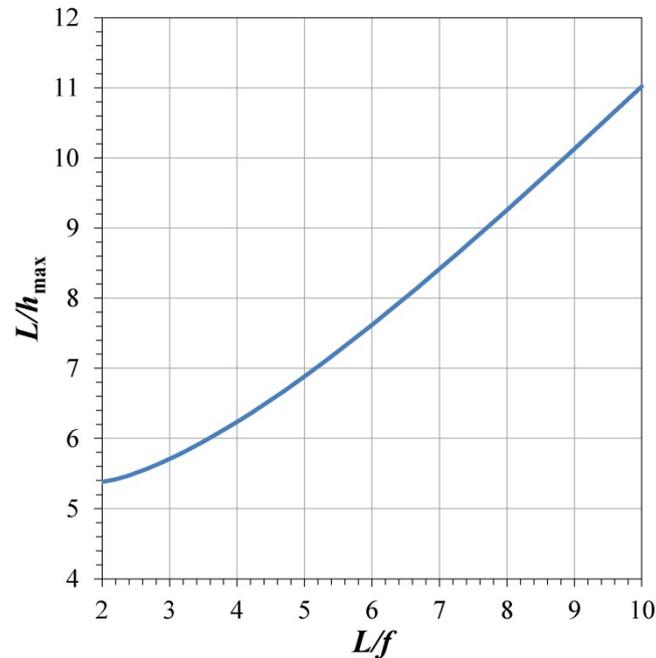


Figura 7. Curva de relación entre  $L/f$  y  $L/h_{\max}$  en arcos circulares con postensado externo ideal y carga  $G_i$  distribuida uniformemente.

Al incrementar las fuerzas de postensado, también aumenta la compresión en el arco y el sistema arco-tirante encuentra el equilibrio con una distancia  $h$  menor. Así, para un mismo estado de cargas  $G_i$ , cuanto mayor sean las fuerzas de postensado, y, por ende, mayor sea el esfuerzo de compresión en el arco, menor es la distancia entre la clave y el tirante. Llevado al límite, unas fuerzas de postensado infinitamente grandes darían lugar a una distancia nula entre la clave y el tirante. La figura 8 muestra el diseño del postensado externo ideal de cuarenta y ocho arcos en los cuales  $f$  varía entre  $L/2$  y  $L/10$ , y  $h$  varía entre  $h_{\max}$  y  $L/20$ .

Entonces, es posible establecer una relación entre la forma del postensado, definida por la razón  $L/h$ , y su nivel de sollicitación, definido por la razón entre  $N/\Sigma G_i$ , en función de la proporción del arco, definida por la razón  $L/f$ , y del número de lados  $n$ . En la figura 8 se muestran las rectas que definen de esta relación para ocho

proporciones de arco distintas, comprendidas entre  $L/f=2$  y  $L/f=10$ , variando desde  $h_{\max}$  hasta  $h=L/20$ . Para cada valor de  $L/f$  se muestran tres rectas distintas: en línea continua considerando  $n=8$ , en línea discontinua  $n=10$  y en línea de puntos  $n=12$ . En esta figura 9 podemos observar que cuanto mayor es la razón  $L/f$  menor es la diferencia entre las tres rectas. A partir de este gráfico, es posible encontrar el estado de sollicitación del arco necesario para un determinado valor de  $h$  y viceversa.

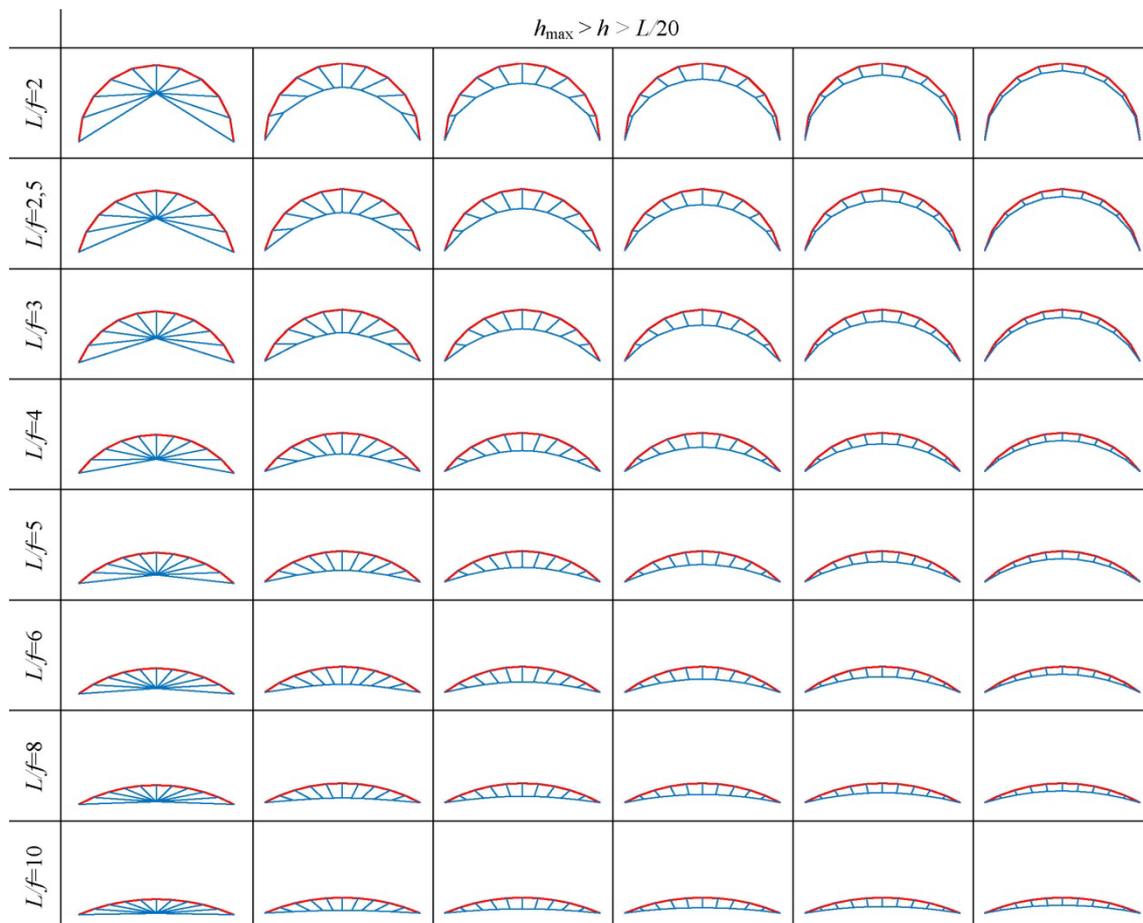


Figura 8. Diseño del postensado externo ideal de cuarenta y ocho arcos con  $n=10$ , variando  $f$  entre  $L/2$  y  $L/10$ , y  $h$  entre  $h_{\max}$  y  $L/20$ .

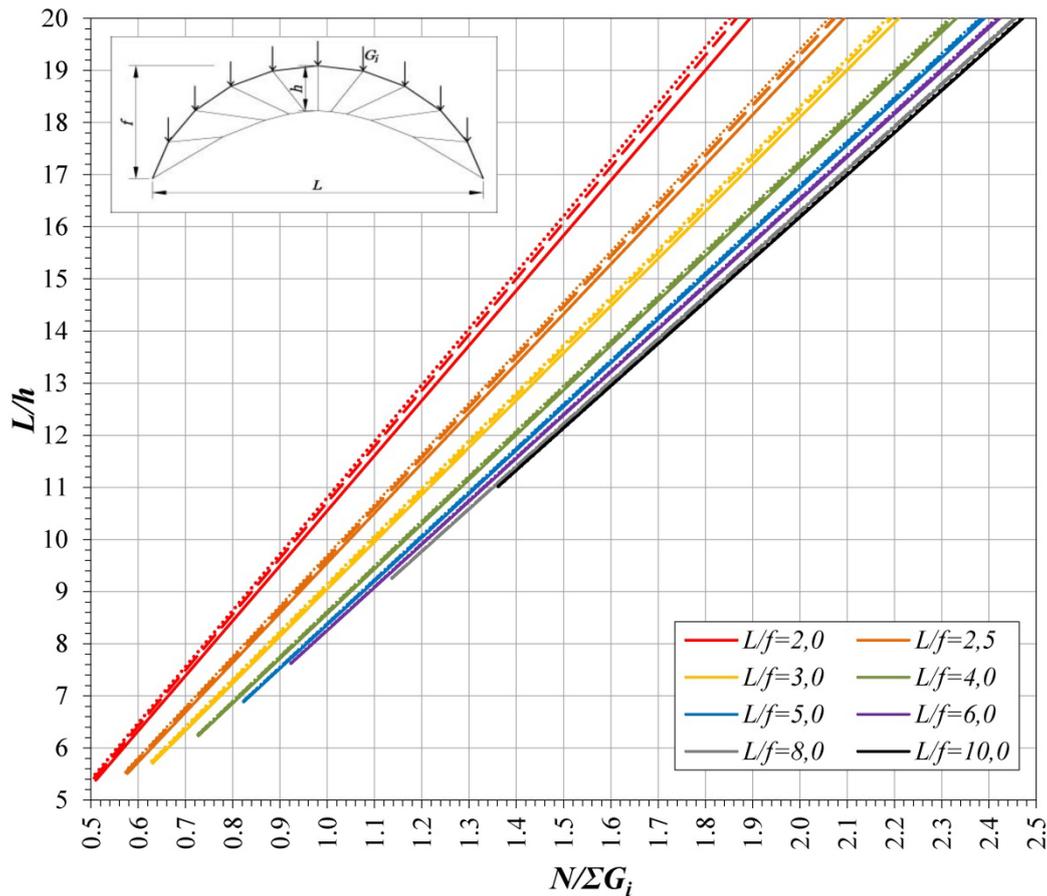


Figura 9. Gráficas de relación entre  $L/h$  y  $N/\Sigma G_i$  en arcos con postensado externo ideal, variando  $f$  entre  $L/2$  y  $L/10$ , y  $h$  entre  $h_{\max}$  y  $L/20$ , con  $n=8$  (en línea continua),  $n=10$  (en línea discontinua) y  $n=12$  (en línea de puntos).

En los arcos de mampostería, para que todo el ancho  $t$  de sus secciones normales tenga tensiones de compresión se precisa que el polígono funicular inscrito pase por el tercio central de su espesor. Para que esto suceda, la diferencia entre el radio del arco y la apotema del polígono funicular inscrito ha de ser menor que la tercera parte del espesor del arco. Así, podemos definir el espesor mínimo ( $t_{\min}$ ) del arco como el triple de la diferencia entre el radio y la apotema (figura 10).

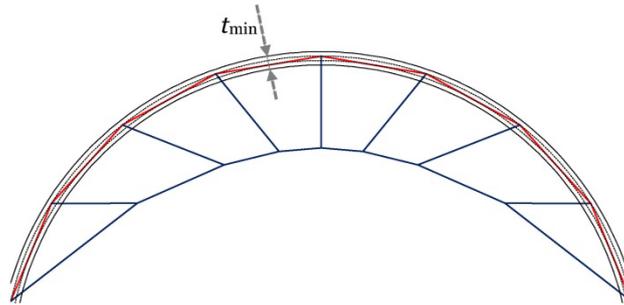


Figura 10. Espesor mínimo ( $t_{\min}$ ) de un arco de mampostería con postensado externo, considerando  $n=8$ .

La figura 11 muestra la relación entre  $L/f$  y  $L/t_{\min}$  para polígonos con  $n=8$ ,  $n=10$  y  $n=12$ . En esta figura podemos observar que  $t_{\min}$  es proporcional a  $f$ , es decir, para una misma luz, cuanto menor sea la flecha del arco, menor espesor mínimo se necesita.

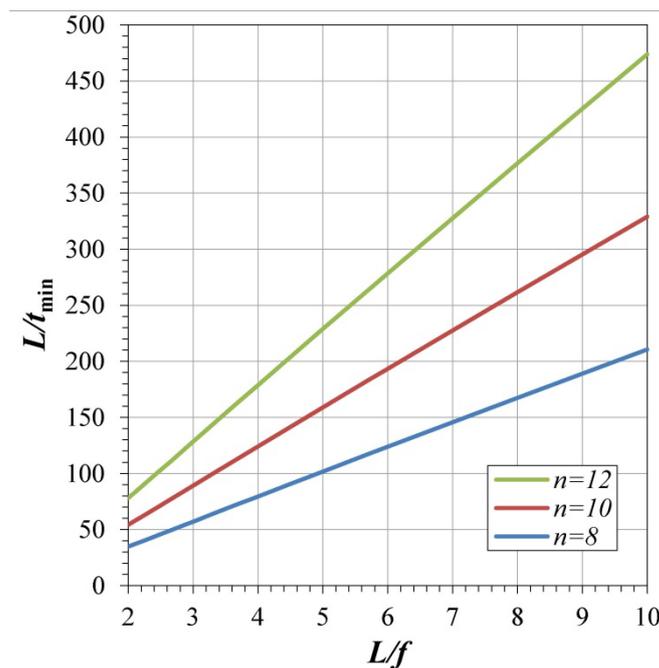


Figura 11. Rectas de relación entre  $L/f$  y  $L/t_{\min}$  de arcos circulares de mampostería con postensado externo ideal, considerando  $n=8$ ,  $n=10$  y  $n=12$ .

Esta consideración de espesor mínimo de un arco de mampostería solo responde al criterio del tercio central en situación de carga gravitatoria permanente y fuerzas de pretensado. Sería necesario valorar otras cuestiones, como la variación de la forma de la

línea de empujes debida a las cargas variables o accidentales, para poder determinar con mayor precisión el espesor mínimo que requeriría un arco de mampostería con postensado externo.

#### ***2.4 Aplicación en arcos no circulares***

El procedimiento descrito en este artículo para el diseño del postensado externo ideal de un arco también es de aplicación en arcos con formas diferentes a la circular simple. Las figuras 12a y 12b, por ejemplo, muestran los diseños obtenidos en un arco ojival y en un arco elíptico respectivamente, considerando en ambos casos  $n=12$ .

En el arco ojival de la figura 11a se produce un cambio de curvatura brusco en la clave. Por este motivo, la fuerza de postensado es claramente más grande en ese punto que en el resto del arco. Esto se refleja en el proceso de estática gráfica para definir estas fuerzas, en el cual los ángulos entre las rectas que representan las fuerzas de compresión  $N$  en los lados del polígono son constantes, excepto entre los dos tramos que concurren en la clave, donde el ángulo es mucho mayor.

En el arco elíptico de la figura 12b la curvatura incrementa progresivamente desde la clave hasta los arranques. Por este motivo, en el proceso de estática gráfica para definir las fuerzas de postensado, los ángulos entre las rectas que representan la compresión en los lados del polígono no son constantes y las fuerzas de postensado también incrementan desde la clave hasta los arranques.

Entonces, mediante el mismo procedimiento, es posible definir el postensado externo ideal de cualquier otro tipo de arco no circular, incluso con asimetrías de forma y/o de distribución de la carga permanente. En cualquiera de ellos, así como en los dos ejemplos de arcos no circulares mostrados en la figura 12, para una parametrización de su proceso de diseño sería necesario definir unos límites geométricos y unas reglas de relación distintas a las que se definen en el subapartado 2.3 de este artículo, conforme a

sus parámetros de diseño específicos. El número de parámetros y de reglas de relación entre ellos será mayor cuanto más compleja sea la forma del arco.

Para la determinación del espesor mínimo en arcos ojivales podría aplicarse la misma gráfica representada en la figura 11, pero teniendo en cuenta una relación  $L^*/f^*$  corregida, donde  $L^*=2f$  y  $f^*=L/2$ . En el caso de los arcos elípticos, la determinación de requeriría un estudio específico en cada caso, dado que la curvatura de la elipse no es constante a lo largo de todo el arco.

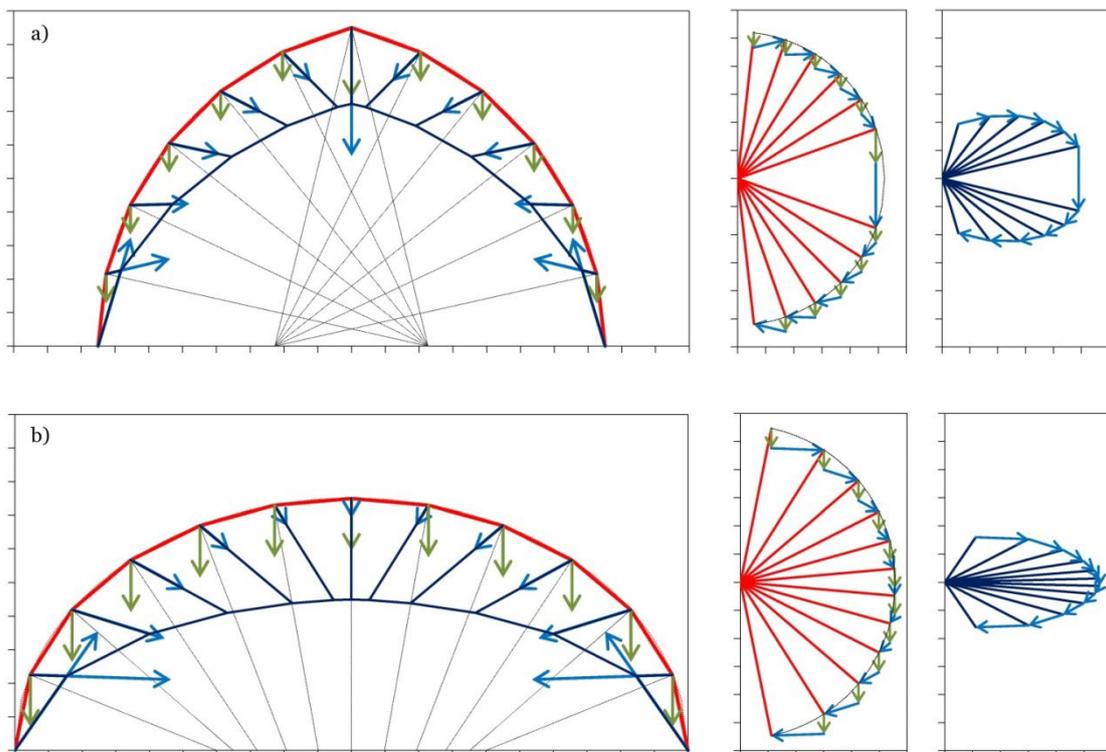


Figura 12. Diseño mediante estática gráfica del postensado externo ideal de un arco de compresión uniforme con forma: a) ojival; y b) elíptica.

### 3 CONCLUSIONES

El postensado de arcos es un recurso de diseño que permite mejorar su comportamiento mecánico y así mejorar sus condiciones de estabilidad frente a estados de carga determinados. El pos-tensado externo tiene especial interés porque permite no solo su

incorporación en arcos de nueva construcción, sino especialmente, en arcos existentes que precisen ser reforzados.

En este trabajo se define el postensado externo ideal de un arco como aquel que alcanza los siguientes objetivos: anular las reacciones horizontales en los apoyos, modificar la forma de la línea de empujes para que, en situación de cargas permanentes, coincida exactamente con la forma del arco, y conseguir que el esfuerzo de compresión sea uniforme en todos los tramos del arco. En arcos de nueva construcción este postensado permite eliminar los estribos, aligerar los soportes y optimizar el espesor del propio arco. En arcos existentes de mampostería, permite corregir la forma de la línea de empujes, adaptándola a la forma del arco y, además, introduciendo una fuerza de compresión adicional. Esto mejora su comportamiento mecánico y sus condiciones para resistir acciones externas como el sismo o el viento.

El procedimiento de diseño del postensado externo ideal se basa en el método de estática gráfica. Este método es de fácil manejo y además puede ser programado en una aplicación de diseño asistido por ordenador.

En el trabajo se muestra la parametrización de una parte del diseño mediante la definición de una serie de límites geométricos y reglas de relación entre los diferentes parámetros del diseño del postensado externo ideal de arcos circulares. Estas reglas y límites se resumen en unas gráficas que pueden servir de ayuda en el proceso de diseño. Por último, el trabajo muestra cómo es posible aplicar el mismo proceso de diseño del postensado externo ideal de arcos no circulares, tales como ojivales o elípticos.

## **Referencias**

- (1) Huerta Fernández, S. (2004). Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica, pp. 141-151, Madrid: Instituto Juan de Herrera.

- (2) Brencich, A., Morbiducci, R. (2007). Masonry arches: historical rules and modern mechanics. *International Journal of Architectural Heritage*, 1(2): 165-189, doi: <https://doi-org.sabidi.urv.cat/10.1080/15583050701312926>.
- (3) Block, P., DeJong, M., Ochsendorf, J. (2006). As hangs the flexible line: Equilibrium of masonry arches. *Nexus Network Journal*, 8(2): 13-24, doi: <https://doi.org/10.1007/s00004-006-0015-9>.
- (4) Gerhardt, R., Kurrer, K. E., Pichler, G. (2003, 20 de enero). The methods of graphical statics and their relation to the structural form. En *Proceedings of the first international congress on construction history* (pp. 997-1006). Madrid: Instituto Juan de Herrera.
- (5) Heyman, J. (1998). Hooke's cubico–parabolical conoid. *Notes and Records of the Royal Society of London*, 52(1): 39-50, doi: <https://doi.org/10.1098/rsnr.1998.0033>.
- (6) Schueremans, L., Porcher, H., Rossi, B., Wouters, I., Verstrynge, E. (2018). A study on the evolution in design and calculation of iron and steel structures over the mid 19th century in western and central Europe. *International Journal of Architectural Heritage*, 12(3): 320-333, doi: <https://doi-org.sabidi.urv.cat/10.1080/15583058.2017.1323244>.
- (7) Thrall, A. P., Billington, D. P., Bréa, K. L. (2012). The Maria Pia Bridge: A major work of structural art. *Engineering structures*, 40: 479-486, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.02.032>.
- (8) Huerta, S. (2006). Structural design in the work of Gaudi. *Architectural science review*, 49(4): 324-339, doi: <https://doi.org/10.3763/asre.2006.4943>.

- (9) Llorens, J. I. (2013). Wine cathedrals: Making the most of masonry. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 166(6): 329-342, doi: <https://doi.org/10.1680/coma.12.00023>.
- (10) Freyssinet, E. (1925). Los hangares para dirigibles en el aeropuerto de Orly. *Arquitectura: órgano de la Sociedad Central de Arquitectos*, 80: 317-323.
- (11) Fivet, C., Zastavni, D. (2012). Robert Maillart's key methods from the Salginatobel Bridge design process (1928). *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 53(1): 39-47.
- (12) Osserman, R. (2010). How the Gateway Arch got its shape. Williams, K., Rees, J. M. (Ed.), *Recalling Eero Saarinen 1910–2010* (pp. 167-189). Basilea: Birkhäuser Basel, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0520-5\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-0346-0520-5_2).
- (13) Anderson, S., Dieste, E. (2004). *Eladio Dieste: innovation in structural art*, pp. 173-177, Nueva York: Princeton Architectural Press.
- (14) Ceravolo, R., Invernizzi, S., Lenticchia, E., Matteini, I., Patrucco, G., Spanò, A. (2023). Integrated 3D Mapping and Diagnosis for the Structural Assessment of Architectural Heritage: Morano's Parabolic Arch. *Sensors*, 23(14): 6532, doi: <https://doi.org/10.3390/s23146532>.
- (15) Vasic, M. (2015). A multidisciplinary approach for the structural assessment of historical constructions with tie-rods (Tesis doctoral no publicada). Milan: Politecnico de Milano.
- (16) Vecchiattini, R. (2019). Historical use of metal tie-rods in the Italian territory: treatises, essays, and manuals through four centuries of history. *International Journal of Architectural Heritage*, 13(3): 451-471, doi: <https://doi-org.sabidi.urv.cat/10.1080/15583058.2018.1563240>.

- (17) Beckh, M. (2015). Hyperbolic structures: Shukhov's lattice towers-fore-runners of modern lightweight construction, pp. 10-14, Chichester: John Wiley & Sons.
- (18) Gappoev, M., Graefe, R. (2008). Rettungsaktionen für Šuchov-Bauten in der Region Nizhnij Novgorod. *Stahlbau*, 77(2): 99-104, doi: <https://doi.org/10.1002/stab.200810013>.
- (19) Schlaich, J., Schober, H. (1996). Glass-covered grid-shells. *Structural engineering international*, 6(2): 88-90, doi: <https://doi.org/10.2749/101686696780495716>.
- (20) Schlaich, I. J., & Schober, I. H. (2005, 20 de abril). Freeform glass roofs. In *Structures Congress 2005: Metropolis and Beyond* (pp. 1-13). Nueva York: ASCE, doi: [https://doi.org/10.1061/40753\(171\)150](https://doi.org/10.1061/40753(171)150).
- (21) Schlaich, J., Schober, H., Helbig, T. (2008). Eine verglaste Netzschale: Dach und Skulptur, DG Bank am Pariser Platz in Berlin. *Bautechnik*, 78(7): 457–463, doi: <https://doi.org/10.1002/bate.200103010>.
- (22) Rios, A. J., O'Dwyer, D. (2019). External post-tensioning system for the strengthening of historical stone masonry bridges. En Aguilar, R., Terrealva, D., Moreira, S., Pando, M. A., Ramos, L. F. (Eds.), *Structural Analysis of Historical Constructions: An Interdisciplinary Approach* (pp. 1566-1574). Nueva York: Springer International Publishing, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3\\_168](https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_168).
- (23) Zampieri, P., Piazzon, R., Ferroni, R., Pellegrino, C. (2023). The application of external post-tensioning system to a damage masonry arch. *Procedia Structural Integrity*, 44: 605-609, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2023.01.079>.

- (24) Brown, A. (2001). Stone and tension. En Brown, A. (Ed.), *The engineer's contribution to contemporary architecture: Peter Rice* (pp. 143-158). London: Thomas Telford Publishing
- (25) Zampieri, P., Tetougueni, C. D., Pellegrino, C. (2020). Rigid-block analysis of archeological elements retrofitted with external post-tensioning system. *Procedia Structural Integrity*, 29: 192-198, doi: <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.156>.
- (26) Allen, E., Zalewski, W. (2009). *Form and Forces: Designing Efficient, Expressive Structures*, pp. 240-241, 314. Nueva York: John Wiley & Sons.
- (27) Zalewski, W., Allen, E. (1998). *Shaping structures: statics*. Nueva York: Wiley & Sons.
- (28) Van Mele, T., Block, P. (2014). Algebraic graph statics. *Computer-Aided Design*, 53: 104-116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.04.004>.
- (29) Ohlbrock, P. O., D'Acunto, P. (2020). A computer-aided approach to equilibrium design based on graphic statics and combinatorial variations. *Computer-Aided Design*, 121: 102802. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.102802>.
- (30) Beghini, L. L., Carrion, J., Beghini, A., Mazurek, A., Baker, W. F. (2014). Structural optimization using graphic statics. *Structural and Multidisciplinary optimization*, 49: 351-366. doi: <https://doi.org/10.1007/s00158-013-1002-x>.
- (31) Lachauer, L., Kotnik, T. (2010). Geometry of Structural Form. En: Ceccato, C., Hesselgren, L., Pauly, M., Pottmann, H., Wallner, J. (eds) *Advances in Architectural Geometry 2010*. Viena: Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0309-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0309-8_14).

- (32) Van Mele, T., Lachauer, L., Rippmann, M., Block, P. (2012). Geometry-based understanding of structures. *Journal of the international association for shell and spatial structures*, 53(4): 285-295.
- (33) Todisco, L., Fivet, C., Corres-Peiretti, H., Mueller, C. (2015). Design and exploration of externally post-tensioned structures using graphic statics. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 56(4): 249-258.
- (34) Todisco, L., Corres-Peiretti, H., Mueller, C. (2016). Funicularity through external posttensioning: design philosophy and computational tool. *Journal of Structural Engineering*, 142(2): 1-9, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.000141](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.000141).
- (35) Todisco, L. (2016). Funicularity and equilibrium for high-performance conceptual structural design (Tesis doctoral no publicada). Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- (36) Todisco, L., Mueller, C. (2016). Externally post-tensioned structures: validation through physical models. Cruz, P. J. (Ed.), *Structures and Architecture: Beyond their Limits* (pp. 1144-1151). Londres: CRC Press, doi: <https://doi.org/10.1201/b20891>.
- (37) Todisco, L., Corres-Peiretti, H. (2018). New opportunities for the conceptual design of material-efficient antifunicular structures. *Hormigón y Acero*, 69(284): 83-88, doi: <https://doi.org/10.1016/j.hya.2017.04.010>.
- (38) Cañada Pérez-Sala, J., Todisco, L. (2021, 23 de Agosto). Efficiency-based exploration of externally post-tensioned structures. En *Proceedings of IASS Annual Symposium 2020/2021 and the 7<sup>th</sup> International Conference of Spatial Structures* (pp. 1-12). On-line: International Association for Shell and Spatial Structures.

- (39) Todisco, L., Stocks, E., León, H. (2018). Enhancing the structural performance of masonry structures by post-tensioning. *Nexus Network Journal*, 20: 671-691, doi: <https://doi.org/10.1007/s00004-018-0374-z>.