Agència de Gestió d'Ajuts Universitaris i de Recerca

UNIÓ EUROPEA
Fons Social Europeu

Memòria justificativa de recerca de les beques predoctorals per a la formació de personal investigador (FI)

La memòria justificativa consta de les dues parts que venen a continuació:
1.- Dades bàsiques i resums
2.- Memòria del treball (informe científic)

Tots els camps són obligatoris

1.- Dades bàsiques i resums

Títol del projecte ha de sintetitzar la temàtica científica del vostre document.
RESPUESTA NO LINEAL Y CRITERIOS DE DISEÑO DE PUENTES ARCO ESPACIALES

Dades de l'investigador (benficiari de l'ajut)

Nom
Marta

Cognoms
Sarmiento Comesías

Correu electrònic
m.sarmiento@hotmail.com

Dades del director del projecte

Nom
Ángel C.

Cognoms
Aparicio Bengoechea

Correu electrònic
angel.carlos.aparicio@upc.edu

Dades de la universitat / centre al que s'està vinculat
Universitat Politècnica de Catlunya

Número d'expedient
2009FI_B 00424

Paraules clau: cal que esmenteu cinc conceptes que defineixin el contingut de la vostra memòria.
puentes, arco, espaciales, análisis, no lineal

Data de presentació de la justificació
20/07/09

Generalitat de Catalunya
Departament d'Innovació, Universitats i Empresa

Resum en la llengua del projecte (màxim 300 paraules)

El desarrollo más reciente de los puentes arco ha llevado a una nueva tipología: los "puentes arco espaciales". Se entiende por puente arco espacial todo puente arco en el que, por su configuración geométrica y estructural, las cargas gravitatorias generan esfuerzos no contenidos en el plano del arco.
Por un lado, aparecen para satisfacer las necesidades funcionales cuando estructuras en arco resultan las más adecuadas para sostener tableros curvos y evitar así apoyos intermedios.
Desde un punto de vista estético, surgen como demanda de los nuevos puentes en entornos urbanos, buscando, no sólo una forma cuidada, sino persiguiendo convertirse en emblemas de la ciudad a partir de la originalidad y la innovación.
Su proyecto y construcción es posible gracias a las grandes posibilidades que ofrecen los nuevos métodos de cálculo y dibujo por ordenador, en los que, a través del incremento de memoria y rapidez, cada vez se emplean programas más completos y nuevas modelizaciones, más cercanas a la realidad. No menos importante es el desarrollo de los medios auxiliares de construcción y de las herramientas de CAD/CAM, que convierte en construibles por control numérico formas de manufactura impensables.
Ello trasciende en infinitas posibilidades de diseño y estructura.
Sin embargo, el diseño y construcción de estas nuevas tipologías no ha estado acompañado por el avance en el estado del conocimiento fundamentado en la investigación, ya que se han desarrollado pocos estudios que explican parcialmente la respuesta estructural de estos puentes. Existe, por lo tanto, la necesidad de profundizar en el estado del conocimiento y clarificar su respuesta estructural, así como de plantear, finalmente, criterios de diseño que sirvan de apoyo en las fases de concepción y de proyecto a estas nuevas tipologías.

Resum en anglès(màxim 300 paraules)
Arch bridges have recently evolved into a new typology: "spatial arch bridges", ie: arch bridges with such a structural and geometrical configuration, that vertical loads produce out of plane efforts on the arch.
On the one hand, this new typology appears in order to satisfy functional necessities when arch bridge structures are the most adequate to sustain or suspend curved decks without intermediate supports.
On the other hand, and from an aesthetical point of view, creating new forms answers a demand for urban bridges to become local landmarks of originality and innovation.
New calculus and drawing programs- which are more and more complete thanks to the increasing memory and computer speed- make modelling closer to reality. The development of auxiliar construction methods and of CAD/CAM, allow the numerical control construction of forms otherwise impossible to manufacture. Design and structure possibilities are infinite.
Nevertheless, there are very few studies on this subject, hence the design and construction of these new typologies has not been matched with the development of knowledge based on investigation.
There is, therefore, a need to extend the knowledge, clarify the structural behaviour and establish design criteria for those bridges.

2.- Memòria del treball (informe científic sense limitació de paraules). Pot incloure altres fitxers de qualsevol mena, no més grans de 10 MB cadascun d'ells.

La memòria de treball es presenta en un arxiu adjunt: memoria_fi_MEMORIA.doc

RESPUESTA NO LINEAL Y CRITERIOS DE DISEÑO DE PUENTES ARCO ESPACIALES

MEMORIA DE TRABAJO. PROYECTO DE TESIS

ÍNDICE

1. Introducción 1

1.1. Concepto de puente en arco espacial 2

1.2. Clasificación 4

2. Objetivos 7

2.1. Objetivo general 7

2.2. Objetivos específicos 7

3. Estado del arte 8

3.1. Realizaciones y propuestas no construidas de los puentes en arco espaciales 8

3.2. Investigaciones y estudios sobre puentes arco espaciales 9

3.2.1. Comportamiento estructural de los arcos espaciales nervados en función de distintas variables 10

3.2.2. Estudios y ensayos más recientes para la tipología de puentes en arco 12

3.2.3. Análisis aproximado de inestabilidad 13

3.2.4. Estrategias de análisis 14

4. Líneas de investigación abiertas 16

5. Fuentes de información 21

6. Plan de trabajo 22

6.1. Temario tentativo de la tesis 22

6.2. Programa y calendario de actividades 23

7. Doctor europeo 24

1. Introducción

El desarrollo más reciente de los puentes arco ha llevado a una nueva tipología: los "puentes arco espaciales". Por un lado, aparecen para satisfacer las necesidades funcionales cuando estructuras en arco resultan las más adecuadas para sostener tableros curvos y evitar así apoyos intermedios.

Desde un punto de vista estético, surgen como demanda de los nuevos puentes en entornos urbanos, buscando, no sólo una forma cuidada, sino persiguiendo convertirse en emblemas de la ciudad a partir de la originalidad y la innovación (véase el ejemplo de la Figura 1.1).

Se sueñan nuevas geometrías de puentes, los arcos se retuercen, se inclinan, vence la asimetría y los tirantes ya no son meros elementos de necesidad estructural, sino que se convierten en parte del juego, insinuando superficies regladas y dividiendo el espacio. Todo ello lleva a esta nueva tipología: "los puentes arco espaciales". En ocasiones, el puente deja la optimización estructural de lado, buscando la provocación de la ineficiencia o alcanzando la belleza de la escultura.

Figura 1.1- Hulme Arch Bridge: comunica el aeropuerto de Manchester con el centro de la ciudad. Su construcción formaba parte de un proyecto de reconstrucción del distrito de Hulme y se trata de un importante hito local, merecedor de diversos premios (Fuente: Hussain&Wilson, 1999[1])

Su proyecto y construcción es posible gracias a las grandes posibilidades que ofrecen los nuevos métodos de cálculo y dibujo por ordenador, en los que, a través del incremento de memoria y rapidez, cada vez se emplean programas más completos y nuevas modelizaciones, más cercanas a la realidad. No menos importante es el

[1] HUSSAIN, N.; WILSON, I.. **"The Hulme Arch Bridge, Manchester".** *ICE Proceedings, Civil Engineering* 132:. February 1999. p5

desarrollo de los medios auxiliares de construcción y de las herramientas de CAD/CAM, que convierte en construibles por control numérico formas de manufactura impensables.

Ello trasciende en infinitas posibilidades de diseño y estructura. Sin embargo, diseño y estructura deben seguir una misma lógica, tanto estética como estructural, para la optimización de las posibilidades que ofrecen los materiales y los nuevos sistemas de cálculo y constructivos. Ello resulta de vital importancia, por tratarse de una tipología de obra pública, como son los puentes, que debe construirse desde la eficiencia económica y estructural para satisfacer unas necesidades de la población, no sólo funcionales, sino también estéticas y de armonía con el entorno.

El diseño y construcción de estas nuevas tipologías no ha estado acompañado por el avance en el estado del conocimiento fundamentado en la investigación, ya que se han desarrollado pocos estudios (específico de puentes arco espaciales únicamente: *J. J. Jorquera, 2007;* para puentes Network: *P. Tveit, 2005;* puentes lámina y banda tesa suspendida del arco: *Strasky, 2007;* solución fuera del plano para arcos de canto variable: *E. Tufecki & O. Y. Dogruer, 2006;* estudios de pandeo de arcos: *Galambos, 1988; Correia, 2005; Capsoni et al, 2009*) que explican parcialmente la respuesta estructural de estos puentes. Existe, por lo tanto, la necesidad de profundizar en el estado del conocimiento y clarificar su respuesta estructural, así como de plantear, finalmente, criterios de diseño que sirvan de apoyo en las fases de concepción y de proyecto a estas nuevas tipologías.

1.1. Concepto de puente en arco espacial

Se trata de aquellos puentes en arco cuyo comportamiento no es asimilable al de un puente arco plano clásico (Figura 1.2), vertical, con tablero recto de directriz coplanaria a la del arco y atirantamiento centrado al eje.

Figura 1.2- Puente de Salginatobel: Puente arco plano vertical triarticulado

El carácter no plano de este tipo de estructuras se acrecienta si, por ejemplo, los arcos se giran respecto de la cuerda que une sus arranques, pues entonces aparecen acciones fuera del plano de los arcos ya para su peso propio.

Las cargas aplicadas en el plano del arco se resisten mediante axiles y flexiones en el plano del arco (cuando la sección es simétrica con respecto a este plano), mientras que las cargas transversales a este plano originan acoplamiento flexión-torsión (Figura 1.3), por funcionar como una viga balcón de directriz curva con respecto a este plano.

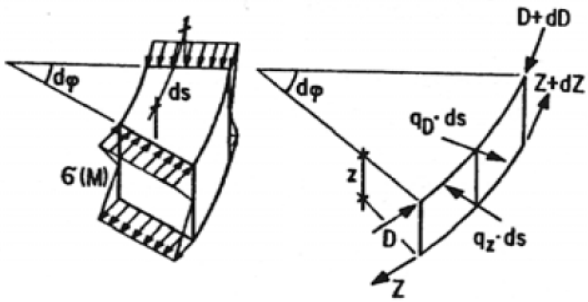


Figura 1.3- Acoplamiento flexión-torsión debido a la curvatura (*Menn, 1989*)

Por lo tanto, el concepto de puente arco espacial está muy vinculado a la excitación de los mecanismos resistentes transversales para cargas permanentes o sobrecargas exclusivamente verticales.

Es de destacar que el carácter espacial del puente arco aparece forzosamente en una estructura asimétrica respecto del plano longitudinal.

Además, los puentes asimétricos, por lo general, dejan de poder equipararse a arcos planos ya para cargas permanentes, mientras que los simétricos puede que sólo se aparten del comportamiento plano para determinadas sobrecargas.

Por lo tanto, una definición compacta de **puente arco espacial** podría ser: ***todo puente arco en el que, por su configuración geométrica y estructural, las cargas gravitatorias generan esfuerzos no contenidos en el plano del arco***.

1.2. Clasificación

Ciñéndonos a la anterior definición, el concepto de arco espacial es muy amplio, ya que recoge infinidad de variables (como se observará en el anejo 1) y la clasificación de los mismos se hace difícil, pues se pueden establecer multitud de criterios para la misma (anejo 1, apartado 4).

Destacaremos a continuación, las dos grandes tipologías en que se pueden dividir los puentes arco espaciales, ya que presentan grandes diferencias tanto morfológicas como desde el punto de vista de comportamiento estructural:

- Arcos nervados: aquéllos puentes cuyo arco tiene una sección transversal tal que funciona como una barra y cuyo comportamiento estructural global es perfectamente analizable mediante modelos de barras espaciales. Pueden estar contenidos en un plano o no, clasificándose en:
    - Planos: para secciones con simetría en el plano del arco se puede separar el comportamiento en el plano y fuera del mismo.
    - No planos: aunque la sección transversal presente simetría en el plano del arco el comportamiento en ambos planos de la misma está acoplado.
- Arcos lámina[1]: aquéllos puentes en los que el arco es asimilable a una cubierta laminar y se comporta estructuralmente como tal.

En las figuras que se presentan a continuación se pueden observar distintos ejemplos de realizaciones que nos ilustran la definición y muestran las amplias

[1] No confundir con puentes arco laminares.

posibilidades de esta tipología. Existen, sin embargo, muchas más variables y ejemplos de realizaciones que pueden consultarse en el anejo 1 del estado del arte.

Figura 1.4- Butterfly Bridge: Dobles arcos nervados planos divergentes con simetría longitudinal. Presentan comportamiento espacial frente a cargas verticales (*Fuente: M. Pollitt, 2000*).

Figura 1.5- Gateshead Millenium Bridge: Arco único, nervado y plano, con tablero curvo. Presenta asimetría longitudinal. En esta realización conjugan muchas variables que definen un fuerte carácter espacial del arco (*Fuente: Johnson and Curran, 2003, p21*).

Figura 1.6- Ripshorst Footbridge: Arco inferior espacial nervado no plano con tablero curvo (*Fuente: J. Schlaich, 2005, p28*).

Figura 1.7- Puente sobre el río Galindo: Arco superior no plano de planta curva impuesta con doble sistema de péndolas (*Fuente: J. Manterola, 2005,p50*)

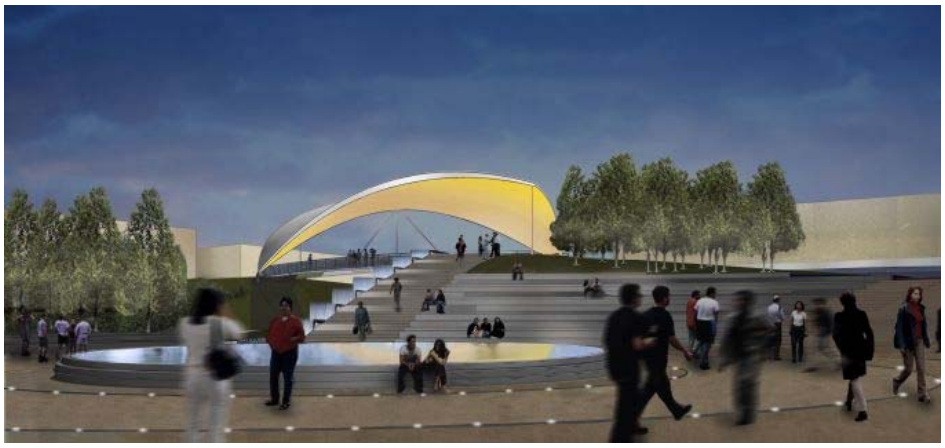


Figura 1.8- Proyecto de StHelier Footbridge en Jersey: Arco làmina (*Fuente Strasky, Husty and Partners, Ltd/Projects, 2003*).

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Estudiar la respuesta no lineal de los puentes en arco espaciales, o bien nervados o bien tipo lámina, así como establecer los criterios de diseño para los mismos tanto en acero como en hormigón.

2.2. Objetivos específicos

- Revisión del estado del arte de los puentes arco espaciales, que se dividirá en:
    - Revisión de las realizaciones existentes dentro de esta tipología de puentes, así como identificación de las distintas posibles variables que pueden condicionar el diseño de los mismos desde un punto de vista estructural.
    - Revisión crítica de las investigaciones y estudios existentes de las distintas soluciones para puentes arco espaciales, su comportamiento estructural, la formulación desarrollada, y las distintas estrategias de cálculo no lineal.
- Elaboración de fichas resumen de una selección de las realizaciones existentes, donde se mostrarán sus dimensiones y parámetros de diseño.
- Modelización en régimen no lineal del comportamiento de los puentes arco espaciales frente a incrementos de carga hasta alcanzar la carga crítica de inestabilidad. Se analizará en función de la variación de distintas variables.
- Estudio de los distintos modos de pandeo en función de las variables estudiadas.
- Análisis crítico de los resultados y obtención de una formulación de proyecto que aproxime el cálculo de la carga crítica de pandeo en esta tipología de puentes.
- Obtención de unos parámetros de diseño para las distintas tipologías de los puentes en arco espaciales, dado el comportamiento estudiado.

3. Estado del arte

Los créditos de investigación tutelados conforman el estado del arte , el cual se ha dividido en dos grandes temas:

- Revisión de las realizaciones y propuestas no construidas dentro de la tipología de puentes arco espaciales.
- Revisión crítica de las investigaciones y estudios existentes dentro de esta tipología.

Para poder encontrar aquella línea de investigación más innovadora y que mejor se ajuste a nuestro interés de estudio, resulta esencial documentar un completo estado del arte que contemple tanto la multitud de variantes en realizaciones existentes y nuevas soluciones, como los estudios de su comportamiento y posibles criterios de proyecto normados o no, así como el estudio de las posibles estrategias de cálculo a emplear en nuestra investigación.

3.1. Realizaciones y propuestas no construidas de los puentes en arco espaciales

Dentro de la tipología descrita, abundan las realizaciones de pasarelas, cuya planta debe ser curva para satisfacer las exigencias de pendiente de las normas de accesibilidad actuales y las estructuras en arco resultan las más adecuadas para sostener dichos tableros curvos para evitar cimentaciones intermedias, cuando nos situamos en luces inferiores a 150m (compitiendo a partir de esta luz con los puentes atirantados).

La mayoría de las realizaciones son en acero, aunque también existen diversos casos de empleo de soluciones mixtas, algunas de hormigón y casos puntuales donde se han empleado materiales innovadores como el acero inoxidable.

En el trabajo de investigación tutelada del estado del arte (anejo 1), se presenta una tabla con todas las realizaciones encontradas. En la tabla se han ordenado las realizaciones por orden alfabético y se indica su ubicación, autor, uso, año de construcción, tipología y fuentes bibliográficas donde no sólo se encuentra la información que consta en la tabla, sino también artículos técnicos más específicos.

Se ha recogido hasta la fecha más de 70 realizaciones y diversos artículos sobre cada una. Se elaborarán fichas de una selección de las realizaciones con sus dimensiones y datos estructurales, constructivos y de análisis más característicos.

Existen multitud de variables que caracterizarán la espacialidad de los puentes arco y con infinidad de combinaciones entre sí.

Las distintas variables y posibilidades de clasificación se definen también dentro del trabajo de investigación tutelada del estado del arte.

3.2. Investigaciones y estudios sobre puentes arco espaciales

En el segundo trabajo de investigación tutelada del estado del arte, se pretende reflejar el estado del arte de todos aquellos estudios relacionados con los puentes arco espaciales desde un punto de vista de comportamiento estructural.

El estudio global de estos puentes contiene tantos casos y variables que el tema de investigación de la tesis se ha de acotar. Sin embargo, de forma previa, se plantea una amplia investigación del estado del arte de esta tipología.

Así pues, el fin de este estudio es, no sólo familiarizarnos con el comportamiento de esta tipología de puentes, sino también detectar aquellos campos en los que todavía quedan vías de investigación abiertas, que podrían aportar datos interesantes para el proyecto de puentes arco espaciales de unas determinadas características.

La revisión crítica de investigaciones y estudios se ha dividido en:

- Revisión crítica de los estudios del comportamiento estructural estático de los puentes arco espaciales nervados en función de distintas variables
- Estudios y ensayos más recientes para la tipología de puentes en arco
- Comportamiento no lineal geométrico y mecánico
- Análisis aproximado de inestabilidad
- Estrategias de análisis

A continuación se presenta un breve resumen de los citados apartados del estado del arte.

3.2.1. Comportamiento estructural de los arcos espaciales nervados en función de distintas variables

En cuanto al comportamiento estructural, se han encontrado estudios que comentan casos concretos de realizaciones y otros que recogen el comportamiento de estos puentes frente a la variación de determinadas variables. Ello, para el caso de un solo arco nervado y un solo tablero, frente a cargas estáticas, permanentes y de sobrecarga. Son de especial interés aquellos trabajos que estudian cómo varían los esfuerzos en función de las distintas variables, pero no se han encontrado estudios sobre todas ellas.

Una de las fuentes a destacar es la tesis doctoral de *J.J. Jorquera (2007)*, en la que se estudia el comportamiento general elástico y lineal de esta tipología de puentes para la variación de: curvatura del tablero, ripado transversal del arco e inclinación del arco para arcos planos *(J.J. Jorquera, 2007)*. Sin embargo, no se han estudiado para todas las posibilidades de vinculación de arco y tablero en extremos (a destacar el caso de bowstring, no contemplado en estos estudios) ni se establecen criterios de predimensionamiento.

Además de los estudios existentes, se ha elaborado un estudio en SAP2000 dentro de los créditos de docencia del programa de doctorado de ingeniería de la construcción. En dicho estudio se ha analizado el caso del Gateshead Millenium Bridge, realización en la que se dan todas las variables estudiadas en el arco plano *(M. Sarmiento, 2008)*.

También se incluye un estudio de péndolas en el que se contempla la disposición de péndolas oblicuas y, en concreto, el caso de los puentes Network *(P. Tveit, 2005)*

Existen diversos estudios sobre la excentricidad de péndolas respecto al centro de esfuerzos cortantes del tablero desde el punto de vista de su efecto en el tablero, pero sin contemplar su efecto en el caso de suspender el puente de un arco.

A modo de resumen, y a rasgos muy generales, debemos destacar la importancia de los esfuerzos transversales que debe resistir el arco en esta tipología, especialmente en arranques, cuando las péndolas se disponen muy tendidas. Ello puede contrarrestarse dando una mayor inercia transversal a las secciones del arco y/o consiguiendo la disposición de péndolas más verticales desplazando transversalmente los arranques del arco respecto a estribos del tablero, lo cual es más eficaz que la disminución de curvatura del tablero *(J.J. Jorquera, 2007)*. Las importantes torsiones y la amenaza de

pandeo por torsión, que se da también en arcos planos clásicos, hace aconsejable el empleo de secciones de arco cerradas.

El empleo de arcos de curvatura impuesta (en los que la planta del arco es curva coincidente con la del tablero, ver Figura 3.1) supone la aparición de esfuerzos transversales que pueden compensarse mediante el empleo de dobles arcos arriostrados, pretensado en la sección del arco o péndolas de contrarresto en el interior de la curvatura (*J. J. Arenas, 1974; M. Aguiló et al, 2004;* Manterola,2005; *J.Strasky, 2005; J.J. Jorquera, 2007*).

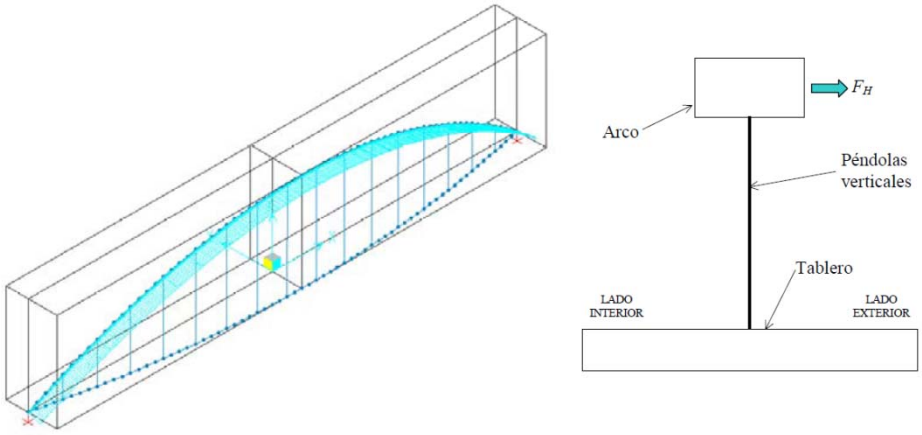


Figura 3.1- Puente arco de curvatura impuesta: Fuerza horizontal F_H descompensada (*Fuente: J.J.Jorquera, 2007, p289*)

En este primer apartado se incluyen también arcos antifuniculares y distintas metodologías de obtención de los mismos. Existen diversas e interesantes teorías de la obtención de antifuniculares (*Swida, 1964*[1]*; S. Rubió, 1952; P. Roca, 2008; Manterola et al, 2000 citado en J. J. Jorquera, 2007; A. Strassner, 1942 citado en J. J. Jorquera, 2007; C. Siegrist, s.f.; Á. Aparicio & J.R. Casas, 2006; D. Billington, 1985; Fernández, Del Ruata & Moisset, 2002; SOFISTIK Formfinding, 2009* y *P. M Bellés et al, 2006*), así como múltiples discusiones sobre la necesidad de su empleo (*J. J. Arenas & M. Pantaleón, 1992 y Santiago Pérez-Fadón, 2002*). Su estudio abre puertas a interesantes soluciones, en las que se prevé profundizar.

En cuanto a los arcos nervados, como se extrae del anejo 2, no sólo existe todavía multitud de aspectos a estudiar de las citadas variables, sino que todavía faltaría estudiar multitud de otras variables que puede comprender esta tipología (citadas en el anejo 1). A destacar, la infinidad de distribuciones de péndolas que podrían ayudar

[1] También en MÖRSCH E.. ***Der Eisenbetonbau II tomo, parte 3ª***, 1947, p.41 referida por Swida.

compensar esfuerzos que determinadas necesidades funcionales, de trazado del tablero y gálibo, generan en el arco.

3.2.2. Estudios y ensayos más recientes para la tipología de puentes en arco

En este apartado se comentan soluciones estructurales bastante innovadoras para las péndolas, arco y tableros, de las que se han encontrado diversos estudios y ensayos de laboratorio. En algunos casos simplemente se observa la existencia de dichos estudios y se plantea como futura tarea la investigación en más profundidad de los mismos.

Una interesante solución frente a las sabidas reacciones horizontales en el terreno que suscita el arco es la combinación del mismo con un tablero de banda tesa (*Strasky, 2008*). Se pueden observar algunos ejemplos en las siguientes figuras:

(a)

(b)

Figura 3.2- (a) Pasarela sobre el río Svratka: banda tesa soportada por arco; (b) Pasarela de McLoughlin Boulevard: banda tesa suspendida de arcos dobles inlinados (*Fuente: Strasky, 2008, pp8 y 12*)

En cuanto a los arcos lámina, se trata de una tipología muy innovadora para la cual prácticamente no existen estudios ni realizaciones construidas, a excepción de algunos trabajos de Strasky no publicados (*Strasky, Husty and Partners, Ltd. (SHP)/ Research)*. Para asegurar la bondad de la solución frente a las cargas puntuales de las péndolas, debería estudiarse en más profundidad analizando algún modelo y tener acceso a los citados estudios. Hasta la fecha se ha llevado a cabo una investigación de la forma. Dado el interés que nos suscita este tema concreto y su marcado carácter innovador, se prevé una profundización en el mismo antes de concretar los objetivos exactos de la tesis.

3.2.3. Análisis aproximado de inestabilidad

Es de destacar la falta de criterios de diseño para esta tipología de puentes en cuanto al análisis de problemas de inestabilidad. Se ha realizado una revisión crítica de la formulación de pandeo para el caso concreto de arcos metálicos, material empleado en la mayoría de realizaciones. La formulación del *Eurocódigo 3 (Parte 2, 2006)* no recoge las diversas posibilidades de distribución de péndolas ni la inclinación de arcos, ni la rigidez del tablero, ni las imperfecciones, ni los efectos de segundo orden, así como tampoco contempla el caso de arcos no planos. Existen fuentes que incorporan la rigidez del tablero (*Capsoni et al, 2009*), y otras las imperfecciones y efectos de segundo orden *(A. A. Correia, 2006)*, para el cálculo de la carga crítica de pandeo, pero todas ellas están orientadas a los arcos planos verticales clásicos y cada una para unas condiciones de vinculación específicas.

De lo anterior se deduce el interés de una formulación que conjugue todos estos criterios para arcos planos, formulación que deberá considerar imperfecciones, efectos de segundo orden y la rigidez del tablero para diferentes tipos de vinculaciones.

En la actualidad, en la universidad de Milán “Politecnico di Milano” se están realizando estudios de puentes reales en análisis no lineal con imperfecciones locales y el primer modo según *Eurocódigo 3 (2006)*. Emplean secciones cerradas caracterizadas por una curva inicial de post-pandeo elástico estable y casi plana, para la que intentan encontrar una expresión analítica aproximada.

Desde un punto de vista de los arcos espaciales, las formulaciones citadas ya no se pueden considerar válidas, ya que están pensadas para arcos con péndolas y cargas contenidas en su plano y en arcos espaciales aparecen cargas en su plano perpendicular ya para cargas permanentes. Además, puede que las péndolas no estén contenidas en el plano del arco. Es más, puede que el arco no esté contenido en un plano. Por ello, resultaría de utilidad estudiar la influencia en el pandeo de las distintas variables de arcos espaciales comentadas en el anejo 1 si se quieren emplear unas fórmulas de predimensionamiento, así como un estudio específico para arcos no contenidos en un plano donde la formulación alcanzará una mayor complejidad.

En vista del interés que podría tener establecer una formulación frente al cálculo de la inestabilidad en arcos no planos como criterios de proyecto, se ha planteado un estudio inicial y se desarrollará en los próximos meses. Se trata del análisis no lineal con grandes deformaciones de distintos puentes arco no planos para obtener la carga crítica de inestabilidad al variar la flecha del arco (comparándolo con el caso plano), la curvatura del tablero, la sección del arco y las condiciones de vinculación en extremos.

3.2.4. Estrategias de análisis

Finalmente, se comentan las posibilidades de cálculo no lineal que ofrecen distintos programas con el fin de elegir el programa que se empleará en esta tesis. Se realiza un ejemplo de solución analítica conocida para establecer la bondad de los distintos métodos de cálculo de no linealidad geométrica que ofrece el programa SAP2000.

El objetivo de esta investigación particular es conocer el comportamiento no lineal global de esta tipología de estructura y nos hemos centrado en el cálculo de inestabilidad por pandeo global, sólo en estructuras de acero, por lo que tiene especial interés la no linealidad geométrica y la introducción de imperfecciones y pasos incrementales de carga.

Se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Para modelizar el comportamiento global de los arcos nervados y tableros tipo viga lo mejor es el empleo de un modelo de barras analizado mediante elementos finitos, sin tener que llegar a discretizar la sección transversal en elementos tipo lámina.

- Sin embargo, para el cálculo de láminas, se hace necesario un análisis mediante elementos finitos tipo lámina, ya que cualquier otra aproximación es muy grosera.

Se ha estudiado la posibilidad del uso de distintos programas, elaborándose una tabla comparativa, y se ha realizado un estudio de un caso con solución analítica conocida para establecer la bondad de distintos métodos de cálculo no lineal

geométrico (NLG). Así se podrá establecer hasta qué carga para un determinado método, los resultados son suficientemente buenos.

4. Líneas de investigación abiertas

Existen multitud de posibilidades de investigación en base al estado del arte existente. A continuación se presentan distintos trabajos que podría resultar interesante plantear como investigaciones de tesis.

Abordar todos los temas que enunciados constituye un trabajo de investigación de mucha mayor envergadura que el de una única tesis doctoral. Se explorarán todos ellos en primera aproximación para centrar la tesis doctoral en aquél que ofrezca mayor interés y mayores posibilidades de investigación.

1) **Línea de investigación 1:**

Arcos espaciales en los que el comportamiento longitudinal y transversal está acoplado. Ello puede ser debido a:

- El arco no está contenido en un plano
- El arco está contenido en un plano, pero la sección transversal no presenta un eje de simetría en el plano del arco

Se ceñirá exclusivamente a los puentes arco nervado de un solo arco y tablero, no considerando los arcos lámina de tipo cubierta objeto de estudio.

El trabajo tratará el estudio de sus posibles disposiciones desde un punto de vista de:

- Vinculación en extremos y clave
- Relación de disposicón arco/tablero (inferior superior e intermedio)
- Geometrías de arco
- Antifunicularidad
- Secciones transversales de arco, tablero y péndolas
- Tablero de banda tesa
- Posibles sistemas de atirantamiento
- Comportamiento no lineal geométrico y del material

El objetivo será el estudio del comportamiento no lineal geométrico y del material, con el fin de establecer unos criterios de dimensionamiento para diferentes relaciones de los parámetros citados y distintas curvaturas.

2) **Línea de investigación 2:**

Los mismos temas enunciados en 1) pero centrándonos exclusivamente en el análisis no lineal geométrico para la obtención de una formulación para la carga crítica de pandeo.

3) **Línea de investigación 3:**

Los mismos temas enunciados en 1) pero analizando la influencia que la respuesta dinámica tiene en la carga crítica.

4) **Línea de investigación 4:**

Arcos espaciales bowstring de tablero inferior en los que el comportamiento longitudinal y transversal está acoplado. Ello puede ser debido a:

- El arco no está contenido en un plano
- El arco está contenido en un plano, pero la sección transversal no presenta un eje de simetría en el plano del arco

Se ceñirá exclusivamente a los puentes arco lineal de un solo arco y tablero, no considerando los arcos lámina como objeto de estudio.

El trabajo tratará el estudio de sus posibles disposiciones desde un punto de vista de:

- Dimensionamiento de secciones transversales de arco, tablero y péndolas para distintos materiales:
    - Acero
    - Acero inoxidable
    - Hormigón
    - Mixta
    - Madera
    - Nuevos materiales plásticos
- Posibles sistemas de atirantamiento
- Comportamiento no lineal geométrico y del material
- Comportamiento dinámico

El objetivo será la comparación de las distintas secciones para una curvatura y geometría dadas en función del material, así como el estudio de su comportamiento

no lineal geométrico y del material, con el fin de establecer unos criterios de dimensionamiento[1].

5) **Línea de investigación 5:**

Optimización del sistema de atirantamiento de péndolas biarticuladas para arcos espaciales:

a. Atirantados al borde de un tablero de planta curva
b. De planta curva impuesta (además de las péndolas se estudiará también el postesado del arco)
c. Contenidos en un plano y girados en planta respecto al tablero recto

Se analizarán 2 tipos de péndola: cables y barras pretensadas y cables de postesado.
Se analizarán para arcos de acero en general.
No se considerarán las péndolas biarticuladas rígidas, ya que el puente tiende al comportamiento de una viga Vierendel.

6) **Línea de investigación 6:**

Comportamiento tanto no lineal geométrico y del material, como dinámico de las pasarelas arco espaciales bowstring con tablero de banda tesa y arco rígido.
Se estudiarán los distintos casos:

- Relación de disposición arco/tablero (inferior, superior e intermedio).
- Posibles sistemas de atirantamiento
- Comportamiento no lineal geométrico y del material
- Comportamiento dinámico

7) **Línea de investigación 7:**

Comportamiento de las pasarelas arco tipo lámina nervada de tipo cubierta con tablero inferior

Se clasificarán en:

- de tipo cubierta con tablero inferior
- tablero como arco lámina

[1] Por ejemplo, para el caso de la solución mixta estudiar en qué medida el hecho de rellenar el arco de acero con hormigón (eg: puente sobre el río Escudo, *Carlos Fernández Casado, S.L en APTA*) mejora la estabilidad del arco frente a sobrecarga después de que éste haya retraído.

El trabajo tratará el estudio de sus posibles disposiciones desde un punto de vista de:

- Vinculación en extremos
- Tablero:
    - Para el caso de arco de tipo cubierta con tablero inferior, existen infinitas posibilidades de disposición del tablero en combinación con arco. Se limitará a un solo caso: el de un solo tablero y recto
- Geometrías de lámina:
    - Nervio vertebrador con comportamiento como arco lineal respecto al tablero y cubierta en voladizo autoportante a compresión
    - Nervio vertebrador con comportamiento como arco lineal respecto al tablero y cubierta en voladizo de lámina flexible
    - Doble nervio vertebrador y cubierta de cables postesados (*Puede ser un tema de por sí, falta profundizar en el estado del arte de este tema*)
    - Estudios de antifunicularidad
- Posibles sistemas de atirantamiento
- Comportamiento no lineal geométrico y del material

8) Línea de investigación 8:

Comportamiento de las pasarelas arco tipo lámina pura con tablero inferior

Se clasificarán en:

- de tipo cubierta con tablero inferior
- tablero como arco y lámina

El trabajo tratará el estudio de sus posibles disposiciones desde un punto de vista de:

- Vinculación en extremos
- Curvatura del tablero; doble tablero inferior; plataformas
- Geometrías de lámina (no olvidar drenaje agua, nieve):
    - Comportamiento de lámina frente a las cargas del tablero: lámina+cargas puntuales
    - Estudios de antifunicularidad
- Posibles sistemas de atirantamiento y optimización

- Puentes cortos bowstring de tablero inferior sin péndolas (lámina pura y tablero como tirante→ riqueza en estudios geométricos)
- Materiales: *En función de la evolución del trabajo, dado la extensión que probablemente implicará, se podría acotar a uno solo.*
    - Hormigón (láminas)
    - Acero (celosías- cubiertas geodésicas)
- Comportamiento no lineal geométrico y del material

9) Línea de investigación 9:

Estudio de la respuesta estructural dinámica de los temas enunciados en 7 u 8.

Se puede apreciar que los ejes de los temas se centran, principalmente, en el análisis de arcos nervados o lámina y, en cada caso, nos podemos centrar en un análisis de variables más del tipo geométrico y estructural o del material. Desde el punto de vista del tipo de análisis, resultarían de interés los análisis de inestabilidad global o dinámicos.

Se decide, frente al estado del arte revisado hasta el momento y dado que nos interesará sacar conclusiones de diseño, realizar un análisis estático no lineal hasta alcanzar la carga crítica de inestabilidad.

Dado el interés geométrico que tiene la tipología y las preferencias personales, se decide que los estudios se centrarán en variables geométricas y estructurales para acero y hormigón, despreciando el uso de otros materiales, que serían un interesante tema por sí mismos en cualquier tipología de puentes.

5. Fuentes de información

Fuentes de búsqueda y bases de datos

www.google.com y Google Academico (http://scholar.google.co.uk/schhp?hl=en&tab=ws

www.structurae.de

http://www.sciencedirect.com

http://www.engineeringvillage.com

http://rebiun.absysnet.com/cgi-bin/rebiun/O7200/ID44c36bc5?ACC=101

TESEO: https://www.micinn.es/teseo/irGestionarConsulta.do;jsessionid=5BADD0344BFC93B8E461870DB91F13A7

Colección de tesis de: http://biblioteca.universia.net

Catálogo de la Biblioteca Rector Gabriel Ferraté

Búsqueda avanzada de revistas de la Biblioteca Rector Gabriel Ferraté, en: http://bibliotecnica.upc.es/revistes/

Búsqueda avanzada en bases de datos de la Biblioteca Rector Gabriel Ferraté

Base de datos COMPENDEX

Base de Datos del SCI.

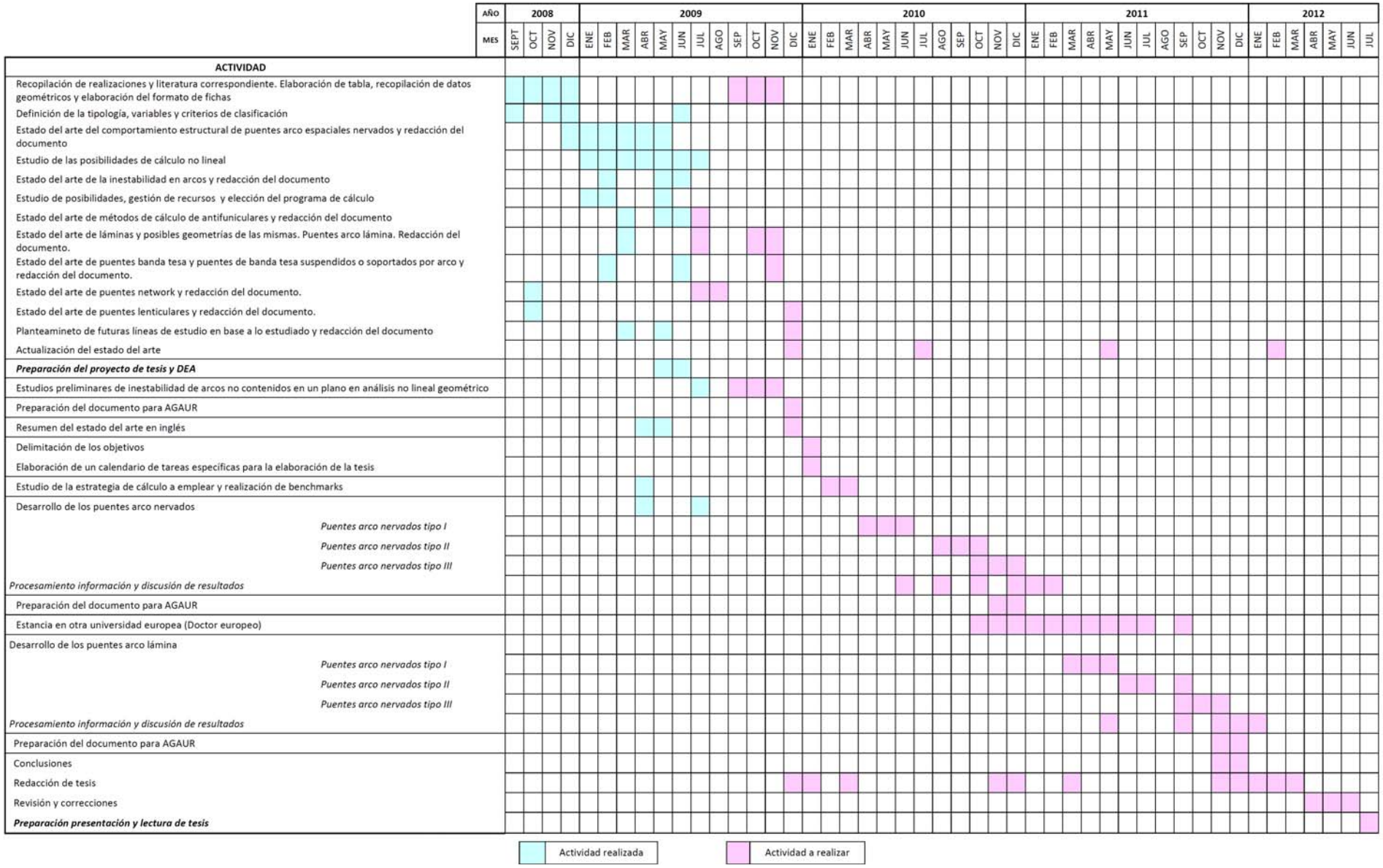
La base de datos del ASCE http://cedb.asce.org/

6. Plan de trabajo

6.1. Temario tentativo de la tesis

1. Introducción
    a. Razón de ser
    b. Antecedentes
    c. Resumen del contenido de la tesis
2. Objetivos
3. Estado del conocimiento
    a. Análisis crítico de realizaciones
    b. Revisión crítica de estudios y ensayos
4. Definición del ámbito de estudio
5. Criterios de análisis estructural
    a. Planteamiento general
    b. Definición de variables
    c. Definición de materiales
    d. Definición de acciones
    e. Definición de combinaciones
6. Puentes nervados tipo I: Efecto de la variable I
7. Puentes nervados tipo II: Efecto de la variable II
8. Puentes nervados tipo III: Efecto de la variable III
9. Puentes lámina tipo I: Efecto de la variable I
10. Puentes lámina tipo II: Efecto de la variable II
11. Puentes lámina tipo III: Efecto de la variable III
12. Conclusiones
13. Futuras líneas de investigación
14. Referencias

6.2. Programa y calendario de actividades



7. Doctor europeo

La tesis se elaborará bajo la supervisión del director Ángel C. Aparicio Bengoechea, catedrático de puentes del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la E. T. S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la UPC de Barcelona y la co-directora Ana Mª Ruiz Teran de School of Computing, IT and Engineering de la universidad East London.

Además, se realizará en el marco de la titulación de doctor europeo, por lo que se redactará en inglés y se realizará una estancia en una universidad extranjera.

Las universidades donde se tiene conocimiento de que están realizando estudios sobre arcos espaciales e inestabilidad de arcos son las siguientes: Politecnica de Milan, Universidad de Vienna, Universidad de Stuttgart, Technical University of Berlin, Agder University en Grimstad y la Universidad Tecnológica de Brno.