Universidad de Oviedo

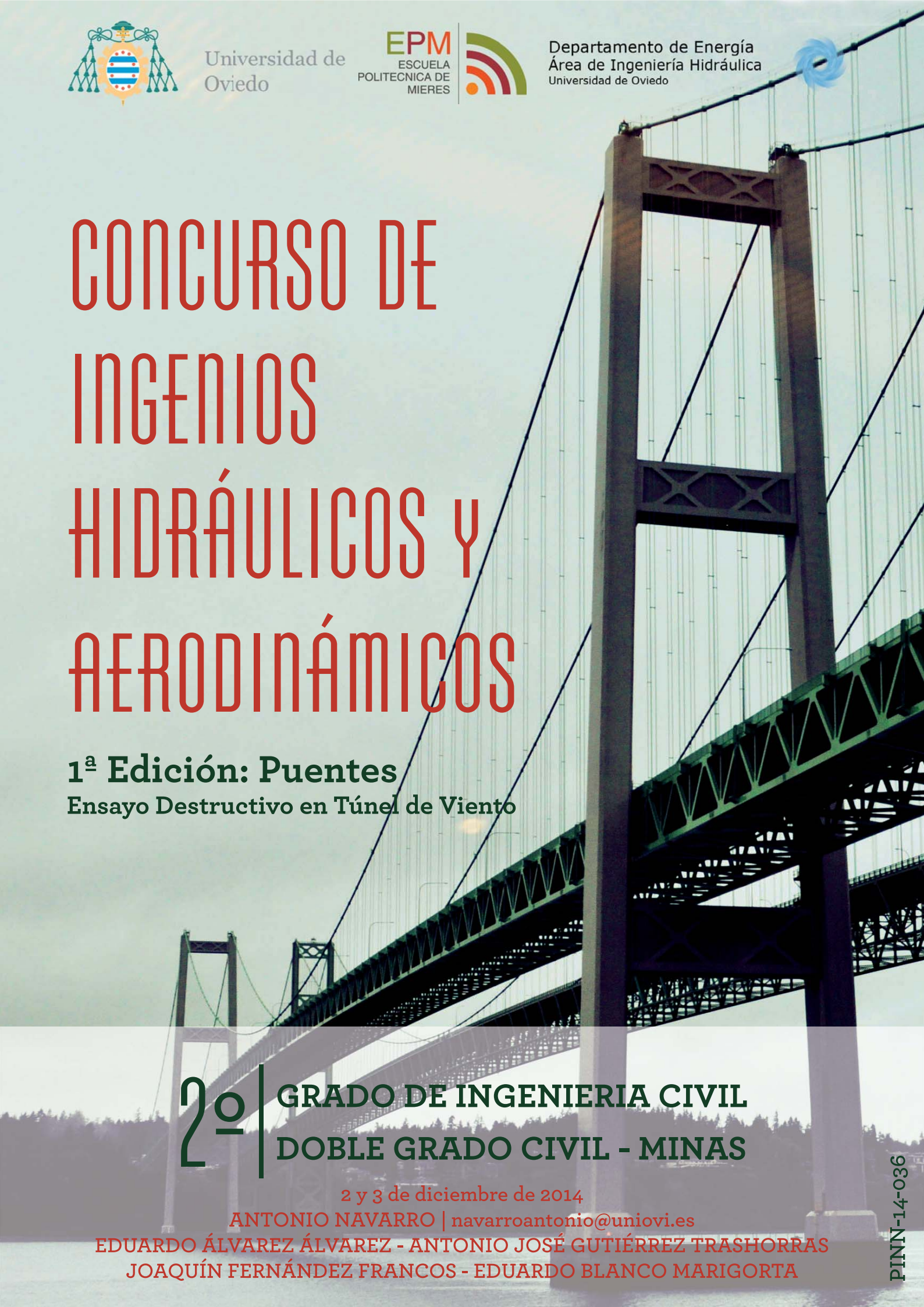
EPM ESCUELA POLITECNICA DE MIERES

Departamento de Energía
Área de Ingeniería Hidráulica
Universidad de Oviedo

CONCURSO DE INGENIOS HIDRÁULICOS Y AERODINÁMICOS

1ª Edición: Puentes

Ensayo Destructivo en Túnel de Viento



2º | GRADO DE INGENIERIA CIVIL
DOBLE GRADO CIVIL - MINAS

2 y 3 de diciembre de 2014

ANTONIO NAVARRO | navarroantonio@uniovi.es
EDUARDO ÁLVAREZ ÁLVAREZ - ANTONIO JOSÉ GUTIÉRREZ TRASHORRAS
JOAQUÍN FERNÁNDEZ FRANCOS - EDUARDO BLANCO MARIGORTA

PINN-14-036

INTRODUCCIÓN

Desde el desastre de Tacoma en 1940 [1], la aerodinámica y la aeroelasticidad han entrado a formar parte de la literatura y los proyectos de puentes, sobre todo en los de grandes luces y flexibilidades elevadas, como son los atirantados y colgantes [2] y [3].

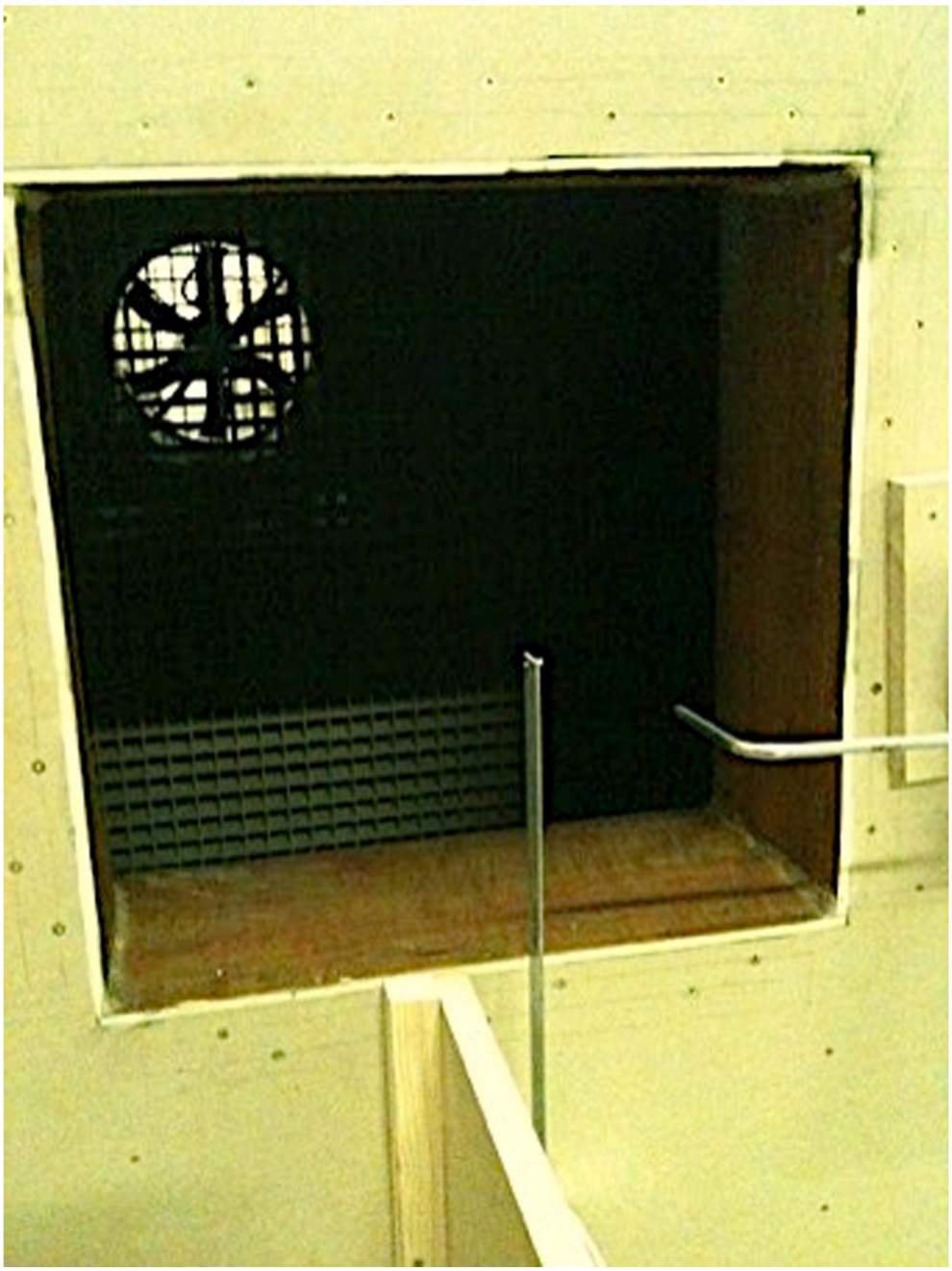
Sin embargo, las normas y códigos estructurales internacionales siguen proponiendo a menudo métodos de cálculo heurísticos con respecto a la acción del viento en las estructuras; con el agravante de que estos métodos pueden estar por encima o por debajo de los límites de la seguridad, en función del fenómeno estudiado y de la tipología estructural concreta. Y sin que sea fácil determinar a priori el signo de la desviación [4], [5], [6] y [7].

Igualmente, estas normativas raramente recogen los estadios más peligrosos o significativos del proceso constructivo de los puentes, sino solo las acciones a considerar a puente terminado [8].

Sin embargo, sí se puede encontrar abundante bibliografía sobre dos tipos de estudios: comparación entre los resultados arrojados por diversas normativas [9]; y sobre las diferencias en los cálculos por medio de Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) en función de la tipología estructural del problema [10] y de diversos parámetros del cálculo numérico mediante volúmenes finitos, como pueden ser, entre otros, el modelo de turbulencia, la forma y el tamaño de mallado, las leyes de muro escogidas, etc. [11].

Todo ello ha resultado en la proliferación de ensayos en túnel aerodinámico, en los que es posible determinar con gran precisión el comportamiento de una estructura frente a la acción (estática y dinámica) del viento [12]; y gracias a los cuales se han generado unas bases de datos (exactas y extensas para determinadas secciones sencillas) que permiten contrastar y validar los valores obtenidos mediante simulación numérica por ordenador. Esta técnica de ensayo experimental y cálculo con un modelo numérico contrastado (al igual que en la parte estructural) recibe el nombre de Ingeniería Híbrida [13].

El Departamento de Energía de la Universidad de Oviedo cuenta con cuatro túneles aerodinámicos, con diferentes prestaciones, para la realización de ensayos de aerodinámica civil [14]. En la página siguiente se observa la sección de entrada y la cámara de salida, tras la tobera de la cámara de remanso, del Túnel MEB_2. Algunos de los trabajos realizados pueden verse en [15], [16] y [17].



BASES DEL CONCURSO

1) Consiste en realizar el **diseño de un puente** colgante o atirantado, a escala longitudinal 1/1000 (aproximadamente) y 1/10000 transversal (también aproximadamente), dentro de los parámetros que se indican en el apartado "Algunos datos, Materiales, Tipología, Dimensiones", de tal forma **que soporte una carga repartida total de 5 kg y una velocidad de viento máxima de ensayo 25 m/s.**

(Nota 1: Si se apuran los rangos máximos de dimensiones, queda una estructura "distorsionada" con una relación de escalas longitudinal/vertical de 1/10. Esto nos permitirá encajar varias tipologías estructurales, con un criterio estético y económico más bien laxo, pero suficiente).

(Nota 2: Es imprescindible cumplir con ciertos criterios de "ortodoxia" a la hora de fabricar los diseños: la maqueta debe parecerse a un puente, tener la sección típica de un puente, y el esquema estructural coherente con las cargas que el puente debe soportar (peso propio, sobrecarga y viento). A tal efecto, será obligado el paso de un vehículo a escala por el tablero, y de una embarcación por debajo. En el caso de presentar soluciones estructurales altamente innovadoras (lo cual se agradece) es imprescindible justificar el correcto funcionamiento estructural de la misma mediante un pequeño anejo de cálculo.)

2) El objetivo es **conseguir que una maqueta de dicho diseño soporte la acción aerodinámica del viento sin llegar al colapso** (ELU: desprendimiento de la cimentación, rotura de cables y/o tablero) **y sin superar un estado límite admisible de deformaciones y/o vibraciones** (ELS: aproximadamente del orden de dimensión del ancho y canto del tablero, para movimientos horizontales y verticales, respectivamente). Además, **el puente debe recuperar la forma original una vez cese la acción del viento.** Durante el ensayo se alcanzará la velocidad máxima de 25 m/s y el puente se encontrará sin sobrecarga.

3) Académicamente, se pretende **que los participantes profundicen por su cuenta** en un fenómeno relativamente complejo, relacionado con la asignatura Hidráulica e Hidrología de 2º de Ingeniería Civil.

4) El **Jurado**, formado por profesionales de reconocido prestigio en el ámbito de la Ingeniería Civil, se reserva la potestad de catalogar a los modelos dudosos como "esperpento estructural" o "engendro estructural" (E2, en cualquier caso, ver Nota 2), que no podrán ser ensayados. Igualmente, el Jurado puede proceder a la disección de los modelos que presenten serias dudas por incumplimiento de los criterios de rigidización indicados posteriormente ("Algunos datos"). La deliberación final del Jurado se realizará al acabar los ensayos, y el resultado se dará a conocer el día de la entrega de premios; siendo su decisión inapelable (obviamente).

5) El **premio** consiste en una nota positiva en la asignatura para todos los participantes, de acuerdo a los criterios recogidos en la guía docente; así como la entrega de una placa conmemorativa a los 3 primeros clasificados. La Organización ha cerrado el patrocinio con 5 empresas (ver dorso de estas Bases) a los cuáles agradecemos su colaboración. En esta primera edición se repartirán 500 € en premios para los ganadores.

Fecha y lugar

- Presentación de los modelos y atención a los medios: **martes 2 de diciembre de 2014, 13:30 h. E.P.M**, hall principal. En este mismo acto, el Jurado admitirá a concurso los modelos presentados que cumplan con la normativa de estas Bases.

- Ensayo (posiblemente destructivo) de los modelos y veredicto del Jurado: **miércoles 3 de diciembre de 2014, a partir de las 16:00 h. Edificio Departamental Zona Este, Módulo 2, del Campus de Viesques, E.P.I. Gijón.**

- Entrega de premios: **martes 9 de diciembre de 2014, 13:00 h. E.P.M, sala de Grados.**

Requisitos y disponibilidades

- Grupos de hasta 4 alumnos, como máximo. **Será necesario rellenar la ficha de inscripción que acompaña a estas Bases y enviarla por correo electrónico antes del día 30 de noviembre de 2014.** Las Bases y la ficha se encuentran disponibles en el Campus Virtual de la asignatura.

- Cada grupo presentará un **breve informe** de la estructura diseñada y realizará un ensayo del modelo en túnel aerodinámico, hasta una velocidad máxima de 25 m/s.

- La Organización dispondrá (además del túnel, claro) una mesa para el anclaje de los modelos, frente a la sección de salida del túnel, debiendo venir provistos aquellos de las correspondientes zapatas. La Organización no se hace responsable de los desperfectos que los trozos de las maquetas puedan causar, por alguna extraña razón, a bienes y/o personas. Se podrá usar cualquier tipo de EPI que los participantes estimen oportunos.

- Para realizar los cálculos del coeficiente de arrastre estimado, fuerza sobre los modelos, desplazamientos máximos, etc., se podrá utilizar cualquier sistema y programa informático que los participantes puedan conseguir[1]. Es útil el uso de la IAP 11 [18].

- Lamentablemente, las instalaciones del laboratorio no serán accesibles hasta el día en que se proceda a efectuar los ensayos. No obstante, se apunta

[1] Se advierte que los cálculos son de por sí bastante complicados, sin necesidad de utilizar un ordenador…

como idea la posibilidad de realizar pruebas con un ventilador “casero”; no sería la primera tesis doctoral que se lee con este “sofisticado” sistema. El tiempo estimado para la fase de diseño es una variable totalmente indeterminada. En cambio, el modelo puede construirse en una tarde.

Informe

Es conveniente entregar un breve informe explicando la tipología elegida, los cálculos (fuerza y coeficiente de arrastre, por ejemplo) y consideraciones efectuadas, el método constructivo empleado, así como cualquier otra circunstancia que pudiera ayudar al Jurado a dirimir posibles empates entre los participantes (por ejemplo, si dos maquetas soportan la velocidad máxima de 25 m/s cumpliendo los ELS y ELU definidos anteriormente). En la primera página del informe deberán constar los nombres de los miembros del equipo y el nombre del puente.

ALGUNOS DATOS

Materiales:

- **Tablero: cartón** de un espesor no superior a 1 mm (lo que técnicamente se denomina cartón "de caja de zapatos").

- **Torres** o mástiles: largueros de **madera** (por ejemplo, de aeromodelismo) con cuadradillo no superior a 30 mm.

- **"Soldaduras":** cualquier unión estructural se debe materializar con **cola blanca.**

- **Cables**, péndolas y demás elementos de suspensión: **hilo** de algodón, lana o nylon, de diámetro no superior a 1mm. Para las orejetas de cuelgue, se pueden utilizar pequeños clavos, arandelas, etc.

- **Cimentación**: la placa de cimentación de las torres puede consistir en una chapa corrida de **ocumen** o de **conglomerado**, con cantos desde 0.5 cm hasta los 2 o 3 cm.

Tipología estructural:

Se debe construir un puente **colgante** o **atirantado**, con las dimensiones descritas en las presentes Bases.

Se puede elegir una tipología de dos torres con vano central más dos vanos de compensación; o bien la tipología de torre única dispuesta en el centro de la estructura. Incluso sería posible el diseño de un arco **"bowstring"**. En cualquiera de los citados casos, **no se dispondrá de apoyo en estribos**, debiendo quedar **el tablero totalmente suspendido.**

La condición de suspensión total implica también que **el tablero no puede apoyar (ni tocar) en las torres, mástiles o arco;** debiendo asegurar también un **gap** horizontal y longitudinal de al menos 1 cm entre los bordes de tablero y la torre.

El anclaje de las torres a la cimentación se podrá hacer mediante tornillo, pasante, pequeñas escuadras, pegado, empotramiento, etc.

Tipología de la sección transversal:

La **sección transversal** se puede diseñar de múltiples formas, bien desde el punto de vista de las secciones metálicas mixtas, de hormigón, incluso ortótropas.

Así, se pueden plantear secciones cajón mono o multicelular, secciones de celosía, secciones de alma llena, secciones bijácena, viga o multiviga, con o sin jabalcones para el soporte de la calzada.

Para las **torres**, las posibilidades son también variadas: mástil único o doble, vertical, en forma de A, transversal o longitudinal al tablero... Y los **arcos** pueden ser dobles arriostrados o sin unión, simples, centrados o inclinados...

Se prohíbe expresamente el uso de rigidizadores interiores (a excepción de las almas, debidamente justificadas, en secciones cajón multicelulares), así como el uso de lastres no estructurales. Igualmente se prohíbe el uso de sucesivas capas de cartón y/o pintura una encima de otra, con el único objeto de añadir peso o rigidez a la viga.

Dimensiones:

Los esquemas que siguen muestran los límites geométricos de la estructura a construir (con los materiales indicados anteriormente):

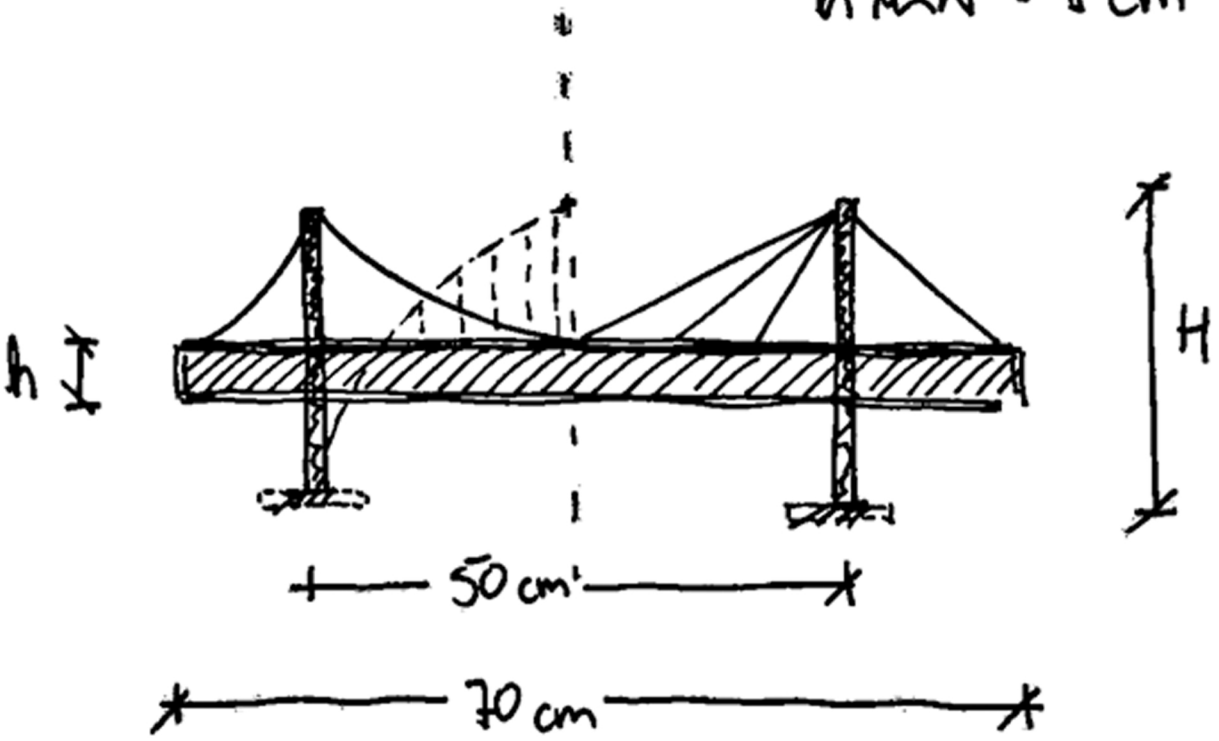
SECCIÓN DE LA CÁMARA DE ENSAYO (70 × 70 cm)

$H_{MÁX} = 30$ cm

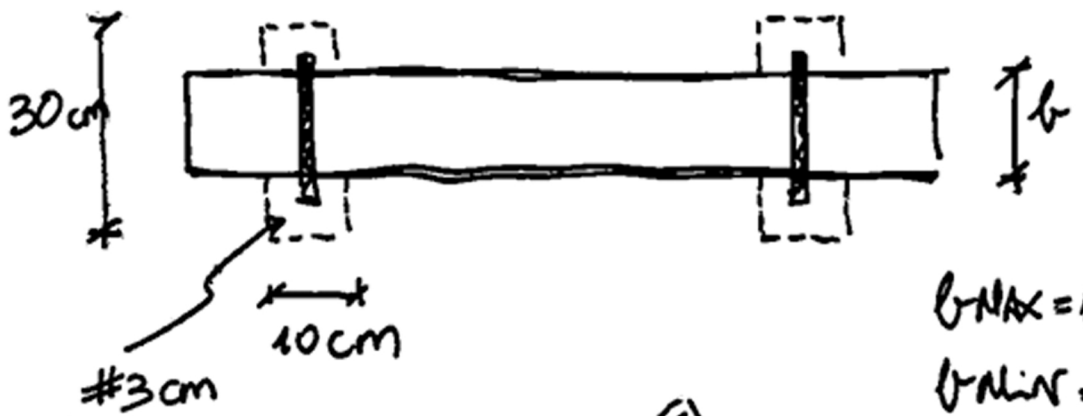
$h_{MÁX} = 5$ cm

$h_{MÍN} = 1$ cm

ALZADO:



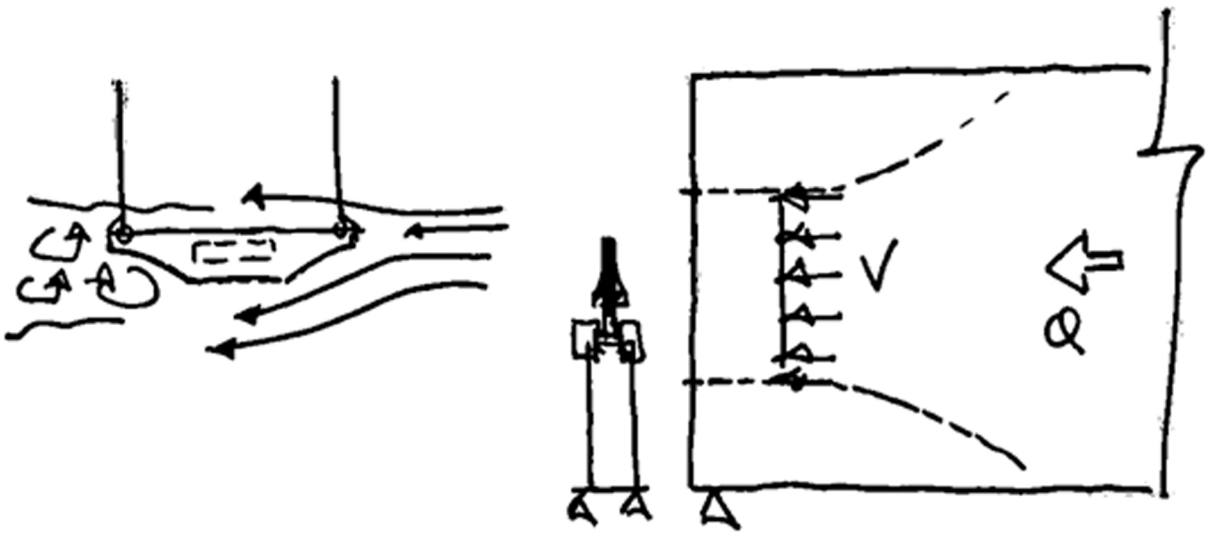
PLANTA:



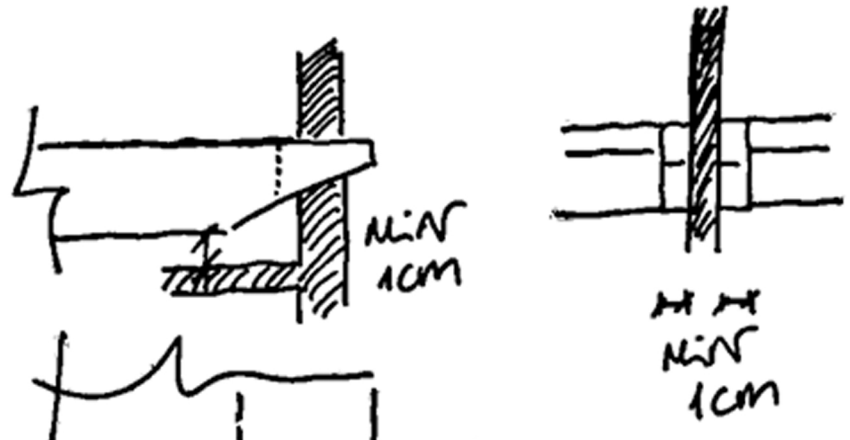
$b_{MÁX} = 15$ cm

$b_{MÍN} = 10$ cm

SECCIÓN:



DETALLE DEL PASO DE LA TORRE/MÁSTIL A TRAVÉS DEL TABLERO



GAP MÍNIMO CON EL PUENTE CON SOBRECARGA (5 KP)

CÁLCULOS

Consideraciones filosóficas

Esta es la parte realmente "divertida" del Concurso. Si alguno tiene la idea de que esto es como el empuje hidrostático del agua sobre una pared más o menos vertical... está muy equivocado. El aumento del grado de complicación entre los cálculos de aeroelasticidad y la ley triangular de presiones es similar al que hay entre integrar y contar con los dedos.

En este apartado no se muestran soluciones, sólo se remite a el planteamiento de algunas de las ecuaciones (ver [19]). Después de unas cuantas hipótesis bastante aceptables, se llega a tres bloques de sistemas de ecuaciones diferenciales, tercamente implícitas y catadura poco lineal, con alguna integral de estraperlo. Para acabar de estropear las cosas, se sabe de antemano que la solución no es única. A pesar de ello, lo realmente corrosivo para la moral es que el puente puede salir volando por muchos otros detalles: que el ventilador esté mal calibrado, que los modelos tengan pequeñas imperfecciones geométricas, que el sistema de cuelgue sea demasiado rígido o demasiado flexible, que podamos estar descubriendo algún nuevo tipo de inestabilidad aeroelástica... (se empieza a notar ya alguna diferencia con los problemas tipo de clase...?).

Lo que hay que hacer, con respecto a esto último, es pensar todo lo que puede salir mal y buscar soluciones y procedimientos para corregirlo o minimizarlo.

Sobre las ecuaciones, todo es válido para obtener una solución, hasta llamar al primo que trabaja en la NASA, MIT o similar (no lo hagas porque le pondrás en un buen aprieto y te jurará odio eterno). Si no se maneja un ordenador, e incluso así, habrá que utilizar hipótesis y métodos de cálculo simplificados. La gracia está en elegir los que facilitan la solución sin comprometer el cálculo. Como regla general, cuanto más se desarrolle una ecuación y se profundice en el sentido físico antes de "cortar", más exacta va a ser la solución.

En todo este proceso es importante tener una idea de cuales son los ordenes de magnitud de los distintos términos de las ecuaciones. No es lo mismo, por ejemplo, considerar constante en el tiempo un término que varía entre 35 y 38 (unidades del SI) cuando los demás términos están alrededor de 250 (esta sería una hipótesis muy justificable), que intentar tomar el valor medio de una variable que oscila entre 420 y 0 cuando sólo hay otro término en la ecuación y además en la relación aparece una raíz cuadrada (este delito está tipificado en el código penal Art. 347 p. 65.4 y castigado con pena desde tres años y un día a quince años).

Otra noción interesante es que se van a tener más incógnitas que ecuaciones, y, por supuesto, los datos de partida son más bien escasos. Hay

un montón de soluciones posibles y habrá algunos de los valores que tendremos que fijar fiándonos en nuestro instinto. Por ejemplo, un tablero muy esbelto con poco canto (poca rigidez) es posible que tenga un comportamiento aerodinámico mejor que uno rígido (al menos en cuanto arrastre, ya veríamos que pasa con la sustentación). En cambio, dicho tablero flexible implica que la rigidez estructural la debe aportar el sistema de atirantamiento o cuelgue. Otra variable no menor es atinar con el diseño de la torre que proporcione al sistema de cuelgue o atirantamiento la rigidez necesaria según la consideración anterior (aquí se empieza a vislumbrar la responsabilidad de tomar decisiones).

Arrastre aerodinámico

Todo cuerpo que se mueve por un fluido experimenta una fuerza de arrastre, en sentido contrario al movimiento, que se puede expresar como:

$$F_D = \frac{1}{2}\rho \cdot V^2 \cdot A \cdot C_D$$

Donde

ρ: densidad del fluido (aire)

V: velocidad del cuerpo

A: área frontal

CD: coeficiente de arrastre

Análogamente se podrían definir un coeficiente de sustentación (fuerza en sentido perpendicular al tablero del puente) y uno de momento (momento contenido en el plano de la sección transversal del puente). Finalmente, en ciertos diseños puede cobrar especial relevancia el momento de cabeceo y viraje (en planos que contienen al tablero, el uno vertical y el otro horizontal). No se tiene constancia hasta la fecha de arrastre longitudinal del tablero cuando el viento sopla perpendicular al mismo.

El coeficiente de arrastre es un valor experimental que depende fundamentalmente de la forma del cuerpo, y también del nº de Reynolds, aunque no se va a tener en cuenta, ya que para cuerpos romos inmersos en una corriente de aire se produce separación de la estela para los tableros típicos, y el arrastre es relativamente independiente del Re. Los valores normales varían entre 0.3 y 1.8 según la forma de la sección transversal (de más a menos fuselada).

SOBRE AERODINÁMICA CIVIL Y AEROELASTICIDAD

Se indican algunas referencias útiles para realizar los diseños: las numeradas aparecen citadas en las presentes Bases, y las que están en negrita se consideran especialmente ilustrativas. Aquí se pueden encontrar ideas sobre la tipología estructural de puentes de gran vano y sobre el comportamiento aerodinámico de los mismos. Obviamente, no es necesario ver todas ni, mucho menos, comprar alguna.

[1] Scott, R. "In the wake of Tacoma. Suspension Bridges and the Quest for Aerodynamic Stability". ASCE Press. Virginia. E.E.U.U. 2001.

[2] Meseguer, J., Barrero, A. y Alonso, G., "Ensayos Aeroelásticos de Puentes en Túneles Aerodinámicos", Hormigón y Acero, VOL 61, nº 256, pp. 71-81. 2010.

[3] León Alonso, A. "Análisis aeroelástico de Puentes soportados por cables en el dominio del tiempo y la frecuencia". Tesis Doctoral, E.T.S.I.C.C. y P., Universidad de la Coruña. 2008.

[4] Ministerio de Fomento. "Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera – IAP". 1998.

[5] D´Harve, R., et al, "Recommendations for Calculating the Effects of Wind on Constructions", ECCS-TC12-.1987.

[6] EN 1991-1-4, Eurocode 1: "Action on structures. Part 1-4: General actions-Wind actions". 2005.

[7] Ministerio de Vivienda, Código Técnico de la Edificación (CTE). "Seguridad Estructural: Bases de Cálculo y Acciones en la Edificación". Libro 2. 2006.

[8] Stathopoulos, T. and Baniotopoulos, C. C., "Wind effects on Buildings and Design of Wind-Sensitive Structures", Ed. Springer 2007.

[9] Ortega M., Lacoma L.M., and Holman, D.M., "Análisis de Acciones de Viento, en Edificios Singulares. Aplicación al Hotel Vela de Barcelona", Hormigón y Acero, VOL 60, nº 251, pp. 37-64. 2009.

[10] Coz J.J., Nieto P.J., González J.A. and Martín A., "Numerical Analysis of the Pressure Field on Curved and Open Self-Weighted Metallic Roofs due to the Wind effect by the Finite Volume Method", Appl. Math. Comput., 209 (1), pp. 31-41. 2009.

[11] Blazek, J., "Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications", Elsevier Science, Amsterdam, 2006.

[12] Davenport, A.G., "Wind Tunnel Testing: a General Outline", Wind Engineering Group of The University of Western Ontario, Canada, 2007.

[13] del Coz Díaz, J., Gencel, O., Álvarez Rabanal, F.P., Suárez Sierra, J.L., Guerrero Muñoz, J., Suarez Sierra, R, Suarez Domínguez, F.J., Martín Rodríguez, A., García Nieto, P.J., Alonso, M. and Navarro-Manso, A. "Hybrid Engineering: Testing and Simulation in the Civil Engineering Construction Field". International Construction Congress 2012. Isparta, Turkey. 2012.

[14] ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice nº.67. "Wind Tunnel studies of Buildings and Structures". Virginia, U.S.A. 1999.

[15] García P.J., Coz J.J., Castro D. and Ballester F., "Numerical Simulation of the Performance of a Snow Fence with Airfoil Snow Plates by FVM", J. Comput. Appl. Math., 234, pp. 1200-1210. 2010.

[16] Navarro-Manso, A., Coz, J.J., Castro, D., López, M.C., Navarro, A. and Simón-Talero. "Analysis of a swing Footbridge over Nalón River by means of CFD and DOE". J. V Structures International Conference (ACHE). Publication number: ISSN/ISBN 978-84-89670-73-0, vol 1. Barcelona, Spain. 2011.

[17] Universidad de Oviedo, Área de Ingeniería de la Construcción. "Estudio aerodinámico de la Pasarela en la desembocadura del Río Nalón, España". Ref. CN-11-042. Gobierno del Principado de Asturias. 2011.

[18] IAP-11. Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera. Ministerio de Fomento, Gobierno de España.

[19] Apuntes del Dr. Pedro Fernández Díez:

http://files.pfernandezdiez.es/MecanicaFluidos/PDFs/07MecFluidos.pdf

http://files.pfernandezdiez.es/MecanicaFluidos/PDFs/06MecFluidos.pdf

Leonhardt, Fritz (1991), Brücken - Ästhetik und Gestaltung, Deutsche Verlag Anstalt, Frankfurt/M, Alemania.

http://en.structurae.de. Base de datos mundial de estructuras, y en concreto puentes.

Fernández Troyano, L. "Tierra sobre el agua". Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Colección de Ciencias Humanidades e Ingeniería Nº55. Visión histórica universal de los puentes.

Apuntes de puentes, ETSICCP, Universidad de la Coruña:

http://caminos.udc.es/info/asignaturas/622/

Akesson, B. "Understanding Bridge Collapses". Taylor & Francis, London. 2008.

Ricciardelli, F., de Grenet, E.T. and Hangan, H. "Pressure distribution, aerodynamic forces and dynamic response of box bridge sections". J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 90, 1135–1150. 2002.

Schewe, G. and Larsen, A. “Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section”. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 74-76, 829–838. 1998.

White, F.M. “Fluid Mechanics”. Mc Graw-Hill. 5th edition. 2003.

Luca Bruno, L. and Fransos, D. “Edge degree-of-sharpness and integral length scale effects on the aerodynamics of a bridge deck”. BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications Milano, Italy, July, 20–24. 2008.

Galionis, I. “On the linear instability of spatially varying incompressible flows”. PhD. Imperial College of Science, Technology & Medicine. London. 2003.

Barrero Gil, A., Alonso Rodrigo, G., Meseguer Ruiz, J. and Astiz Suárez, M.A. “Ensayos en túnel de viento de un modelo aeroelástico del arco del puente sobre el río Tajo Arcos de Alconétar”. Hormigón y Acero, nº 245 3er Trimestre. ACHE. Madrid. 2007.

Blaise, N. and Denoël, V. “Principal static wind loads”. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn. 113, 29-33. 2013.

Nieto Mourente, F. and Hernández Ibáñez, S. “Análisis de sensibilidad y optimización aeroelástica de puentes colgantes en entornos de computación distribuida”. Tesis Doctol. E.T.S.I.C.C. y P. Universidad de La Coruña. 2006.

Por último, no hay que olvidar que, cuando todo lo demás falla, siempre queda la posibilidad de cerrar los ojos y confiar en la Fuerza.

Universidad de Oviedo

EPM ESCUELA POLITECNICA DE MIERES

Departamento de Energía
Área de Ingeniería Hidráulica
Universidad de Oviedo

PATROCINADORES

AST INGENIERÍA

COPROSA GRUPO

FCC

Ogensa

RJB

TaPusa

2 y 3 de diciembre de 2014

ANTONIO NAVARRO | navarroantonio@uniovi.es
EDUARDO ÁLVAREZ ÁLVAREZ - ANTONIO JOSÉ GUTIÉRREZ TRASHORRAS
JOAQUÍN FERNÁNDEZ FRANCOS - EDUARDO BLANCO MARIGORTA