

ESTUDIO AERODINÁMICO DE UN TABLERO DE PUENTE DURANTE LA CONSTRUCCIÓN POR EMPUJE

Sandra Fuentes Alonso*, Eduardo Blanco Marigorta, Antonio Navarro-Manso

*UO233571@uniovi.es

Departamento de Energía. Universidad de Oviedo.

RESUMEN

En este trabajo se ha estudiado, en un túnel de viento, el comportamiento aerodinámico de las diferentes configuraciones de un tablero de puente, obtenidas en un nuevo sistema de lanzamiento continuo para puentes metálicos. Para determinar el coeficiente de arrastre característico de cada sección, se han medido las fuerzas aerodinámicas en modelos a escala reducida. Con el fin de contrastar y completar los estudios experimentales, se ha realizado también una simulación numérica de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), utilizando el software comercial ANSYS FLUENT 14.5. Las formas estudiadas son cuerpos romos donde el flujo sufre una separación brusca en determinadas aristas. Estos cuerpos, tienen estelas amplias con vórtices fuertes que, a menudo, generan fenómenos no estacionarios. Estos fenómenos se manifiestan en fuertes oscilaciones de las velocidades, las presiones y, por tanto, de las fuerzas del aire sobre la estructura. Con las medidas y simulaciones realizadas, se realiza una comparación de los resultados experimentales y numéricos, así como un análisis de los campos de velocidades y presiones que genera cada una de las formas. También se estudian, de forma parcial, los fenómenos transitorios que se generan.

ABSTRACT

The aerodynamic behavior of the different configurations of a bridge deck, obtained in a new continuous launching system for steel bridges, has been studied in the wind tunnel. The aerodynamic forces of the scale models of each section have been obtained with the aim of determinate its drag coefficient. In order to confirm and complement the experimental studies, a numerical Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation has also been performed with the commercial code ANSYS FLUENT 14.5. The shapes studied have a bluff body behavior, with sharp flow separation in the corners. These bodies have broad wakes with strong vortices which often generate unsteady phenomena. These phenomena arise as strong fluctuations of velocity and pressure and, therefore, the forces of the flow on the structure. With the measurements and the simulation, a comparison of the experimental and numerical data is performed, and also the analysis of the velocity and pressure fields caused by each shape. Furthermore, the unsteady phenomenon is partially studied.



1. INTRODUCCIÓN

Desde que la acción del viento indujera al puente de Tacoma Narrows al colapso estructural en 1940 [1], la aerodinámica y la aeroelasticidad han adquirido un protagonismo especial en la literatura y los proyectos de puentes. Especialmente en aquellos de grandes luces y flexibilidades elevadas, como los atirantados y colgantes [2-3].

En consecuencia, a día de hoy, la gran mayoría de normas y códigos estructurales internacionales incluyen diversos métodos de cálculo para cuantificar la acción del viento sobre las estructuras. Sin embargo, los coeficientes y criterios sugeridos en la norma son aún demasiado genéricos y así, en el caso de estructuras singulares con fuerte exposición a efectos aerodinámicos, la acción del viento cuantificado a partir de las normas se aleja sustancialmente de los valores reales, oscilando sobre el límite de seguridad en función del fenómeno estudiado y de la tipología estructural concreta, sin que sea fácil determinar a priori el signo de la desviación [4-7]. Esto ha traído consigo la publicación de diversos trabajos que examinan las diferencias entre las distintas normativas, haciendo especial hincapié en las contradicciones existentes entre las mismas [8].

En contraposición al enfoque generalista de la normativa, en los últimos años se ha publicado abundante literatura abordando la problemática por medio de la mecánica de fluidos. Tanto por medio de la Dinámica Computacional de Fluidos (CFD) como por medio de ensayos experimentales en túnel aerodinámico, y especialmente por la combinación de ambos, en lo que se conoce como Ingeniería Híbrida [9].

En lo que al CFD se refiere, se ha abordado el problema habitualmente en función de su tipología estructural [10] y de los parámetros intrínsecos al cálculo numérico por volúmenes finitos como el modelo de turbulencia o la forma y el tamaño del mallado [11]. Mientras que por medio de los ensayos en túnel aerodinámico es posible determinar con gran precisión el comportamiento de una estructura frente a la acción (estática y dinámica) del viento [12]; lo que ha permitido

generar amplias bases de datos para diversos modelos de secciones que posibilitan el posterior contraste y validación de los valores obtenidos mediante simulación numérica por ordenador.

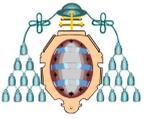
Sin embargo, el efecto del viento durante el proceso constructivo de los puentes no ha recibido la atención suficiente hasta el momento. Ni en la normativa, donde la información al respecto es casi inexistente, ni entre la comunidad científica [13].

Desde el punto de vista aerodinámico y aeroelástico goza de especial interés el sistema de construcción de puentes por empuje (figura 1). La finalidad de la construcción de puentes mediante lanzamiento reside en minimizar la interacción con el emplazamiento del mismo, reduciendo la afección al medio y disminuyendo el personal en obra. Los avances en estas técnicas buscan, entre otras mejoras, ampliar las longitudes de vano, reduciendo así el número de pilares y la afección al medio inmediatamente inferior. Esto conlleva la construcción de estructuras (para ser lanzadas) extremadamente esbeltas, ligeras y flexibles, en las que las dimensiones de la sección son sustancialmente más pequeñas que la longitud del vano, aumentando así su sensibilidad a la acción del viento.



Figura 1 - Viaducto sobre el Río Caroní, Venezuela, primer puente "moderno" construido por empuje.

Con el nuevo sistema de lanzamiento de puentes metálicos (figura 2) patentado por los Grupos de Investigación GICONSIME, de la Universidad de Oviedo y GITECO, de la Universidad de Cantabria, es posible empujar vanos de hasta 150 m. de luz, sin medios



auxiliares y aprovechando la propia estructura del puente sin incrementar su coste [14].

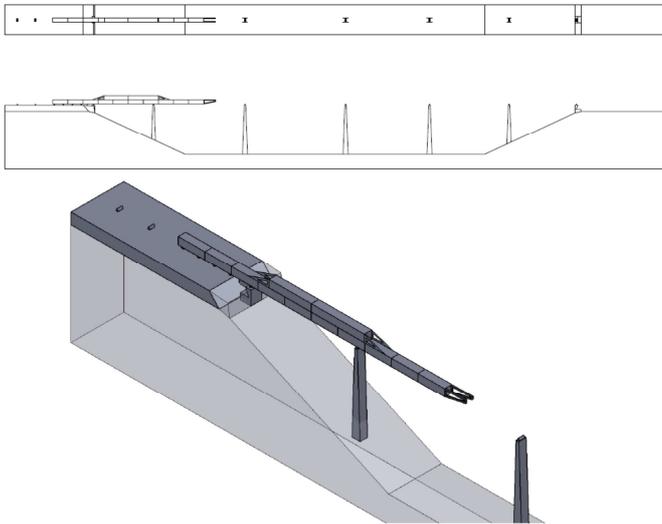


Figura 2 - Nuevo método de lanzamiento de puentes.

Esta nueva metodología exige examinar la acción del viento sobre parámetros de sección diferentes a las tipologías de puente conocidas; y las grandes longitudes de vano que se alcanzan durante la misma obligan a considerar con especial atención el comportamiento aerodinámico y aeroelástico de la estructura.

En el presente trabajo se analiza experimental y numéricamente la influencia aerodinámica sobre las secciones geométricas características de la construcción de un puente por este nuevo sistema de empuje. Los resultados obtenidos en el túnel aerodinámico concuerdan razonablemente bien con los extraídos a partir de los modelos numéricos y las diferencias son discutidas y razonadas.

2. MODELOS GEOMÉTRICOS

Las geometrías analizadas representan un modelo a escala 1:100 de las geometrías reales del cajón del puente. Estas se pueden dividir en dos bloques: geometrías con cajón en U (almas verticales) y cajón en V (almas inclinadas), tal y como se puede apreciar en la figura 3.

Para la geometría en U se realizan tres modelos: cajón simple con un ancho de 7 cm y altura de 7 cm con la parte superior abierta (Fig.

3a); cajón simple con losa superior de 24 cm de ancho (Fig. 3b) y doble cajón, constituido por dos cajones simples situados uno sobre otro, conteniendo ambos la zona de apertura en la parte superior (Fig. 3c).

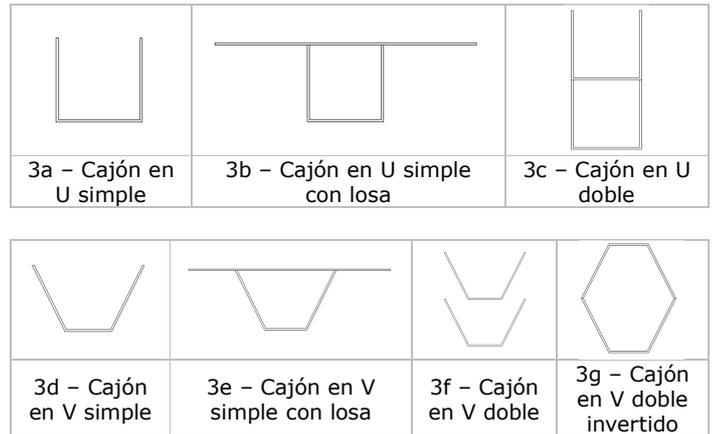


Figura 3 - Modelos geométricos analizados

En el caso de geometría en V se consideran cuatro modelos: el de cajón simple, con ancho inferior de 5cm, ancho superior de 12cm y altura de 7cm, abierto por la parte superior (Fig. 3d); el de cajón simple con losa de 24cm de ancho (Fig. 3e); el de doble cajón, formado por dos cajones dispuestos uno sobre otro quedando la parte superior abierta (Fig. 3f) y el cajón doble invertido con el cajón de arriba invertido sin apertura superior, constituyendo dos cajones simétricos (Fig. 3g).

3. ESTUDIO EXPERIMENTAL

Con el objetivo de producir modelos fácilmente manejables de una rigidez apropiada se emplea madera de balsa en la fabricación de las maquetas empleadas en los ensayos experimentales (figura 4).



Figura 4 – Modelo a escala 1:100 del cajón simple en U

El túnel aerodinámico ENG-v2 utilizado pertenece al Grupo de Investigación en el Área de Construcción GICONSIME y dispone de dos posibles configuraciones: abierta y cerrada. En el presente trabajo los ensayos se han realizado adoptando la configuración cerrada, ya que trae consigo una mejor estabilidad del flujo y mayores velocidades. Este hecho obliga a registrar la temperatura del flujo ya que, al recircularse constantemente en tandas de ensayos de larga duración, éste tiende a calentarse; afectando ligeramente a los valores de la densidad y la viscosidad.

La extensión del túnel aerodinámico cerrado comprende un anillo de 60 m. de longitud, con una sección de ensayo de 1 m² y una longitud de 4 m. (figura 5). El túnel dispone, en el sentido de recorrido del flujo, de un ventilador de 1200 mm de diámetro con álabes regulables y una potencia de 18 kW, lo que permite alcanzar una velocidad máxima de hasta 25 m/s con la presente configuración. Asimismo, a continuación de la cámara de remanso, posee un tramo de entrada con tobera de 4 m. que conecta con la cámara de ensayo. Ésta tiene una longitud de 4 m., permitiendo realizar ensayos a 1 y 3 m. de la tobera de entrada, en función de la uniformidad del perfil o el desarrollo de la capa límite que se desee obtener. En el presente trabajo se dispone la cámara de ensayo a 1 m. de la tobera para obtener un perfil de velocidad uniforme. A continuación de la cámara de ensayo está situado el difusor de salida, que reconduce el flujo hacia el ventilador.



Figura 5 – Túnel aerodinámico ENG-v2 utilizado en configuración cerrada

3.1 METODOLOGÍA EMPLEADA

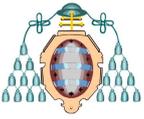
Por medio del software DeweSoft y LavView de National Instruments se monitorizan las medidas realizadas en tiempo real para poder realizar a posteriori el procesamiento de los datos y la consiguiente obtención de resultados.

De forma esquemática se presenta a continuación el equipamiento del túnel utilizado en los ensayos 2D de cálculo de fuerzas de arrastre considerando un perfil de velocidades uniforme con baja turbulencia a la entrada de la cámara de ensayo.

- 8 anemómetros y 3 velocímetros de hilo caliente.
- 2 mesas de carga de 6 ejes AMTI MT100, de 440 N y 1100 N.
- Sensores de temperatura y humedad.
- Tubo de Pitot, para medida de presión estática y dinámica (velocidades).
- Escáner de presiones

Tras realizar los ensayos necesarios para calibrar los aparatos de medida, registrar el perfil de velocidades del túnel y obtener los parámetros adimensionales necesarios para garantizar la semejanza del modelo a escala y del problema real, se procede a la realización de los ensayos del nuevo método de lanzamiento de puentes.

Los modelos a analizar se someten a dos tandas de ensayos para medir las fuerzas en el eje longitudinal del modelo dispuesto a 90° con respecto a la dirección del flujo, simulando un ensayo bidimensional. Cada ensayo se realiza para



las velocidades nominales de 5, 8, 10, 13, 15, 18 y 20 m/s comprobando la medida real de la velocidad en todo momento con el tubo de Pitot conectado permanente al escáner de presiones, siendo esta velocidad la utilizada en los cálculos. Como comprobación adicional se dispone además de los valores de un anemómetro de molinete, flujo abajo del modelo y suficientemente alejado de la estela que se produce.

3.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Representando gráficamente la relación entre las fuerzas obtenidas sobre el cuerpo en dirección paralela al flujo y la velocidad del mismo, se aprecia que la misma se puede describir mediante una parábola (figuras 6 y 7). Esto es coherente con un coeficiente de arrastre constante o, lo que es lo mismo, con la fuerza proporcional al cuadrado de la velocidad. A consecuencia de las mayores áreas enfrentadas al flujo, las mayores fuerzas son alcanzadas por las secciones dobles. La sección simple y simple con losa, obtienen para ambos casos, en U y en V, valores similares.

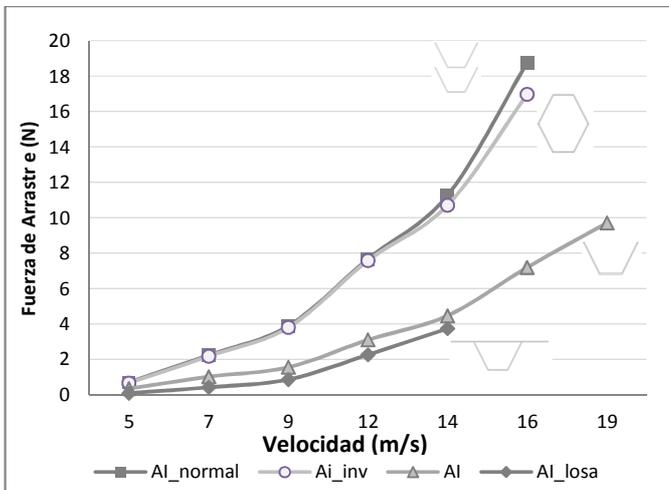


Figura 6 – Coeficiente de arrastre en sección cajón almas inclinadas

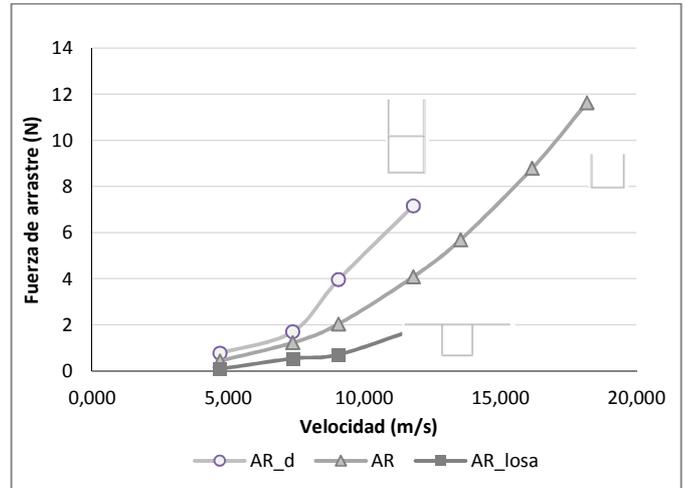


Figura 7 - Coeficiente de arrastre en sección cajón almas rectas

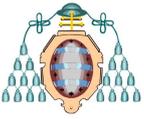
A continuación se presentan en la tabla 1 los valores del coeficiente de arrastre obtenidos tras llevar a cabo la metodología de adquisición de datos detallada anteriormente.

Modelo	Cd
U simple	1,938
U simple con losa	1,900
U doble	2,132
V simple	1,511
V simple con losa	1,503
V doble normal	1,881
V doble invertido	1,878

Tabla 1 – Coeficientes de arrastre experimentales para las diferentes secciones de estudio

En el primer grupo, formado por los cajones en U, se consiguen mayores valores del coeficiente de arrastre que con los cajones en V. Este hecho se debe a la mejor forma aerodinámica del segundo grupo. Los perfiles más esbeltos conseguidos con los dobles cajones, dan como resultado mayores fuerzas en la dirección del flujo por unidad de área enfrentada y por lo tanto unos coeficientes de arrastre mayores. La losa produce un efecto contrario sobre cada cajón. El efecto de la losa sobre las geometrías simples reduce el coeficiente de arrastre en ambos casos.

Cabe destacar la similitud entre la disposición de cajón en V doble y doble invertido. Aunque la



sección de doble cajón invertido es mucho más aerodinámica, el paso del flujo entre cajones está permitido en la sección de doble cajón normal (figura 8). El coeficiente de arrastre obtenido se ve reducido frente al supuesto que se obtendría si se dispusiese una losa entre ambos cajones.



Figura 8 – Modelo de cajón en V con doble cajón

Alguno de los resultados obtenidos no son tan fiables como cabría esperar, posiblemente debido a los giros provocados en la maqueta por la incidencia del aire a altas velocidades. Pero, en general, son lo suficientemente acordes entre sí y cuantitativamente similares a los publicados en la bibliografía relacionada [16-19] como para poder considerarlos como razonablemente precisos.

4. ANÁLISIS NUMÉRICO

Los fluidos y los fenómenos asociados a los mismos pueden ser descritos mediante ecuaciones diferenciales que, salvo en casos excepcionales, no pueden ser resueltas analíticamente. En consecuencia se obtiene una solución numérica aproximada por medio de un método de discretización que permite aproximar la ecuación diferencial empleando un sistema de ecuaciones algebraicas que puedan ser resueltas a posteriori. Estas aproximaciones se aplican a pequeños dominios de espacio y/o tiempo [25].

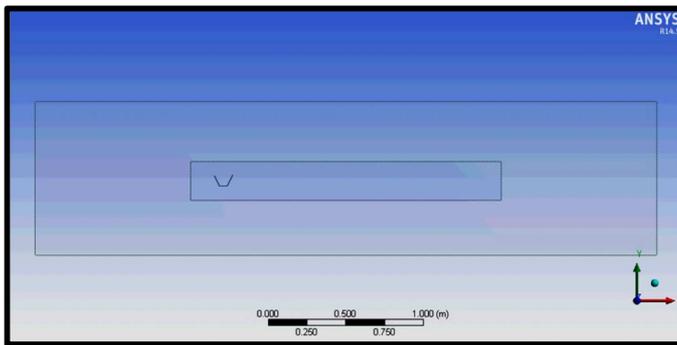
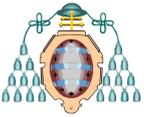
El método de CFD abarca todo el campo de estudio que involucra el comportamiento de los fluidos y por consiguiente es el elegido para el análisis numérico del presente trabajo.

Las dimensiones significativas de la sección de flujo para las cuales se desarrolla la simulación se corresponden con un rectángulo de 1 m de alto por 4m de largo. En el interior del mismo se posiciona la sección a un metro de la entrada, imitando así la geometría propia del túnel aerodinámico.

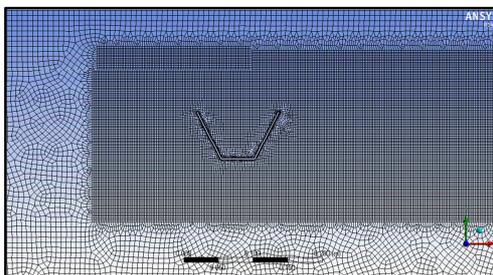
Para conseguir un análisis más preciso en las proximidades del cuerpo donde se produce mayor turbulencia, se define una sub-zona de estudio, dentro de la anterior, más próxima a la sección del modelo con volumen de flujo del orden de menos de la mitad que en el área exterior (figura 9).

Una vez definida la geometría a estudiar, es posible optimizar el mallado de la misma. Un mallado demasiado refinado puede requerir de tiempos de cálculo excesivamente grandes mientras que un mallado grosero podría traer consigo inexactitudes en los cálculos o problemas de convergencia. Es preciso entonces encontrar un mallado apropiado mediante el cual sea posible alcanzar la convergencia de la solución sin perder potencial computacional.

La turbulencia creada en torno al sólido produce fluctuaciones de las variables en una escala más pequeña que cuando el flujo está más desarrollado y estable. La energía cinética turbulenta que tiene el fluido en estas zonas es mucho mayor que en zonas más alejadas del sólido, donde el fluido comienza a estabilizarse y perder energía y las ondas y torbellinos tienen amplitudes mayores. En estas zonas con gran energía es especialmente interesante disminuir el tamaño de los volúmenes de forma que se consiga una mejor convergencia entre iteraciones, sin grandes variaciones en los resultados tras cada iteración. La disposición de una malla más densa en esta zona puede ocasionar mejoras en la convergencia y una reducción significativa del tiempo de cálculo.



(a)



(b)

Figura 9 – Geometría de estudio (a) y detalle del mallado (b) del cajón de almas inclinadas simple

Aunque cada una de las geometrías analizadas posee particularidades propias, en todas ellas el mallado empleado ha sido no estructurado con celdas rectangulares o triangulares en zonas de ajuste (figura 9), pasando de una dimensión máxima de 7,5mm en el área exterior hasta 0,5mm en las esquinas de la geometría. Al establecer estas características para el mallado, se generan en cada geometría, aproximadamente 200.000 celdas.

La velocidad actuante sobre el sólido es otro de los factores fundamentales a determinar. Debe ser lo suficientemente alta como para realizar la simulación en número de Reynolds altos (flujo turbulento) con el objetivo de obtener valores de C_d estables que puedan compararse con los obtenidos en los ensayos experimentales y los existentes en bibliografía relacionada.

4.1 PARÁMETROS NUMÉRICOS Y METODOLOGÍA

El dominio a estudiar se divide en un número finito de pequeñas celdas que se corresponden con cada celda del mallado, en los que se definen

los límites y donde se asigna el nodo computacional al centro del volumen. Este método numérico, por excelencia el más empleado en problemas de fluidos, es conocido como volúmenes finitos.

En el caso del análisis en 2D, cada celda está formado por tres o cuatro caras planas en las cuales se analizan las variables dependientes para posteriormente aplicar al nodo de control (centro del volumen) el valor absoluto de estas variables en el volumen, formado por la composición de todas las caras. La principal característica del método de volúmenes es que, con este tipo de análisis en las caras, obliga al cumplimiento de la conservación en las ecuaciones.

El análisis numérico ha sido realizado mediante el software ANSYS FLUENT 14.5.

Para el caso de estudio que concierne a esta simulación, se considera el flujo como incompresible, por lo que no es necesario resolver la ecuación de transporte de energía.

Es fundamental caracterizar numéricamente el comportamiento del aire en las condiciones intrínsecas al ensayo experimental. Por lo tanto, determinar correctamente las propiedades termofísicas del mismo es esencial. Al involucrar en el ensayo tan solo la variación de masa y de cantidad de movimiento como fenómenos de transporte, la viscosidad y densidad son especialmente relevantes. Los valores considerados se reflejan en la tabla 2 siendo los propios del aire a una temperatura de 25°C

Propiedades Aire	
Temperatura	25 °C
Densidad (ρ)	1,225 kg/m ³
Viscosidad (μ)	1,789E-05 kg/m s

Tabla 2 – Propiedades del aire

Se emplea además el método de acoplamiento presión-velocidad basado en el algoritmo SIMPLE, cuyo uso es común en el caso de fluidos incompresibles.



Para finalizar, se debe escoger el modelo de turbulencia que previsiblemente mejor se adapte al ensayo a simular y sea más apropiado para la precisión que deseamos obtener. Entre los modelos promediados de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS), que resuelven tanto la ecuación de energía cinética como la de disipación viscosa, según la bibliografía específica, el que mejor resultados aporta y por tanto el más empleado, es el modelo k-ε. Existen numerosas variaciones de este modelo que modifican los métodos de resolución. El empleado en el presente trabajo es el grupo renormalizado (RNG) con el que se consiguen mejores precisiones en flujos forzados imponiendo unos valores de $C_{\mu}=0.0845$, $C_{1\epsilon}=1.42$ y $C_{2\epsilon}=1.68$.

Una vez determinados los métodos de resolución, es necesario definir las condiciones de contorno. Lo más importante de este cometido radica en conseguir unas condiciones lo más parecidas posibles al túnel aerodinámico. En concordancia con el sólido rígido empleado para modelizar el tablero del puente, se define en el modelo una pared rígida con condiciones de no deslizamiento y rugosidad de una décima de milímetro. Se fija como única condición de entrada una velocidad constante de 20 m/s en dirección perpendicular al modelo y para la cual el número de Reynolds es lo suficientemente grande como para garantizar condiciones de régimen turbulento.

En cambio, es imposible conocer con precisión el comportamiento del fluido en la parte posterior al sólido. Se trata de la condición de contorno más delicada a definir y en consecuencia se posiciona la salida, con la condición de variación de presión nula, a una distancia suficiente aguas abajo para que no afecte a los valores del flujo en torno al modelo. Se define una rugosidad nula en todas las paredes: superior, inferior y laterales.

Con el objetivo de alcanzar unos resultados precisos con menor coste computacional se realizan 1000 iteraciones en flujo permanente. Y una vez obtenidos valores más estables y cercanos a la solución se modifica el flujo a no permanente.

Se asume un flujo transitorio y, en consecuencia, es preciso tener en consideración el espacio temporal. El fluido debe alcanzar un estado de desarrollo completo para acabar convirtiéndose en periódico. Debido a los desprendimientos que se producen por la interacción flujo - cuerpo, las fuerzas de arrastre y sustentación oscilan en torno a un valor medio. En el presente trabajo, centrado en la determinación del coeficiente de arrastre, para determinar el tiempo de paso temporal adecuado, se ha utilizado un valor del número de Strouhal típico, tomado de la bibliografía, lo que da un paso temporal de 0.0035 segundos. Para conseguir el desarrollo completo, se ejecuta con un número de pasos temporales de 500 y un máximo de 200 iteraciones por paso [20-21].

4.2 RESULTADOS

Los valores del coeficiente de arrastre obtenidos para las diferentes geometrías estudiadas se muestran en la tabla 3.

Modelo	Cd
U simple	2,339
U simple con losa	1,661
U doble	4,524
V simple	1,533
V simple con Losa	1,324
V doble normal	1,993
V doble invertido	2,376

Tabla 3 – Resultados del coeficiente de arrastre numérico

Como se puede observar en la figura 10, el campo de presiones se caracteriza por tomar valores máximos en la parte frontal, donde incide directamente el flujo de aire, y mínimos en las zonas situadas en sotavento.

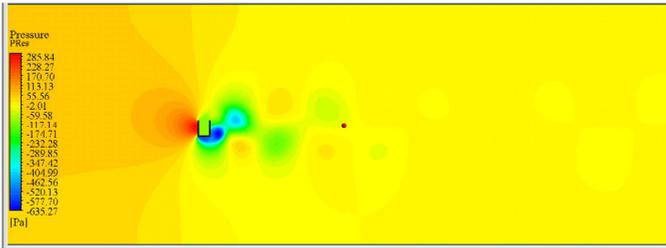
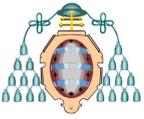


Figura 10 – Campo de presiones en la sección de cajón en U simple

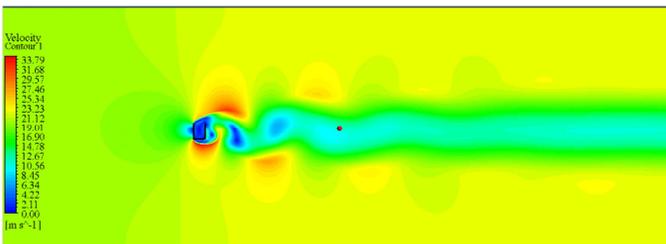


Figura 11 – Campo de velocidades en la sección de cajón en U simple

El campo de velocidades (figura 11) que se produce debido a la interacción con este tipo de cuerpos como se caracteriza por la separación del flujo del contorno del cuerpo por la parte superior e inferior. Los menores valores que adopta la velocidad del fluido se deben a la interacción de éste con la sección ya que el flujo se estanca al incidir sobre un cuerpo rígido, haciendo nula la velocidad en estas zonas. Como se puede apreciar, esta reducción brusca de la velocidad trae consigo la adopción de valores máximos de presión. La zona frontal donde se produce esta interacción se conoce como punto de estancamiento. En contraposición, donde se generan las mínimas presiones dinámicas (zonas en depresión), las velocidades se hacen máximas (zonas de sotavento).

Con la finalidad de observar la dirección del flujo se representa el gráfico de líneas de corriente (figura 12). En el mismo se aprecia que en la línea de corriente más próxima al cuerpo, se produce la mayor amplitud de desprendimiento y se recogen las velocidades máximas, consecuencia de la disminución en la sección de paso. En la parte posterior del cuerpo, las líneas describen los movimientos del fluido, formando una estela que se caracteriza por el comportamiento ondulatorio

del fluido, alternando zonas con altas y bajas presiones.

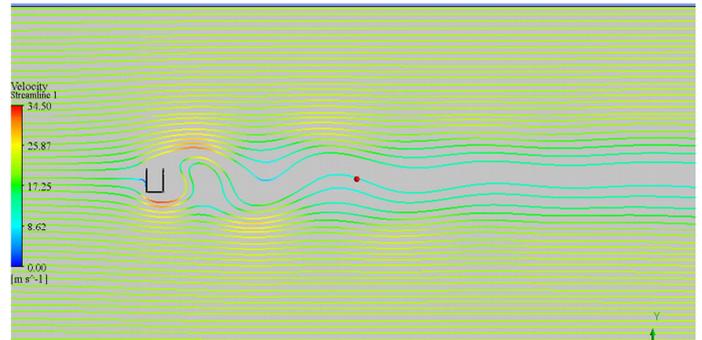


Figura 12 – Líneas de corriente generadas por la interacción del flujo con el cuerpo

Se comprueba mediante el análisis del gráfico de la velocidad y presión que las condiciones de contorno impuestas se cumplen y que el campo de estudio determinado abarca todas las turbulencias propias de la interacción cuerpo-fluido.

En el caso del cajón simple en U (figura 13) se observa el fuerte desprendimiento provocado, igual en la parte superior como inferior del cuerpo, con velocidades nulas en el contacto con el cuerpo y que produce altas velocidades en los alrededores del mismo. Esto favorece la turbulencia en la zona posterior al cuerpo apareciendo vórtices fuertes que se mezclan con la estela y generando elevada turbulencia. En el interior del cajón la velocidad es prácticamente nula, y por lo tanto, es previsible que la apertura no influya significativamente en la aerodinámica del cuerpo.

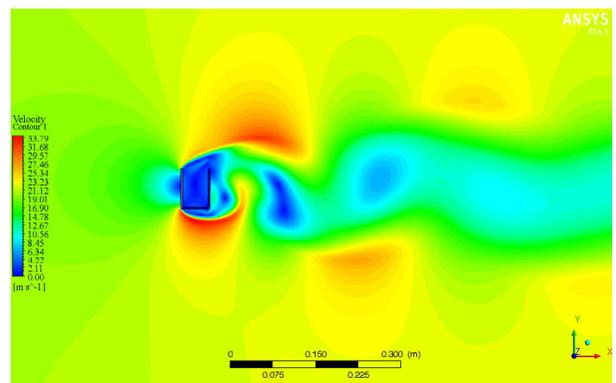
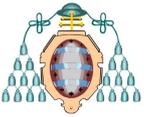


Figura 13 – Detalle del campo de velocidades en el cajón simple en U



Al disponer otro cajón en U sobre el primero (figura 14), se consigue una figura más esbelta, con el mismo ancho pero con doble altura. A efectos aerodinámicos esta geometría sufre un mayor arrastre por tener más longitud enfrentada al flujo y por lo tanto los efectos aerodinámicos se ven amplificadas. El efecto de las esquinas superior e inferior, por ser iguales que en el cajón simple, producen un desprendimiento de la capa límite similar, generando similares campos de velocidades y presiones aguas abajo.

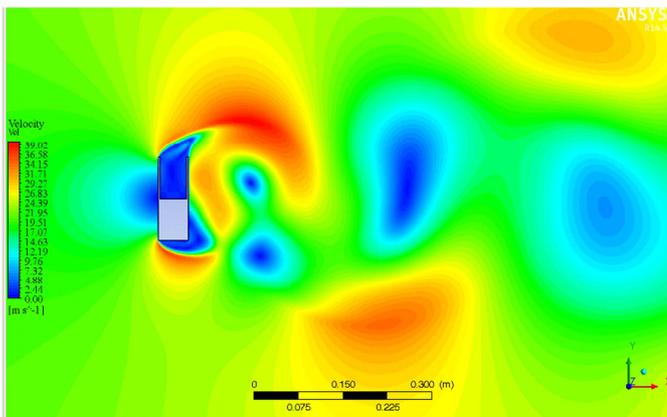


Figura 14 – Campo de velocidades en el cajón en U doble

Con la colocación de la losa sobre el cajón (figura 15) se consigue modificar el desprendimiento de la parte superior, siendo así este diferente al inferior. Debido a este hecho, la estela generada en la parte posterior es diferente a la del cajón simple, adquiriendo una menor turbulencia. Tras el cuerpo, aparece un área de dimensiones considerables con velocidades muy bajas con lo cual se propicia que la estela comience a generarse a una mayor distancia aguas abajo del cuerpo y los desprendimientos sean de menor intensidad.

En la esquina frontal entre la parte inferior de la losa y el cajón se produce una zona con velocidad nula, es decir sin flujo de aire, que produce un estancamiento. Sin embargo la parte superior conduce aerodinámicamente mejor el flujo que en la sección simple lo cual contrarresta estos puntos de presiones máximas.

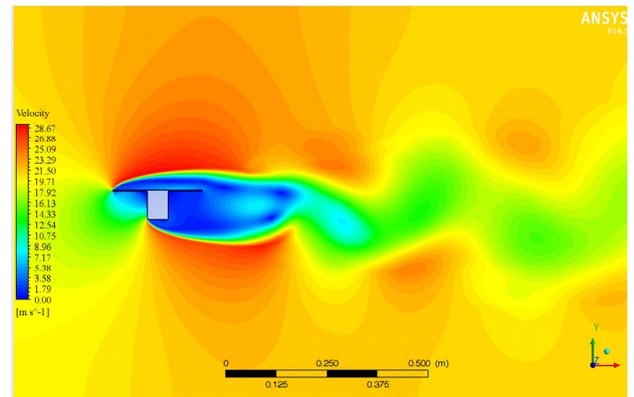


Figura 15 – Campo de velocidades en el cajón simple en U con losa

La sección con cajón en V (figura 16), debido a la inclinación de las almas, se perfila como más aerodinámica que la de cajón en U, y por lo tanto es de esperar la obtención de un coeficiente de arrastre menor. En este caso, los flujos superior e inferior no actúan de manera similar. En la parte inferior, la geometría es más aerodinámica y dirige más progresivamente el flujo. Esto favorece que el punto de estancamiento se desplace del centro del área enfrentada, a diferencia del cajón en U, situándose en la mitad superior de la cara frontal.

En la zona de sotavento se consigue una estela estrecha con bajas velocidades en su interior, alrededor de la cual se alcanzan mayores velocidades que disminuyen hacia la velocidad de flujo inicial según nos acercamos a las paredes.

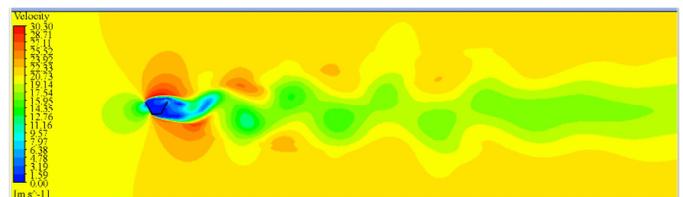


Figura 16 – Campo de velocidades en el cajón simple en V

Con la geometría de cajón en V doble invertido (figura 17) aparece de nuevo una figura simétrica con lo que el aire es dirigido de una forma parecida a lo que sucede en el cajón en U. El punto de estancamiento se sitúa en la mitad de la cara frontal y el desprendimiento superior e inferior es igual describiéndose una estela de gran amplitud y elevada vorticidad tras el cuerpo.

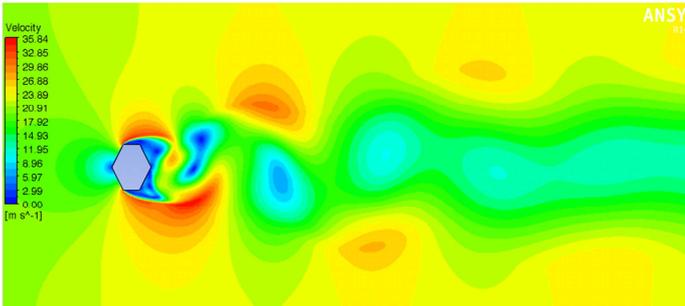
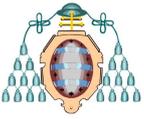


Figura 17 – Campo de velocidades en el cajón en V doble invertido

La losa, al igual que en el cajón en U, origina un desprendimiento diferente entre la parte superior y la inferior. Sin embargo en este caso (figura 18), ya existe esta inestabilidad con la sección simple, razón por la cual, el efecto de estela es más similar entre la simple y la simple con losa en el caso de cajón en V que en el de U.

Aunque se forma un nodo de bajas velocidades en la parte frontal bajo el ala de la losa, este es de menor envergadura que el producido en la sección en U con losa, por tener el ala del cajón una inclinación favorable para la evacuación del aire. Por otro lado, en sotavento, el efecto es similar al del cajón simple: una estela de altas presiones de ancho similar al cajón y que se prolonga durante gran distancia aguas abajo.

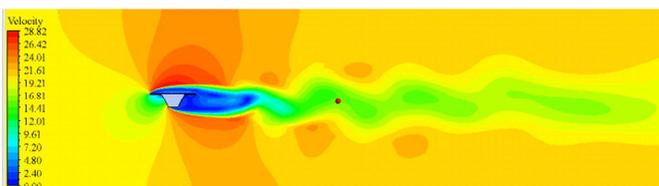


Figura 18 – Campo de velocidades en el cajón simple en V con losa

La otra opción para el lanzamiento de vanos del puente corresponde a la configuración con ambos cajones con la apertura en la parte superior (figura 19). En este caso, la forma geométrica resultante es, aparentemente, menos aerodinámica que la doble con cajón invertido. Sin embargo, al disponer entre los cajones de un espacio de paso, parte del flujo que se enfrenta a la parte frontal atraviesa el cuerpo por este hueco. Este hecho es beneficioso de cara a reducir las fuerzas horizontales sobre la sección y así conseguir menor coeficiente de arrastre. En el

campo de velocidades en torno a la sección se puede apreciar como el flujo discurre, al igual que en otras secciones, por la parte inferior y superior, pero además, en la apertura entre cajones se producen altas velocidades que caracterizan la estela producida aguas abajo. Este flujo interior propicia una estela asimétrica que la desplaza hacia la parte superior. Además, es posible observar en esta geometría dos puntos de estancamiento, uno en el cajón superior similar al producido en la geometría de cajón simple en V y otro en la parte superior del cajón inferior.

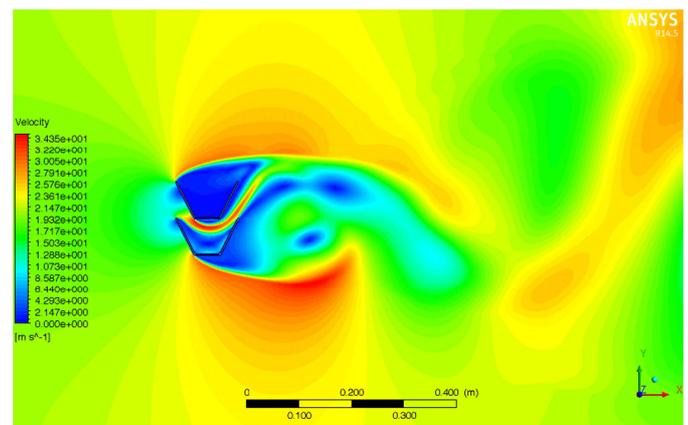
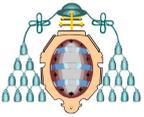


Figura 19 – Campo de velocidades en el doble cajón en V

5. COMPARATIVA DE RESULTADOS

Obtenidos todos los resultados de los coeficientes de arrastres tanto experimentales como numéricos, se procede a la comparación y evaluación, por un lado de las diferencias entre ellos y por otro de las relaciones que deben establecerse de acuerdo a la aerodinámica de las geometrías. En la tabla 4 se puede apreciar un resumen de los valores obtenidos.



	Cd exp.	Cd numérico
	1,938	2,339
	1,900	1,661
	2,132	4,524
	1,511	1,533
	1,503	1,324
	1,881	1,993
	1,878	2,376

Tabla 4 – Comparativa de los coeficientes de arrastre

En el caso de la sección de cajón en V simple, el valor del coeficiente de arrastre es prácticamente igual para ambas metodologías. Para el cajón simple en U se obtienen un resultado numérico del 120% el valor experimental. Sin embargo, ambos resultados de las secciones simples se encuentran próximos al valor de 2.1 que aparece en artículos relacionados para la sección cuadrada.

Para todas las secciones dobles, el coeficiente es mayor en el análisis numérico, destacando la gran diferencia del cajón doble en U. Puede deberse este hecho a que los modelos estudiados en el túnel se disponían de forma sencilla uno sobre otro sin existir un elemento de unión firme entre ambos. Este hecho puede provocar que parte del flujo que incide sobre la parte frontal pase entre el pequeño hueco que queda entre cajones y por lo tanto, la fuerza horizontal es menor que si fuera totalmente estanco. Esta conclusión se ve reforzada al darse la mínima diferencia entre resultados en el cajón doble en V,

en la cual también existe hueco en el análisis experimental.

Por otro lado, ambos valores para las secciones con losa se diferencian de similar manera y magnitud, con un 80-85% de variación del valor numérico respecto el experimental. En el análisis experimental, al disponer de una losa de gran esbeltez de un material ligero como es la madera de barca, se producían fluctuaciones perpendiculares al flujo que pueden propiciar la obtención de fuerzas horizontales mayores, debidas a una influencia de fuerzas tridimensionales.

6. CONCLUSIONES

Se ha realizado el estudio aerodinámico de un puente en fase de construcción tanto experimental como numéricamente. A consecuencia de las múltiples combinaciones posibles según el diseño de los vanos del puente, se analizan siete secciones distintas, diferenciando en dos grupos, con almas verticales y con almas inclinadas, dentro de cada una, con distintas configuraciones, simples, dobles y con losa.

La finalidad experimental ha sido determinar y evaluar el coeficiente de arrastre mediante la medición de las fuerzas actuantes en modelos a escala 1:100. En el análisis numérico se simulan condiciones similares a las del túnel aerodinámico para contrastar los resultados. Se obtienen valores del coeficiente de arrastre con bastante correlación entre grupos simples, con losa y dobles.

A partir de los resultados numéricos, se realiza también un análisis de los campos de velocidades y presiones de cada forma estudiada, y de los fenómenos transitorios que se generan.

7. AGRADECIMIENTOS

Al Área de Construcción (Felipe, Mar y Juanjo) por la información acerca de la patente de lanzamiento de puentes y por la utilización del túnel aerodinámico.



Al grupo GITECO de la Universidad de Cantabria, por su colaboración en el apartado de Estado del Arte de los puentes empujados.

A Juan José del Coz, catedrático del Área de Construcción por el acceso a los servidores remotos, imprescindible para el desarrollo numérico.

Al MINECO, Proyecto ALCANZA (IPT-380000-2010-012), Subprograma INNPACTO 2010.

8. REFERENCIAS

- [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. "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] Ortega M., Lacomá 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.
- [9] 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.
- [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", Applied Mathematics and Computation, 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] Stathopoulos, T. and Baniotopoulos, C. C., "Wind effects on Buildings", Springer, 2007
- [14] WO 2013/001115 A1, ES-2368318 (B2) "Sistema y Método de Lanzamiento de Estructuras". Castro-Fresno, D., Del Coz Díaz, J.J., Navarro-Manso, A. y Alonso Martínez, M.
- [15] Ferziger, J.H., Peric, M. "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer, 2002
- [16] Larose, G.L., Livesey, F.M. "Performance of streamlined bridge decks in relation to the aerodynamics of a flat plate", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 69-71 pp. 851-860, 1997.
- [17] Schewe, G., Larsen, A. "Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74-76, pp. 829-838, 1998.
- [18] Schewe, G. "Reynolds number effects in flow around more-or-less bluff bodies", Journal of



Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 89, pp. 1267-1289, 2001.

[19] Larose, G.L., D'Auteuil, A. "On the Reynolds number sensitivity of the aerodynamics of bluff bodies with sharp edges", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 94, pp. 365-376, 2006.

[20] Fransos, D., Bruno, L. "Edge degree-of-sharpness and free-stream turbulence scale effects on the aerodynamics of a bridge deck", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 98, pp. 661-671, 2010.

[21] Larsen, A., Walther, J.H. "Discrete vortex simulation of flow around five generic bridge deck sections", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 77&78, pp. 591-602, 1998.