

Optimización de cargas de viento usando la fluidodinámica computacional. Determinación de coeficientes de fuerza en el pilono de un puente atirantado

Optimisation of wind loads based on computational fluid dynamics. Force coefficients assessment for the pylon of a cable-stayed bridge

María Macías Infantes^a, Manuel Castillo Carbonero^b, Ángel Vidal Vacas^c y Álvaro Serrano Corral^d

^a Dra. Ingeniera de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). mmacias@mc2.es

^b Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). manuel.castillo@mc2.es

^c Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Jefe de Proyectos. angel.vidal@mc2.es

^d Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. MC2 Estudio de Ingeniería (Grupo TYPSA). Director Técnico. alvaro.serrano@mc2.es

RESUMEN

El presente trabajo forma parte del estudio de estabilidad aerodinámica para el diseño de un nuevo puente atirantado en Bangladesh. Este artículo presenta el análisis del pilono, empleando la dinámica de fluidos computacional (CFD). Las simulaciones 3D muestran el efecto borde para la reducción de los coeficientes de fuerzas, y también un efecto sombra que produce un fuste sobre el otro, con lo que se estima una resultante de esfuerzos basales reducida respecto a la de las cargas de la normativa. Finalmente, esto se confirma a través de varias simulaciones de verificación seccionales a diferentes cotas y ensayos en túnel de viento, optimizando así las acciones de viento que llegan a ser condicionantes del diseño.

ABSTRACT

The present work is part of the aerodynamic stability study for the design of a new cable-stayed bridge in Bangladesh. This paper presents the analysis of the pylon, using the computational fluid dynamics technique (CFD). The 3D simulations show the edge effect and also a shadow effect produced by one pylon shaft on the other, thus estimating a reduced base reaction compared to that obtained by applying the simplified force coefficients proposed in the Standards. Finally, this reduction is confirmed through several sectional simulations at different levels and wind tunnel testing, thus optimizing the wind actions that constitute conditioning factors of the detail design.

PALABRAS CLAVE: dinámica de fluidos computacional, CFD, viento, atirantado, pilono, optimización.

KEYWORDS: computational fluid dynamics, CFD, wind, cable-stayed bridge, pylon, optimization.

1. Introducción

Recientemente se está desarrollando el estudio de viabilidad de un nuevo proyecto de carretera en Bangladesh, destinado a proporcionar una conexión alternativa entre las regiones de Matlab Uttar y Gazaria. En este nuevo proyecto de implantación, está prevista la construcción de un puente atirantado sobre el río Dhonogoda [1]. El puente diseñado tiene un vano principal de 400 m de luz, y el tablero, compuesto por una doble viga cajón de hormigón pretensado, está dispuesto a una altura de más de 25 m sobre el nivel del mar (ver Figura 1). Para el apoyo de los extremos del vano principal y el anclaje de los tirantes, se disponen sendos pilonos en forma de diamante. El sistema de cables tiene un patrón de medio abanico en el que cada plano tiene 15 cables, hasta alcanzar un número total de 120.

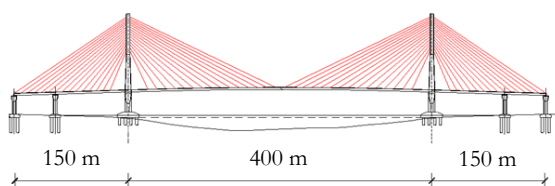


Figura 1. Alzado del puente atirantado sobre el río Dhonogoda.

Durante el proceso de diseño del puente, se ha encontrado que las cargas de viento son condicionantes. Cabe señalar que Bangladesh tiene un clima subtropical, caracterizado por el monzón y propenso al desarrollo de ciclones tropicales. Esto justifica los altos valores de la velocidad del viento en la zona, que asciende hasta los 59.4 m/s de velocidad media a la altura máxima del tablero. En este contexto, se desarrolla un estudio particular de las acciones de viento, empleando las técnicas de la dinámica de fluidos computacional (CFD), con el objetivo de determinar con una mayor exactitud los coeficientes de fuerza en el pylon y así optimizar en la medida de lo posible su diseño.

Los pilonos son estructuras masivas de hormigón que alcanzan los 129.5 m de altura. Se distinguen tres partes bien diferenciadas (ver

Figura 2). La base, situada bajo el tablero, tiene una sección octogonal que se va ensanchando a lo largo de sus 25 m de altura. De ella emergen dos brazos de sección rectangular, hueca, que tienen 50 m de altura. Finalmente, estos brazos inclinados se unen para dar paso a un mástil vertical de 54.5 m de altura y sección octogonal, también hueca. Las aristas son achaflanadas.

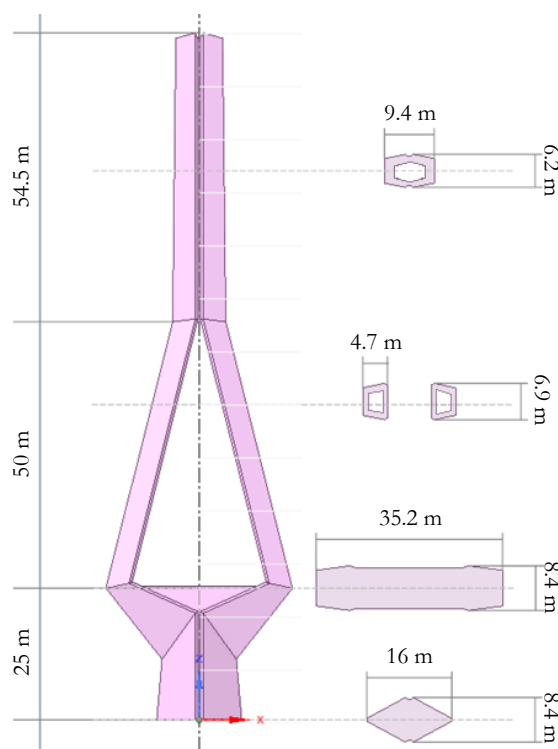


Figura 2. Detalle de la sección transversal del pylon a diferentes cotas: $z = 0$ m, $z = 25$ m, $z = 60$ m y $z = 103.5$ m.

2. Caracterización del viento

El Eurocódigo EN 1991-1-4 [2] se utiliza como marco para el estudio de la estabilidad aerodinámica del puente. La acción del viento de diseño se determina con el Anejo Nacional del Reino Unido, utilizado junto al mapa de velocidad del viento incluido en el Código Nacional de Construcción de Bangladesh, conocido por sus siglas en inglés BNBC [3].

De acuerdo con lo establecido en el Eurocódigo, la acción del viento se representa mediante un conjunto simplificado de presiones

cuyos efectos son equivalentes a los efectos extremos del viento turbulento. La velocidad del viento y la presión tienen una componente media y otra fluctuante:

- La velocidad media del viento $v_m(z)$ a la altura z se determina a partir de la velocidad básica v_b , que depende de la zona, y de la variación en altura del viento determinada a partir de la rugosidad del terreno y la orografía.
- La componente fluctuante del viento está representada por la intensidad de turbulencia $I_v(z)$.

El valor de la velocidad básica del viento en la ubicación del puente es $v_{b,3s} = 56.7$ m/s según el mapa básico de velocidad del viento de Bangladesh (ver Figura 3). La correspondiente velocidad básica diezminutal utilizada en la formulación del Eurocódigo, incluyendo además un incremento del 4 % por el cambio climático, da un valor de cálculo de $v_b = 41.9$ m/s.

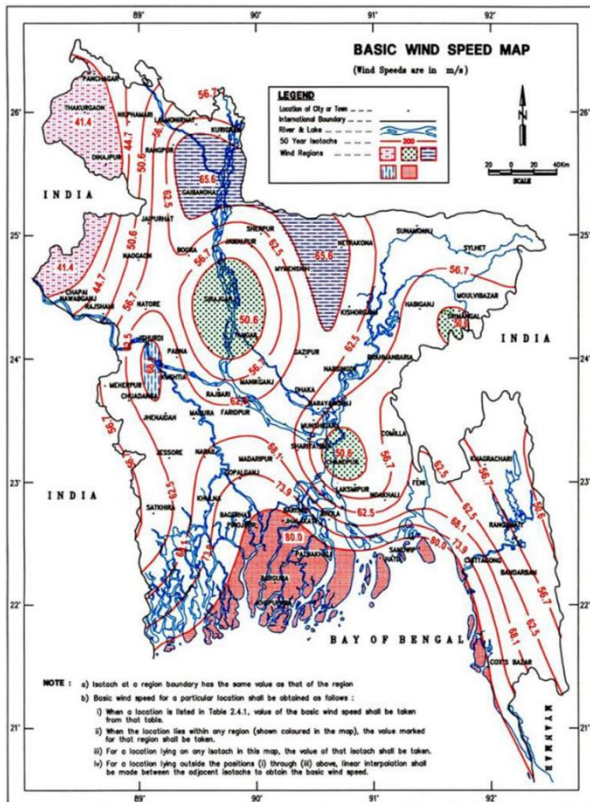


Figura 3. Mapa de velocidad básica del viento en Bangladesh. Fuente: BNBC [3].

Con estos parámetros de diseño, el perfil de velocidad media del viento en el pilono es el que se muestra en la Figura 4.

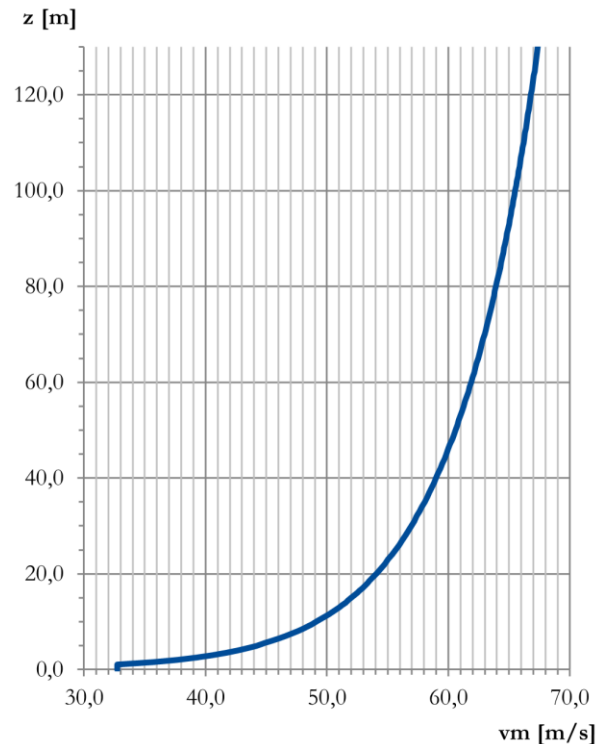


Figura 4. Perfil de velocidad media de viento en el pilono en función de la altura z .

3. Coeficientes de fuerza simplificados

Como se muestra en la Sección 1, los pilonos son elementos estructurales con secciones transversales rectangulares o asimilables. Para esta geometría, el coeficiente de fuerza según el apartado 7.6 de EN 1991-1-4 se expresa analíticamente mediante la siguiente expresión:

$$c_f = c_{f,0} \psi_r \psi_\lambda \quad (1)$$

siendo:

- $c_{f,0}$ el coeficiente de fuerza para secciones rectangulares con ángulos agudos y sin flujo libre, según Figura 5.
- ψ_r es el factor de reducción para secciones cuadradas con esquinas redondeadas, lo cual no aplica al pilono.

- ψ_λ es el factor de reducción por el efecto de borde, que puede determinarse en función del coeficiente de esbeltez efectivo λ y del coeficiente de solidez φ .

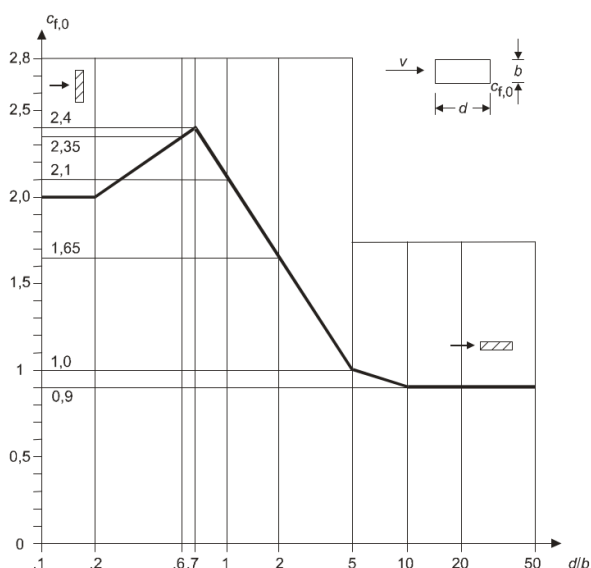


Figura 5. Coeficiente de fuerza para secciones rectangulares con ángulos agudos y sin flujo libre.

Fuente: Figura 7.23 en EN 1991-1-4 [2].

El factor de borde estimado de acuerdo a la Tabla 7.16 de EN 1991-1-4 es $\psi_{\lambda,x} = 0.8$ para la dirección transversal al puente y $\psi_{\lambda,y} = 0.9$ para la dirección longitudinal. Los coeficientes de fuerzas simplificados, calculados para diferentes secciones del pilono se incluyen en las Tablas 1 y 2 para ambas direcciones.

Tabla 1. Coeficientes de arrastre en dirección transversal para las secciones del pilono.

	$b_x(m)$	$d_x(m)$	$c_{f,0x}$	$c_{f,x}$
base	8.4	16.0	1.69	1.35
brazo	6.9	4.7	2.36	1.89
mástil	6.2	9.4	1.87	1.5

Tabla 2. Coeficientes de arrastre en dirección longitudinal para las secciones del pilono.

	$b_y(m)$	$d_y(m)$	$c_{f,0y}$	$c_{f,y}$
base	16.0	8.4	2.28	2.06
brazo	4.7	6.9	1.82	1.65
mástil	9.4	6.2	2.38	2.14

4. Respuesta frente a viento a partir de simulaciones CFD

Con el objeto de optimizar las fuerzas de viento, se llevan a cabo una serie de simulaciones CFD.

4.1 Modelo aislado del pilono

En el modelo se analiza la torre completa de forma aislada, en el dominio espacial. Las aristas del pilono se introducen incluyendo detalles que influyen en la respuesta, como la inclinación de las caras, los chaflanes, etc. Los límites del dominio son suficientemente amplios para evitar cualquier influencia en los resultados, lo cual se establece siguiendo siempre las recomendaciones de la bibliografía [4] y se verifica mediante evaluaciones de sensibilidad.

Se considera una entrada de viento medio variable en función de la altura (Figura 6), realizándose un cálculo estacionario del problema. El cálculo se prolonga hasta obtener residuos suficientemente bajos de los diferentes indicadores, lo que asegura la correcta convergencia de la solución. Esto permite evaluar las reacciones en la base del pilono, así como los coeficientes de presión obtenidos en las caras y los coeficientes de fuerza estimados.

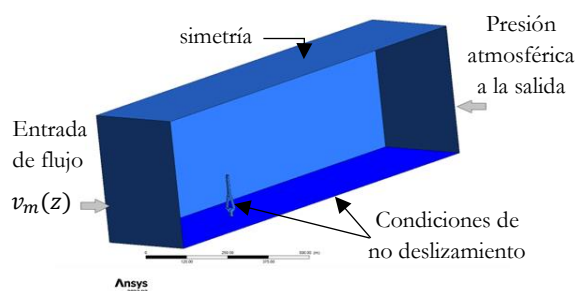


Figura 6. Esquema del dominio espacial para las simulaciones CFD.

Particularmente importante en el cálculo es la resolución de la malla alrededor del pilono y en la zona de la estela, para una evaluación precisa de los fenómenos de desprendimiento de vórtices, arrastre y succión (ver Figura 7).

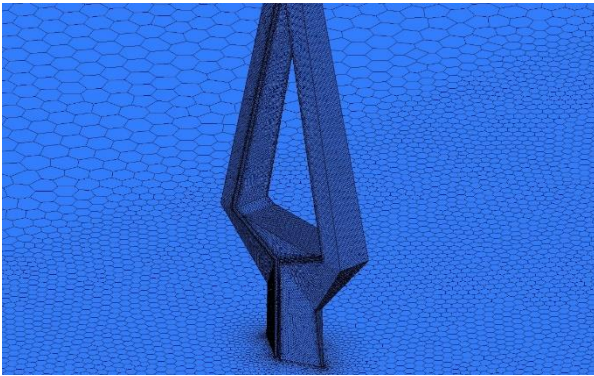


Figura 7. Mallado en el entorno del pilono.

4.2 Coeficientes de presión para diferentes ángulos de incidencia

Antes de presentar en los subapartados siguientes los resultados de los coeficientes de presión para los tres escenarios de la Figura 8, se incluye una representación de la solución estacionaria obtenida para cada uno de ellos.

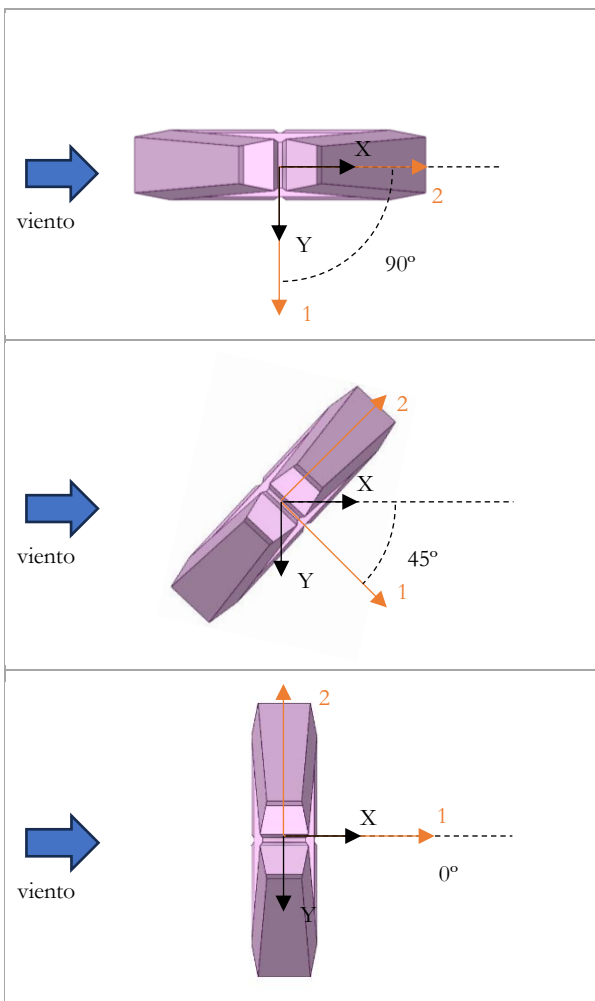
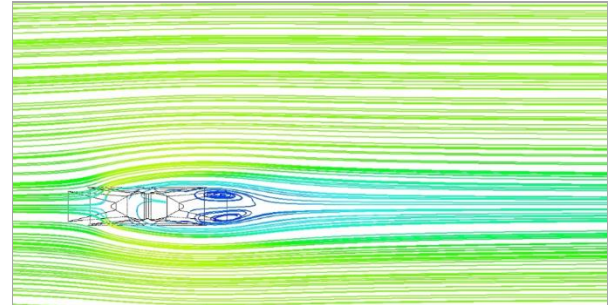
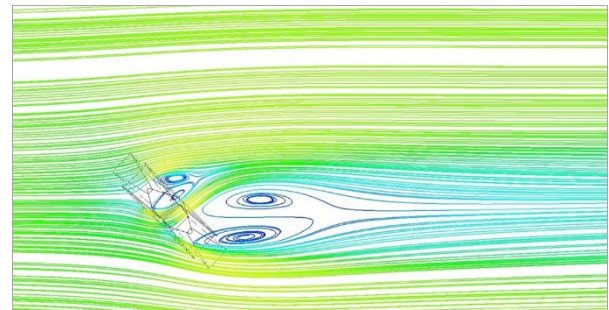


Figura 8. Ángulo de incidencia del viento en los tres escenarios analizados en las simulaciones CFD.

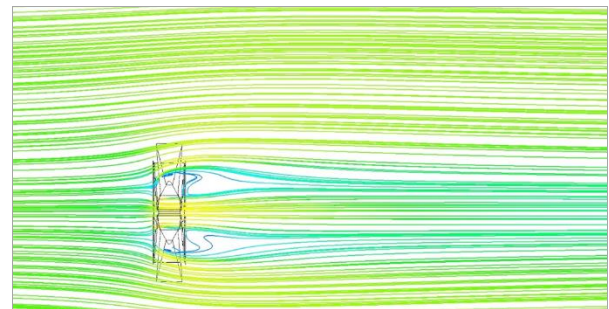
Las Figuras 9 y 10 representan las líneas de corriente en un plano horizontal y vertical, respectivamente. En particular, en las Figuras 9a y 9b, se puede apreciar un fenómeno de ocultamiento que genera un brazo sobre el otro.



a) Incidencia del viento: 90°.



b) Incidencia del viento: 45°.



c) Incidencia del viento: 0°.

Figura 9. Líneas de corriente alrededor del pilono a lo largo de un plano horizontal de cota $z = 100$ m.

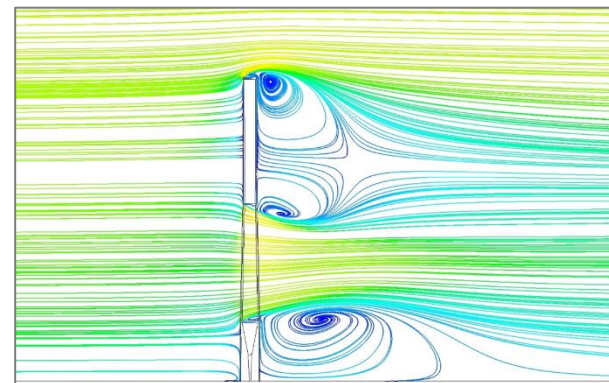
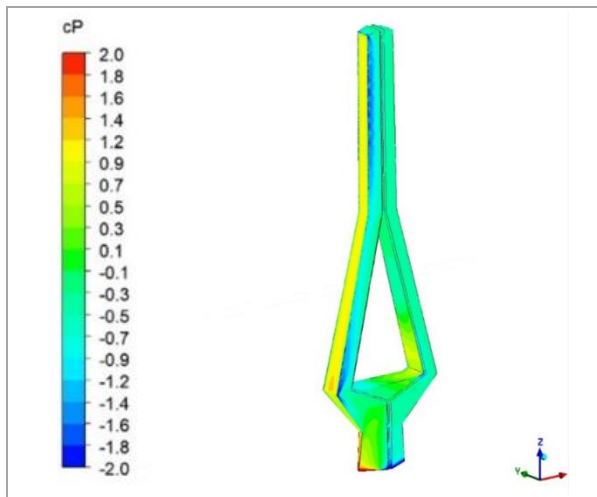


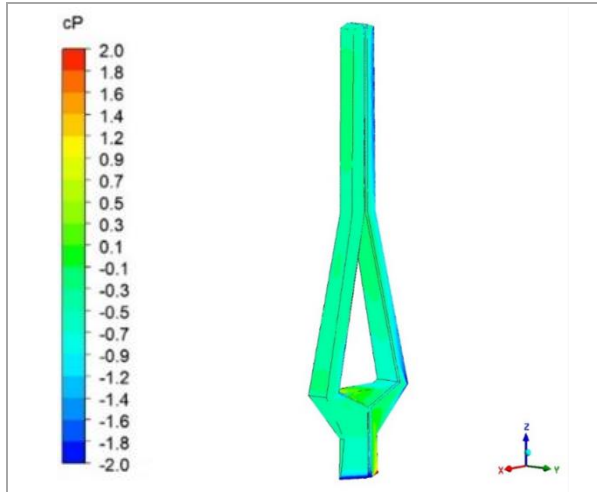
Figura 10. Líneas de corriente alrededor del pilono a lo largo de un plano vertical, para la dirección de incidencia de 0° con el eje longitudinal del puente.

4.2.1. Ángulo de incidencia: 90°

Para la parte superior del pilono (mástil y brazo expuesto), la presión se obtiene a barlovento y la succión a sotavento (ver Figura 11). A la vista de los resultados gráficos, puede afirmarse que el brazo de barlovento produce un efecto barrera parcial en el de sotavento, más eficaz en la mitad superior, donde el coeficiente de fuerza estimado desciende hasta $c_{f,CFD} = -0.7$ (succión).



a) Barlovento.



b) Sotavento.

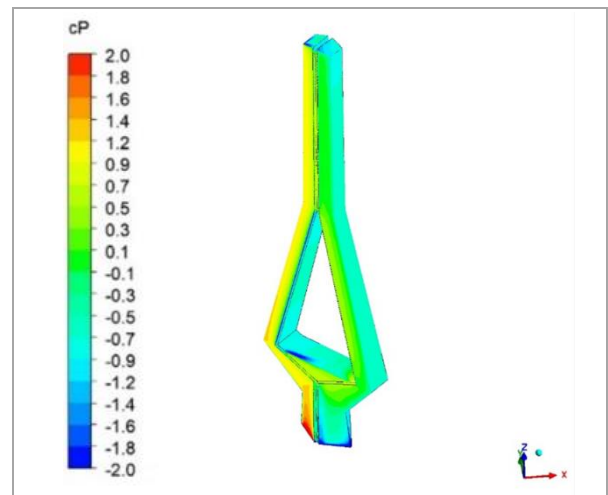
Figura 11. Coeficientes de presión. Dirección de incidencia: 90° con el eje longitudinal del puente.

Se estima un coeficiente de fuerza de $c_{f,CFD} = 1.4$ para el mástil, ligeramente inferior al calculado utilizando el procedimiento del Eurocódigo $c_{f,x} = 1.5$. Para el brazo expuesto, se estima un coeficiente de fuerza variable con la elevación de $c_{f,CFD} = [1.8-1.3]$, lo que indica un cierto efecto de la unión de los brazos con la

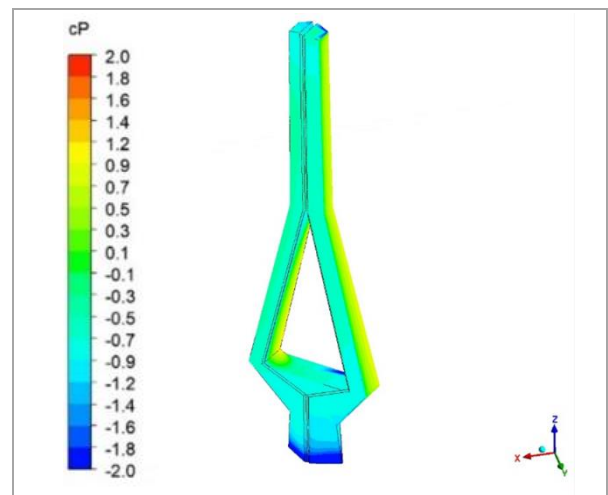
altura. En la parte inferior, donde la separación entre brazos es lo suficientemente grande como para no influir, se estima un $c_{f,CFD} = 1.8$, ligeramente inferior al calculado según el procedimiento simplificado $c_{f,x} = 1.9$.

4.2.1. Ángulo de incidencia: 45°

Los resultados para la dirección intermedia (Figura 12) muestran que la variación de la dirección del viento no genera una respuesta estática del pilono significativamente diferente, siendo la magnitud de los coeficientes de presión muy similar a la obtenida para la dirección de incidencia de 90° respecto al eje longitudinal del puente. Por otro lado, es destacable que el efecto barrera no se observa en el brazo de sotavento.



a) Barlovento.

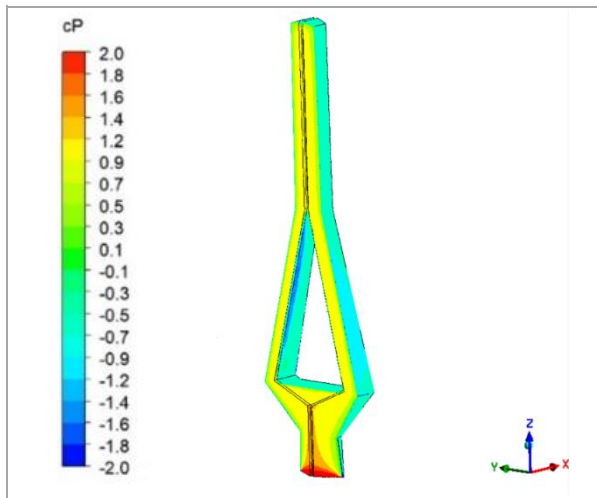


b) Sotavento.

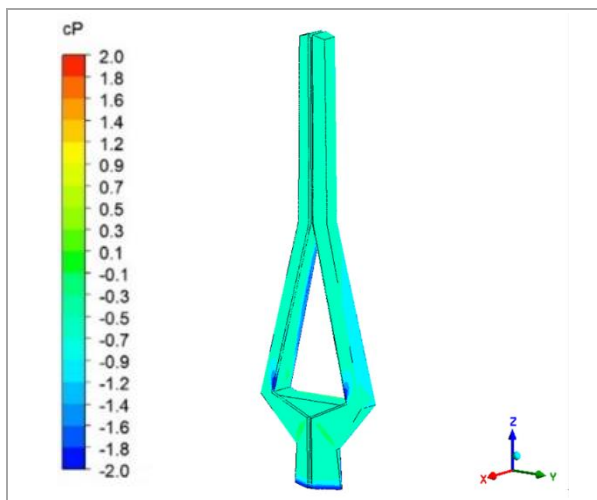
Figura 12. Coeficientes de presión. Dirección de incidencia: 45° con el eje longitudinal del puente.

4.2.1. Ángulo de incidencia: 0°

Para la parte superior del pilono (mástil y brazo expuesto), de nuevo se obtiene presión a barlovento y succión a sotavento (ver Figura 13).



a) Barlovento.



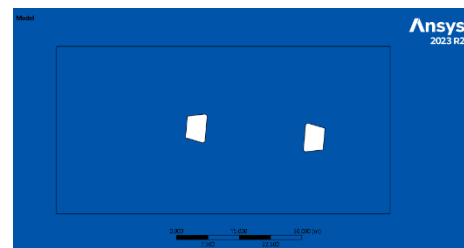
b) Sotavento.

Figura 13. Coeficientes de presión. Dirección de incidencia: 0° con el eje longitudinal del puente.

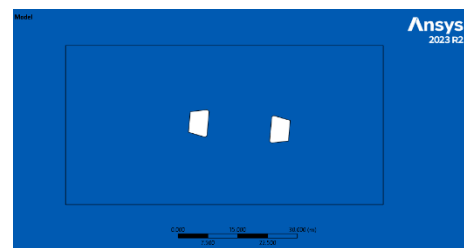
Se estima un coeficiente de fuerza de $C_{f,CFD}=1.5$ para el mástil, considerablemente inferior al valor calculado utilizando el enfoque simplificado $C_{f,y}=2.1$. Para los brazos, se estima un coeficiente de fuerza variable con la altura de $C_{f,CFD}=[1.9-1.7]$, moderadamente superior al calculado según el procedimiento del Eurocódigo $C_{f,y}=1.7$. También es apreciable la influencia de los bordes facetados del pilono, que hace que la distribución de presiones no sea completamente homogénea en las caras.

4.3 Verificación mediante simulaciones CFD seccionales

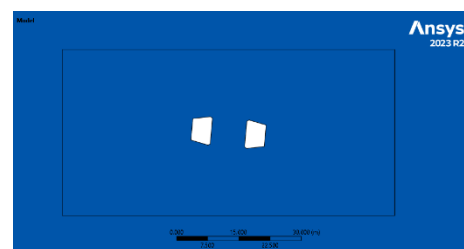
Para confirmar los resultados anteriores y comprobar las diferencias respecto a la formulación simplificada del Eurocódigo, se llevan a cabo varios análisis 2D. Con el mismo esquema de cálculo usado para las simulaciones 3D, se evalúan varios modelos seccionales a diferentes cotas (ver Figura 14). El flujo de entrada es una velocidad media uniforme a la cota z . Se evalúan las reacciones horizontales sobre la sección y el análisis adimensional permite calcular el coeficiente correspondiente, que se indica en la Tabla 3.



a) Cota $z = 28$ m.



b) Cota $z = 44$ m



c) Cota $z = 60$ m



d) Cota $z = 103.5$ m

Figura 14. Modelos seccionales del pilono.

Tabla 3. Coeficiente de arrastre a partir de simulaciones CFD seccionales.

Cota (m)	Separación de brazos	Dirección del viento	Ubicación	$c_{f,x}$
28 m	24 m	90 °	expuesto	0.99
			sombra	-0.1
44 m	16 m	90 °	expuesto	1.01
			sombra	-0.2
		90 °	expuesto	1.05
			sombra	-0.3
60 m	8 m	45 °	expuesto	1.30
			sombra	0.86
		90 °	N/A	0.88
			N/A	1.88

Los resultados anteriores confirman el efecto barrera en el brazo de sotavento, que desaparece efectivamente cuando el ángulo de incidencia es de 45° con respecto al eje longitudinal del puente.

5. Validación experimental de los resultados

Los pilonos no son susceptibles de sufrir fenómenos de inestabilidad aeroelástica, ya que son elementos mucho más masivos que el tablero del puente. Por lo tanto, sólo se realizan ensayos estáticos para obtener las resultantes de las fuerzas del viento en la base, con el fin de validar los resultados de las simulaciones CFD. Estos resultados numéricos muestran que existe un cierto efecto de sombra de un brazo sobre el otro, que se pretende confirmar. Al tratarse de ensayos estáticos, no es necesario mantener la escala de propiedades mecánicas y dinámicas, sino que es suficiente con reproducir en detalle la geometría. El ensayo se realiza para el pilono como elemento aislado, para caracterizar experimentalmente su respuesta al viento.

La maqueta para el túnel de viento reproduce exactamente la geometría tridimensional del pilono diseñado, con sus

chaflanes y caras inclinadas. En concreto, se ejecutan dos modelos a escalas diferentes (ver Figura 15). El modelo a escala 1:350, de color gris, se imprime en una sola pieza de Nylon PA12 utilizando la técnica *Multi Jet Fusion* de HP. El modelo a escala 1:250, de color azul, se imprime en una impresora de filamentos mediante la técnica conocida como *Fused Deposition Modelling*. El material utilizado en la impresión es PLA. En este caso, debido a los límites de impresión, es necesario dividir la torre en varias piezas, que más tarde se ensamblan y se adhieren para formar la maqueta completa.

En el desarrollo de los ensayos, la maqueta se coloca en el punto central de la cámara del túnel de viento, atornillando su base a un sistema de células de carga donde se miden las reacciones. La base de anclaje dispone de orificios roscados estratégicamente colocados para permitir posicionar el modelo según diferentes ángulos de incidencia del viento de 0 °, 30 °, 60 ° y 90 ° respecto al eje longitudinal del puente (ver Figura 16). Las reacciones se miden para flujos de viento de velocidad constante. Todos los ensayos se realizaron para varios valores de velocidad (10 m/s, 20 m/s y 30 m/s) con el fin de descartar efectos no lineales y comprobar que las pruebas se desarrollaron en un rango de velocidades representativo. Los resultados confirman que la fuerza y el momento no dependen de la velocidad del viento.

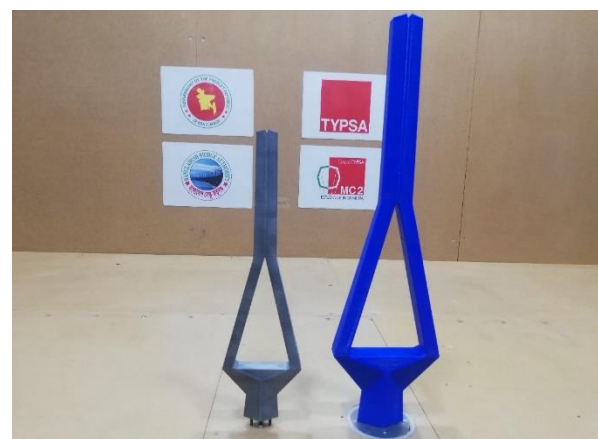


Figura 15. Maquetas del pilono: escala 1:350 (gris) y escala 1:250 (azul).

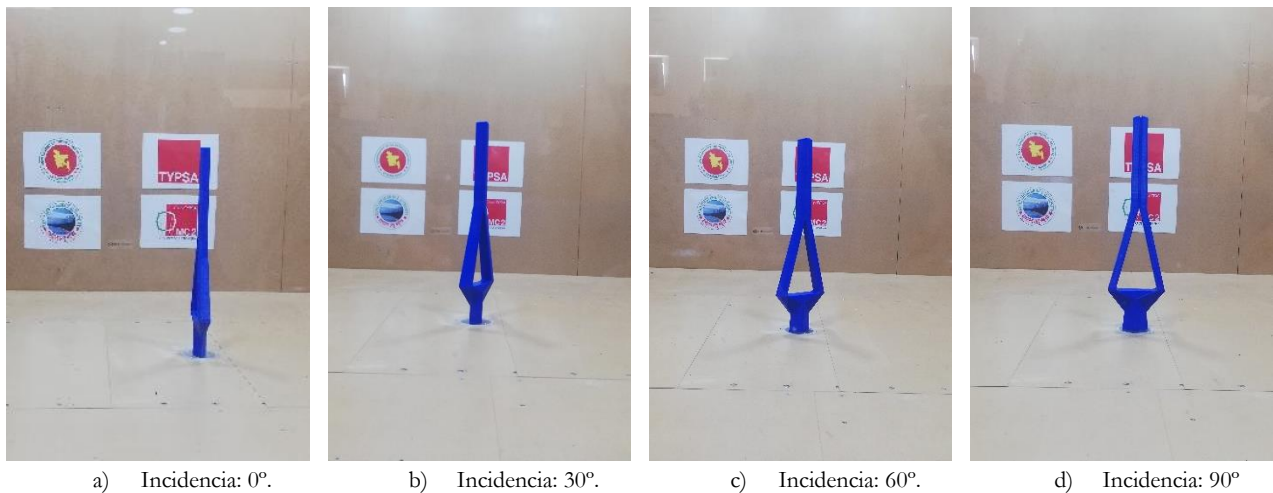


Figura 16. Configuración del ensayo en túnel de viento para el modelo de pilono a escala 1:250.

Los ensayos se repiten con las dos maquetas (escala 1:250 y escala 1:350), de forma que se duplican las pruebas de contraste.

A continuación, las Tablas 4 y 5 recogen la reacción adimensional en la dirección transversal del puente (F_2^*) y en la dirección longitudinal del puente (F_1^*). Las fuerzas adimensionales F^* se obtuvieron a partir de la siguiente expresión:

$$F^* = \frac{F}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_{ref}} \quad (2)$$

siendo:

- F la reacción medida en el túnel de viento o calculada en la simulación CFD.
- ρ la densidad del aire.
- v la velocidad de viento.
- A_{ref} un área de referencia, la proyección en el eje 1 del área total del pilono.

Tabla 4. Reacciones adimensionales en la dirección transversal del puente (eje local 2 en la Figura 8).

Dirección del viento	Ensayo túnel de viento		Simulaciones CFD
	Modelo 1:250	Modelo 1:350	
90°	0.34	0.33	0.35
60°	0.49	0.49	-
45°	-	-	0.49
30°	0.49	0.50	-

Tabla 5. Reacciones adimensionales en la dirección longitudinal del puente (eje local 1 en la Figura 8).

Dirección del viento	Ensayo túnel de viento		Simulaciones CFD
	Modelo 1:250	Modelo 1:350	
60°	0.21	0.21	-
45°	-	-	0.69
30°	0.48	0.48	-
0°	0.73	0.77	0.89

En las simulaciones numéricas se simplificó el cálculo considerando un ángulo de incidencia intermedio entre 30° y 60° para reducir el coste computacional. Además, el perfil de velocidad se consideró variable con la altura, lo cual representa una situación más realista, no siendo posible reproducir estas condiciones en el túnel de viento del laboratorio. Esto puede explicar las pequeñas diferencias observadas entre las fuerzas adimensionales obtenidas experimental y numéricamente, algo mayores para los resultados en la dirección longitudinal del puente (Tabla 5). Sin embargo, los resultados son congruentes entre sí, habiéndose además reproducido prácticamente los mismos valores para los dos modelos a escala ensayados.

En base a esta validación experimental en túnel de viento de los resultados de las simulaciones CFD, puede confirmarse el efecto de sombra observado en los cálculos.

6. Conclusiones: optimización de los coeficientes de fuerza

La Tabla 6 muestra de forma simplificada los principales resultados del análisis realizado.

Tabla 6. Resumen de coeficiente de arrastre.

Sección	Dirección del viento	Ubicación	CFD		
			3D	2D	EC
brazos (abajo)	90°	expuesto	1.8	1.0	1.90
		sombra	0.4	-0.1	
brazos (mitad superior)	90°	expuesto	1.3	1.1	1.90
		sombra	-0.7	-0.3	
	45°	expuesto	-	1.3	1.90
		sombra	-	0.9	
mástil	90°	N/A	1.4	0.9	1.50
	45°	N/A	-	1.9	

A la vista de los resultados presentados en este artículo, se confirman ciertas conclusiones con respecto a la respuesta del pilono frente a viento:

1. En general, los coeficientes de fuerza obtenidos según la norma EN1991-1-4 son ligeramente superiores a los obtenidos con simulaciones CFD. Esto es coherente con la idea de que el procedimiento de la norma es simplificado y debe cubrir una amplia gama de casos particulares.
2. En la dirección transversal del puente, existe un efecto barrera en el brazo de sotavento con respecto al de barlovento. Esto no se tiene en cuenta al utilizar la formulación simplificada, por lo que la carga de viento podría sobrestimarse significativamente al considerar ambos brazos igualmente cargados.
3. Hay ciertos efectos relacionados con la separación variable de los brazos que hacen que la distribución de la presión no sea uniforme en toda su longitud.

Finalmente, con el fin de afinar las acciones del viento sobre el pilono para el cálculo de los estados límite, se propone adoptar los siguientes coeficientes de fuerza:

- Base: $c_{f,x} = 1.35$; $c_{f,y} = 1.8$.
- Brazos: $c_{f,x} = 1.32$; $c_{f,y} = 1.5$.
- Mástil: $c_{f,x} = 1.5$; $c_{f,y} = 1.9$.

Estos coeficientes se determinan por ajuste de datos a partir de los resultados de las simulaciones CFD, considerando un margen de seguridad debido a la incertidumbre del modelo.

Agradecimientos

Agradecemos nuestros compañeros del departamento de estructuras de Tyspa Madrid, y especialmente al jefe del proyecto Fernando Cea Soriano, su predisposición a la colaboración y la confianza depositada en nuestro equipo para el desarrollo del estudio de estabilidad aerodinámica del puente Matlab Uttar-Gazaria en Bangladesh. Agradecemos también a todos los técnicos del ITER (Instituto Tecnológico de Energías Renovables de Tenerife) su implicación en el desarrollo de la campaña experimental.

Referencias

- [1] Sánchez Jimenez, J. L., Cea Soriano, F., Palacios García, G. & Fernández Moreno, F. (25-27 de junio de 2025) *Puente Atirantado Matlab Uttar – Gazaria en Bangladés*. IX Congreso Internacional de Estructuras. De la ACHE, Granada, España.
- [2] British Standards Institution (2005) *Eurocode 1: Actions on structures–Part 1-4: General actions–Wind actions* [BS EN 1991-1-4:2005+A1:2010](#).
- [3] Ministry of Housing & Public Works of Bangladesh (2020) *Bangladesh National Building Code* [BNBC 2020](#).
- [4] Franke, J., Hellsten, A., Schlunzen, H. & Carissimo, B.(2007) Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment. COST European Cooperation in Science and Technology, [hal-04181390f](#).
- [5] American Society of Civil Engineers (2021) *Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures* [ASCE/SEI 49-21](#).