

Estrategias de mitigación de la vibración inducida por vórtices en puentes

Vortex induced vibration mitigation strategies in bridges

José María Terrés-Nícoli^a, J. Peter C. King^b, Gregory A. Kopp^c

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Principal Oritia & Boreas, Profesor Universidad de Granada.

terresnicoli@oritiayboreas.com

^b Dr. Ingeniero Civil, Western University, Director de Consultoría (BLWTL) pking@uwo.ca

^c Dr. Ingeniero Mecánico, Western University, Director (CSSL), gkopp@uwo.ca

RESUMEN

La vibración inducida por vórtices es una inestabilidad aerodinámica normalmente asociada a vientos de baja intensidad y de mayor recurrencia. Esta inestabilidad autolimitante no compromete estados límite últimos pero sí puede limitar estados límite de servicio o fatiga. La detonación puede estar relacionada con inestabilidades en la estructura del flujo de diversa naturaleza y no exclusiva ni necesariamente con las propias de vórtices en la estela. Como resultado de las distintas interacciones de la vorticidad asociada, se podrán excitar diversos modos de torsión y flexión. Se presentan distintas estrategias de mitigación para este tipo de vibración atendiendo a los mecanismos de desarrollo de la interacción dinámica.

ABSTRACT

Vortex induced vibration is an aerodynamic instability normally associated with low intensity winds and higher occurrence. This self-limiting instability does not compromise ultimate limit states but may limit service or fatigue limit states. Triggering may be related to instabilities in the flow structure of different nature and not exclusively or necessarily to those of vortices in the wake. As a result of the various interactions of the associated vorticity, various torsional and bending modes may be excited. Different mitigation strategies for this type of vibration are presented according to the development mechanisms of the dynamic interaction.

PALABRAS CLAVE: aerodinámica de puentes, vibración inducida por vórtices, mitigación.

KEYWORDS: bridge aerodynamics, vortex-induced vibration, mitigation.

1. Fenomenología. Concepto

La vibración inducida por vórtices (VIV) es un fenómeno aeroelástico normalmente asociado a vientos de baja intensidad y por tanto de mayor recurrencia. A diferencia de otras inestabilidades de carácter autoexcitante como el galloping o flutter, entre otras, la VIV es autolimitante y por

esto, normalmente, no compromete estados límite últimos, pero sí puede limitar estados límite de servicio o fatiga. Los propios mecanismos en sí responsables de la interacción dinámica son complejos y objeto de investigación en la actualidad. La vulnerabilidad

de una sección de tablero u otro elemento no obliga a la necesaria eliminación de esta. La valoración de la aceptabilidad de estas vibraciones se debe hacer en integración con el correspondiente modelo probabilístico micro-climático de viento y de los criterios de servicio o modelos de fatiga para los elementos en cuestión. Si bien actualmente es difícil que comprometan Estados Límite Últimos si condicionan el diseño dada su recurrencia y complejidad o incluso pueden llevar a correcciones geométricas o implementación de soluciones de mitigación cuando no se detectan previo a la ejecución.

El interés por la vibración de los cables se remonta a la antigua Grecia (véase, por ejemplo, el arpa eólica). El estudio científico de la vibración inducida por el flujo del cilindro es vasto y comienza a finales de la segunda mitad del siglo XIX con el trabajo de pioneros como Raleigh o Strouhal. Sin embargo, los fenómenos son complejos y todavía hay una serie de preguntas fundamentales para las que no hay una respuesta clara.

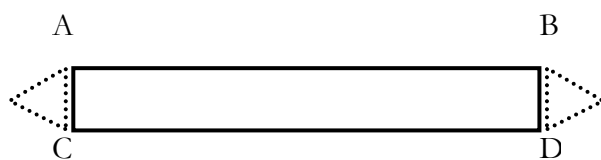


Figura 1. Prisma rectangular con bordes de ataque y salida triangulares superpuestos que forman una figura hexagonal con características de resistencia reducida comunes en los puentes flexibles modernos ($c/D=7$)[1].

Excepto en el caso del flujo crepitante a bajo Re , el flujo alrededor de un cilindro estacionario implica la separación de la capa límite y las dos capas de cizalladura libre correspondientes. La estructura del flujo resultará de la interacción de las capas de cizallamiento en la región de la estela. A ciertos Re , la interacción de las dos capas de cizalladura

dará lugar a un desprendimiento organizado y alterno de vórtices de cada lado. El desprendimiento sincronizado dará lugar a un campo de presión fluctuante en la superficie del cuerpo estacionario. El cilindro vibrará bajo esta carga si no es rígido sino flexible (o vinculado a un sistema de muelles de cierta rigidez y amortiguación). Se ha observado cómo el movimiento resultante del cuerpo afecta a la estructura de flujo y al forzamiento descritos anteriormente. Se han asociado diferentes modos de desprendimiento de vórtices, que pueden implicar desprendimiento de vórtices individuales o pares de vórtices a cada lado, a diferentes estados (2S, 2P, S+P..., ver Zasso et al., 2008 [2]). Aquí se observa lo significativas que son las diferencias de la estructura del flujo alrededor de un cilindro oscilante en comparación con el caso estacionario y dan lugar al desarrollo de fuerzas de diferente naturaleza y magnitud.

El flujo alrededor de un prisma rectangular asimilable a tableros de puentes puede implicar más mecanismos dependiendo de su relación cuerda-profundidad, incluyendo el desprendimiento de vórtices en el borde de salida (TEVS), el desprendimiento de vórtices en el borde de ataque (LEVS), el vórtice de impacto en el borde de ataque (ILEV) y las interacciones entre ellos (interacción de vórtices, VI). Se ha observado que esta formación y estructura de vórtices es sensible a las perturbaciones a través del flujo medio, que actuando a una frecuencia particular pueden desencadenar la inestabilidad a la misma frecuencia. Tales perturbaciones pueden originarse por la respuesta de fondo del cuerpo a su frecuencia natural. Los vórtices originados debido a esta excitación pueden denominarse vórtices inducidos por el movimiento (MIV). La existencia de MIV junto con el desarrollo gradual de una estructura de

flujo diferente debido al movimiento del cuerpo, como se observa en el cilindro, aumenta la diferente naturaleza y magnitud del campo de presión y la fuerza resultante en comparación con el caso estacionario.

Los puentes flexibles modernos de gran-media luz suelen incorporar bordes de ataque y de salida aerodinámicos para reducir la importante carga a lo largo del viento (LE) y posiblemente la fuerza de los vórtices desprendidos en TE (véase el puente del Tercer Milenio, Figura 2). La opción más práctica es colocar un carenado triangular manteniendo la profundidad necesaria para proporcionar la rigidez vertical necesaria (véase la Figura 1 adjunta para $c/D=7$). Esto puede justificar por qué las formas hexagonales son cada vez más comunes en los tableros de puentes. Desde el punto de vista aerodinámico, en comparación con el prisma rectangular, cabe prever que la adición de los bordes de ataque y de salida alterará los mecanismos descritos. El efecto puede ser más significativo en el borde de ataque, donde el flujo BL sobre las superficies del borde de ataque puede afectar a la estructura y a la inestabilidad de la capa de cizalladura incidente. Dependiendo de la relación cuerda/profundidad, el flujo separado se reincorporará o no a lo largo de la parte trasera. No se espera que la forma del borde de salida afecte en gran medida a la estructura del flujo si este permanece separado en las proximidades de «B» en la Figura . Si se reincorpora de forma permanente o intermitente, cabe esperar que la forma del borde de salida tenga algún efecto en la formación de vórtices y en la fuerza de estos. La compleja aerodinámica de los tableros de puentes con estas formas se evalúa normalmente mediante intensos programas experimentales. Sin embargo, se desconocen los mecanismos de

la estructura del flujo que subyacen a los diferentes fenómenos aeroelásticos.

Los tableros de puente son cuerpos elongados cuya estela puede diferir claramente de la clásica estela de vórtices de Von Karman de un cuerpo bidimensional que frecuentemente se asocian a este fenómeno aeroelástico. Los mecanismos de detonación pueden estar relacionados con inestabilidades de la capa de cortante en bordes de ataque en tableros a barlovento, la inestabilidad y desprendimiento a sotavento e interacciones entre las mismas, entre otras. Como resultado de las distintas interacciones de la vorticidad asociada a estas estructuras de flujo se podrán excitar diversos modos de torsión y flexión.

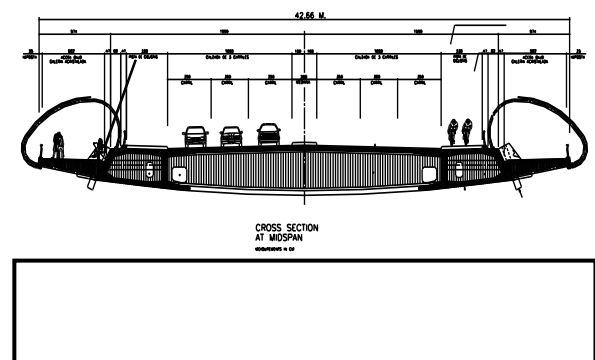


Figura 2. Ejemplo de secciones de tableros que difieren del cuerpo romo. Puente del Tercer Milenio (España), arriba. Tsing Lung (HK) abajo.

La vibración inducida por vórtices es un fenómeno complejo que involucra disciplinas como la mecánica de fluidos, la dinámica de estructuras y la teoría de vibraciones, estudiado mediante modelos matemáticos, experimentales y computacionales. Su estudio es relevante en diversas áreas de investigación, como las oscilaciones inducidas por el viento en puentes, cables y chimeneas, la vibración en infraestructuras hidráulicas, la tecnología marina (estructuras en alta mar y portuarias) y sistemas industriales, como el diseño de motores.

Entre las formas geométricas propensas a experimentar vibraciones inducidas por vórtices

(cuerpos VI, según Sarpkaya, [3]), el cilindro es el que ha despertado mayor interés. La literatura sobre este fenómeno es extensa, con revisiones destacadas como las de Sarpkaya [3], Williamson y Govardhan [4]. A pesar de los avances significativos en el estudio de la vibración inducida por vórtices en cilindros, el problema aún no se comprende completamente. Persisten incógnitas tanto sobre la naturaleza física del fenómeno como sobre la influencia de ciertos parámetros intrínsecos, tales como la forma y acabado superficial del cuerpo, la intensidad y escala de la turbulencia, la masa y el amortiguamiento de manera independiente, la histéresis, la relación de aspecto, el efecto de bloqueo, el número de Reynolds, la viscosidad del fluido o las incertidumbres experimentales (parámetros de Schewe, [6]).

La mayoría de los estudios se han centrado en el modo de vibración vertical inducido por las fluctuaciones de presión superficial generadas por la emisión de vórtices en una estela. Sin embargo, la respuesta de cuerpos romos distintos a los cilindros puede implicar otras estructuras de vórtices y modos de vibración, como los vórtices inducidos por el movimiento o los que se desplazan a lo largo de cuerpos con longitudes de cuerda extendidas ([4, 5]), los cuales pueden excitar otros modos, como los torsionales.

Existen, por tanto, distintos tipos de vórtices inducidos o no por la propia vibración en la estela o en el propio cuerpo que pueden interaccionar con el mismo llevando resultando en la detonación de la inestabilidad. Este es el caso especialmente en formas bidimensionales como los tableros de puentes.

2. VIV en puentes

En la búsqueda de un mejor rendimiento aerodinámico—menor resistencia, mayor rigidez torsional y reducción de la emisión de vórtices—las secciones transversales de los tableros de puentes modernos han evolucionado con el

tiempo, adoptando formas más aerodinámicas. Como resultado, estas secciones han pasado de ser cuerpos romos a formas que, si bien no son perfiles aerodinámicos en sentido estricto, tampoco pueden considerarse completamente romas, situándose en un punto intermedio entre ambas categorías.



Figura 3. Modelo aeroelástico integral Ampliación Puente de Rande, los dos cajones laterales se unen articulados al central del puente original (Ortía&Boreas, 2017 [7]).

El flujo es aún más complejo en estructuras compuestas por dos de estas formas curvadas, similares en algunos aspectos a un perfil aerodinámico, pero con un borde de ataque y de salida romo, además de un espacio intermedio. Este es el caso de algunos puentes de vigas cajón gemelas, como el puente Stonecutters o el puente Tsing Lung, ambos previstos para ser construidos en Hong Kong (Figura 1). Este es el caso especialmente cuando estos cajones se vinculan mediante rótulas permitiendo el giro entre ellas como en la ampliación del Puente de Rande (Figura 3, [7]).

En este sentido, el comportamiento aerodinámico de los tableros de puentes modernos puede diferir significativamente del desprendimiento de vórtices típico de Kármán, ya que involucra formas aerodinámicas con bordes romos, cuerpos alargados con obstáculos (como barreras de seguridad) y bordes de ataque y salida oscilantes. La aerodinámica de estas configuraciones aún no ha sido completamente comprendida. Además, cuestiones como los efectos del número de Reynolds (Re) en pruebas experimentales o numéricas—frecuentemente ignoradas en cuerpos romos—podrían representar un desafío relevante ([6]).

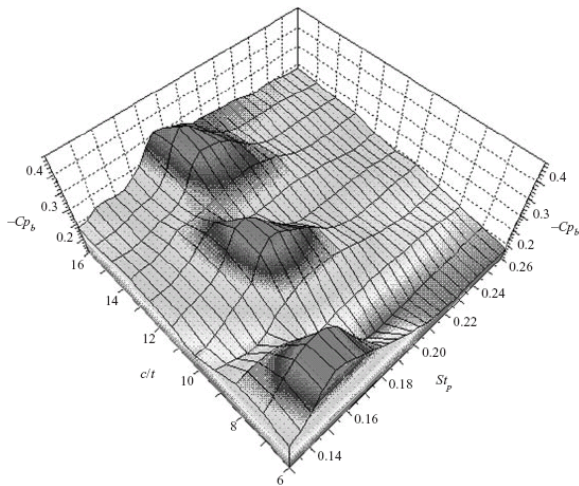


Figura 4. Caracterización de tipo y topológicas de vórtices capaces de excitar vibración o ser inducidos por la misma ([8]).

El origen del forzamiento en los tableros de puentes podrá estar en y no exclusivamente:

- vórtices inducidos por el movimiento o por el flujo (MIVs)
- vórtices derivados de la capa de cizalla incidente, eje de ataque (ILEVs)
- y/o vórtices de estela (TEVs) y clásicos de Von Karman en sus modalidades 2S, 2P o S + P.

Se puede identificar la naturaleza del forzamiento en función de varios parámetros de forma y, principalmente elongación en base a la bibliografía existente (Figura 3).

Una vez sea caracterizada la tipología del/los vórtices actuantes, es posible la

modelización de la respuesta ya sincronizada mediante modelos de oscilador lineal 1D como:

$$M\ddot{y}_r + c\dot{y}_r + Ky_r = F_L \quad (1)$$

Donde la forzadora presenta sus dependencias

$$F_L = F_L(\ddot{y}_r, \dot{y}_r, y, U, t) \quad (2)$$

Estas dependencias de la forzadora en (2) para el caso, por ejemplo, de vibración transversal al flujo (L, lift) de la variable reducida y_r para una velocidad de convección U se pueden modelizar con esquemas sencillos como [1]:

$$M\ddot{y}_r + c\dot{y}_r + Ky_r = \frac{1}{2}\rho U^2 D \left[Y_1\left(\frac{f_s D}{2\pi U}\right) \left(1 - \varepsilon \frac{y^2}{D^2}\right) \frac{\dot{y}}{U} + Y_2\left(\frac{f_s D}{2\pi U}\right) \frac{y}{D} + \frac{1}{2}C_L\left(\frac{f_s D}{U}\right) \sin(2\pi t + \phi) \right] \quad (3)$$

Estos modelos y similares como los reflejados en algunas normas se basan en evoluciones más o menos elaboradas del modelo de Van der Pol. La incertidumbre normalmente estriba no en la estimación de la amplitud de la vibración resultante si no en la determinación de la materialización en sí de la vibración.

Adicionalmente la retro alimentación carga respuesta (ecuación 2) presenta ciertas complejidades que hace que las formulaciones como la presentada en la ecuación 3 puedan ser eficaces en la estimación de amplitudes en condiciones, muchas veces, muy conservadoras. De esta forma bien puede servir como criterio de aceptación conservador si, por ejemplo, se tiene que para la curva de Wöhler del detalle en sí o análisis por técnica de hotspot se tienen carreras por debajo de la tensión límite de fatiga. En caso de que superen este nivel, será necesario una mejor estimación de la amplitud vía experimental, así como el anidado con el clima de viento correspondiente,

La sincronización de la compleja interacción dinámica fluido estructura es

especialmente sensible a parámetros entre otros como:

- la turbulencia atmosférica, su intensidad y también y muy especialmente su estructura espacial en las tres dimensiones e interrelación con las tres intensidades o funciones de densidad espectral mediante tensores espectrales de coherencia espacial y tensores de escalas integrales.

- la capacidad de disipación de la estructura inherente o mediante dispositivos añadidos de control y su efecto en los mecanismos de retroalimentación de energía en la interacción dinámica

- la estructura espacio temporal del flujo incidente en términos de uniformidad y transitoriedad [1]

Son estos efectos en la sincronización de la VIV los que en ocasiones resultan más difícil de predecir y evidencian la necesidad de monitorización in situ de las condiciones de viento. Alternativamente, ensayos en túnel de viento de capa límite de modelos integrales menos conservadores o seccionales en flujo uniforme que confirmen o descarten la vulnerabilidad. Los modelos numéricos actualmente tienen limitaciones en la predicción del efecto de estos flujos altamente transitorios, no estacionarios, no uniformes, tridimensionales en la interacción dinámica con cuerpos romos.

La interacción dinámica se puede producir en el propio tablero, pero también en pilonas y torres o elementos de la superestructura como mástiles, luminarias, elementos de barreras laterales, cables, péndolas (Figura 5) y tirantes en disposiciones tanto inclinadas como verticales con sección recta circular o en función de la vulnerabilidad a la acreción de hielo alrededor.

2.2 Mitigación

En función de la amplitud y/o de la recurrencia de la VIV en caso de detonarse, puede ser necesario reducir mitigar esta inestabilidad.

En primer lugar, y antes de la puesta en servicio, se puede determinar el amortiguamiento inherente y la turbulencia contando con una medida de mitigación diseñada. Dado que la práctica obligada es la de utilización de valores máximos de estos parámetros conservadores a falta de valores medidos en sitio, los valores medidos podrían confirmar la no detonación de la inestabilidad. Ésta ha sido la estrategia en puentes en construcción como el Storebaelt o construidos tras la observación del fenómeno. En el caso del puente de Storebaelt se previó una solución de difusor para ser implementada (como resultó ser el caso) en caso de que los valores de esos parámetros resultaran menores a los correspondientes al onset de la inestabilidad que había sido estudiada en ensayos previos.



Figura 5. Puente con péndolas susceptibles de VIV (Puente de Antonio Raimondi, Perú)

En segundo lugar, durante la construcción del puente, se puede disponer una solución actualmente y realizar ensayos en túnel de viento, para comprobar que se mitiga suficientemente esta inestabilidad. Dentro de esta estrategia se pueden emplear varias líneas de acción aerodinámica y mecánica.

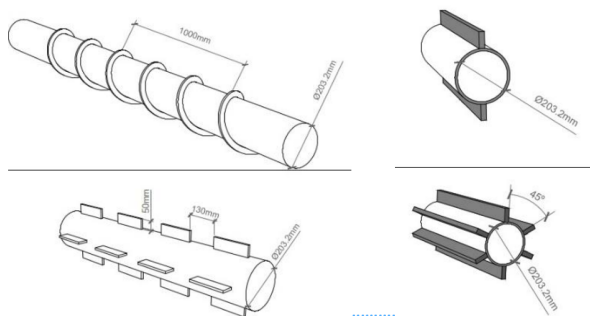


Figura 6. Ejemplo de soluciones aerodinámicas de revolución con geometría adaptada las necesidades de mitigación, diámetro y disposición del cuerpo de revolución.

a. consistentes a modo de difusor, facilitando más momento en la estela próxima y posiblemente debilitando suficientemente la formación de los vórtices responsables. Las variaciones de esta solución consistirían en formar más planos abrazando la forma. Ejemplo del puente de Storebaelt.

b. consistentes en materializar slots o “ventanas” que faciliten la ecualización de las presiones e igualmente posiblemente neutralizando la vorticidad a sotavento. (ver por ejemplo puentes de Hissaura o Huallaga).

c. mediante la distorsión longitudinal de la sincronización, ampliamente utilizada en cuerpos de revolución (Figura 6).



Figura 7. Ensayo seccional en túnel de viento de péndolas para la determinación de necesidades de disipación específicas y verificación de soluciones aerodinámicas.

d. tal y como se ha explicado anteriormente la VIV es muy sensible al amortiguamiento inherente. Por lo tanto. se plantean como estrategias para la mitigación las

consistentes en añadir capacidades y cativa adicional a través de dispositivos de control que pueden consistir en masas sólidas líquidas o granulares sintonizadas en el espectro de frecuencias de interés.

En cualquiera de las estrategias se recomienda el ensayo y diseño de una estrategia de mitigación según la naturaleza de la actuación. A priori y al estado de la técnica, no es posible determinar qué opción de mitigación es más efectiva con lo que es importante realizar el ensayo para determinar la mejor solución.

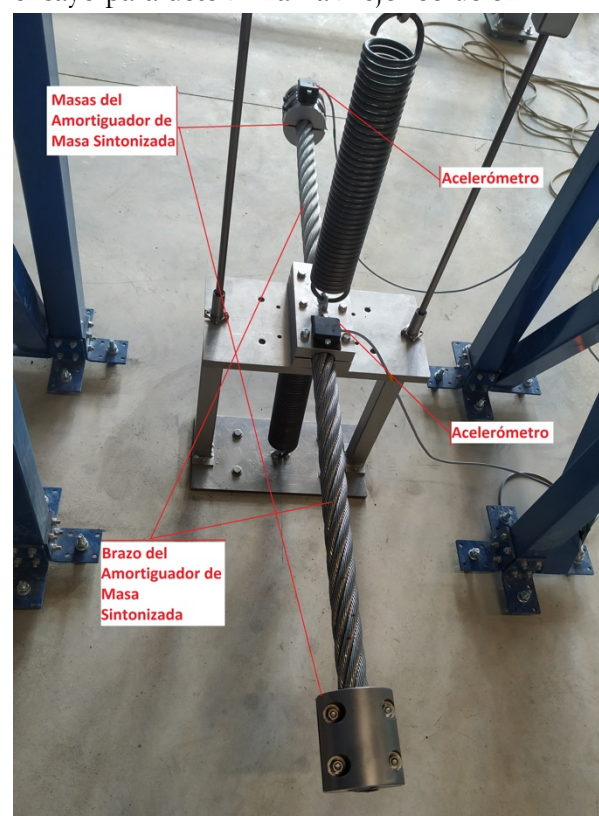


Figura 8. Ejemplo de sistema de disipación consistente en un TMD de doble masa con disipación en cable.

3. Ejemplos de mitigación de VIV en puentes

Se refieren a continuación algunos ejemplos de fenómenos de vibración inducida por vórtices en puentes en distintas modalidades. No se pretende, no obstante, presentar toda las opciones metodológicas y casuísticas de una forma exhaustiva por razones de espacio sino

con una orientación práctica e ilustrativa del fenómeno.

3.1 Puente de Storebaelt, Dinamarca

Este puente en Dinamarca con sus 1624 m de luz principal fue el puente más largo del mundo en su momento y es posiblemente uno de los puentes más estudiados a efectos vibración inducida por vórtices. Esta inestabilidad había sido estudiada en sumo detalle incluso proveyendo soluciones efectivas para la misma en la línea de las descritas en el apartado a de la sección anterior. Poco antes de su inauguración se confirmó a la vista de la capacidad disipativa y condiciones de turbulencia que convendría la mitigación para lo que se implementaron elementos en ambos bordes inferiores del tablero hexagonal.

El comportamiento de la respuesta inducida por vórtices (VIV) mostró características consistentes en términos de amplitud para velocidades de viento crecientes y decrecientes. Los ensayos realizados confirmaron que la velocidad de inicio de la respuesta en vientos decrecientes se mantiene dentro del rango de meseta observado para vientos crecientes, lo que sugiere un patrón predecible en la evolución de la respuesta estructural ante cambios en la velocidad del viento.

En cuanto al desprendimiento de vórtices y los mecanismos de inestabilidad de la capa de cizalladura, se identificó que el borde de fuga es la principal fuente de fluctuaciones de presión cuando el puente está inmóvil. Estos vórtices afectan la estabilidad de la capa de cizalladura en el borde de ataque, generando una secuencia de efectos aerodinámicos. El inicio de la oscilación se atribuye a los vórtices del borde de fuga (TEV), mientras que los vórtices del borde de ataque (LEV) provocan mayores amplitudes debido a la inestabilidad inducida por el movimiento del puente (MIV). Además, se sugiere que la interacción entre los vórtices generados en ambos bordes podría amplificar las

oscilaciones máximas, aunque este fenómeno aún requiere más estudios para ser completamente comprendido (Figura 9).

En el caso de las vibraciones torsionales inducidas por vórtices, el desprendimiento de vórtices en el borde de fuga parece ser el factor que inicia la vibración torsional, pero la amplificación de las oscilaciones se debe a la inestabilidad de la capa de cizalladura impactante en el ala superior del borde de ataque. Este fenómeno genera una secuencia de vórtices en el borde de ataque, los cuales, al ser transportados por la corriente libre, contribuyen al aumento en la amplitud de la vibración. Durante este proceso, se observa un desfase constante de π en la fuerza de respuesta, lo que respalda la validez de este mecanismo.

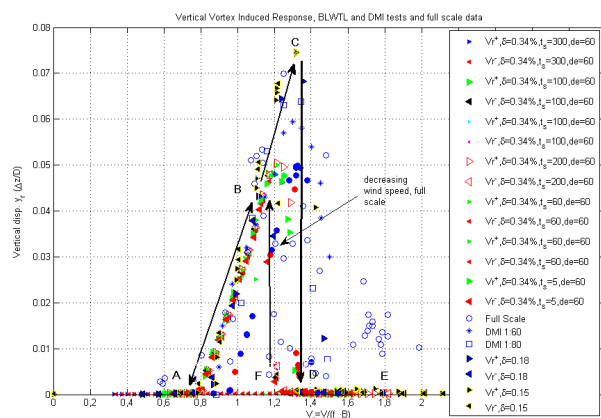


Figura 9. Respuesta a VIV , Puente de Storebaelt, velocidades crecientes, decrecientes, distintas tasas de amortiguamiento, laboratorios y escala real (Terrés-Nícoli 2003[10])

3.2 Puente de Hisgaura, Colombia

Se realizaron ensayos en túnel de viento para evaluar modificaciones en el diseño del puente en Colombia. Específicamente, para verificar el efecto a VIV de una imposta en los bordes delantero y trasero del tablero. Se realizaron pruebas estáticas y dinámicas. y una evaluación de las derivadas aerodinámicas de la sección del tablero en condiciones de flujo de baja turbulencia, un análisis 3D de flutter y buffeting así como en un análisis de las cargas estáticas equivalentes. El análisis de los resultados puso

en evidencia picos de vibración inducida por vórtices (VIV), en las pruebas dinámicas del modelo seccional, en ambas direcciones vertical y torsional, dentro del régimen de velocidades de servicio [11].

Así, se llevaron a cabo ensayos adicionales para valorar y optimizar un sistema de mitigación, capaz de resolver esta inestabilidad. El sistema de mitigación desarrollado, en función de las necesidades del cliente y atendiendo a sus consideraciones de fabricación, consistió en la materialización de slots o “ventanas” en la imposta lateral metálica, generados a partir de diferentes porcentajes y patrones de porosidad, con un máximo del 50 % de porosidad a petición del cliente. En base a esto y cálculos analíticos preliminares se diseñaron posibles medidas de mitigación.

La configuración escogida correspondió a la de la porosidad del 25%, con un patrón estratégicamente dispuesto y compatible con las cargas estáticas equivalentes de diseño previamente prescritas sin la imposta.

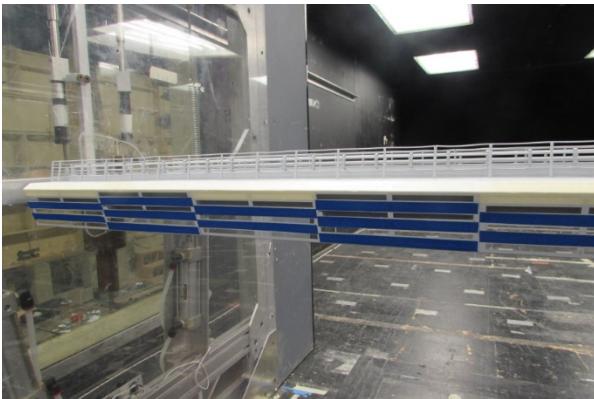


Figura 10. Ensayo seccional en túnel de viento correspondiente a la configuración finalmente escogida, Puente de Hisgaura.

Los modos contribuyentes a la vibración son, fundamentalmente los simétricos 3 y 13 de flexión vertical y torsión respectivamente. La actuación se debe centrar en las zonas en las que estos tienen mayor desplazamiento modal. Atendiendo a los mismos y a las correlaciones esperables así como a la medida de la luz principal, se estimó en un mínimo de 42% centrado en el la luz dado que las luces laterales apenas presentan torsión en el modo 13 y en el

3 se ve muy afectado por las laderas cerca de los estribos que resultarán en la disrupción de las estructuras de vórtices.

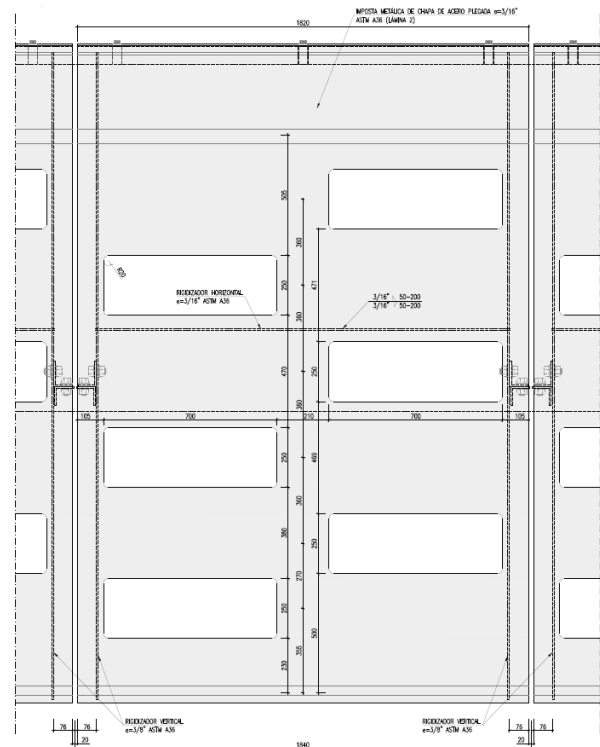


Figura 11. Alzado tipo de la imposta metálica fabricada.

3.3 Puente de Huallaga, Perú

El puente bi-jáceno de Huallaga presenta ambas vigas arriostradas mediante diafragmas como flancos aerodinámicos de entrada y salida. Con el fin de mejorar la estabilidad a efectos de vibración inducida por vórtices se implementó un álabes en línea con las estrategias recogidas en el grupo a de la sección dos de este artículo.



Figura 12. Álabes de estabilización a VIV adoptados para el tablero del Puente de Huallaga.

Si bien pudiera parecer asimilable, difiere en naturaleza de la solución prevista para el puente de Storebaelt en el sentido de que no hace de difusor sino de disruptor. Esta estrategia es similar en naturaleza a alternativas implementadas en norte américa en el pasado tipo *buffer plate* centrales en sección. Si bien puede resultar algo más complejas de dimensionar mediante ensayos seccionales en túnel de viento resultan, según el plan de ejecución, más eficaces en coste y plazo para la implementación en obra.

3.4 Puente de Raimondi, Perú

Este Puente presenta un sistema de péndolas de inclinación variable con números de Scruton que recomiendan la mitigación a efectos de VIV para evitar estados límite de fatiga a medio-largo plazo. Es por esto por lo que se desarrolló un sistema de mitigación en línea con las estrategias del apartado d de la sección dos anterior (Figuras 6, 7 y 8).

4. Conclusiones

Se han presentado los mecanismos propios de la naturaleza de la vibración inducida por vórtices con especial atención a los puentes. Se pone de manifiesto como el entendimiento de la naturaleza de estos mecanismos resulta fundamental a la hora de conceptualizar una solución de mitigación. Se han presentado distintas estrategias de mitigación de la VIV implementadas con éxito en diversos puentes. Las técnicas presentadas atienden a la diferente naturaleza de los mecanismos de interacción.

Agradecimientos

Se agradece aquí la participación de numerosos miembros de los laboratorios BLWT, UWO en Canadá así como LACIAD, Oritia & Boreas en España en asociación tecnológica oficial. Igualmente a las Universidades de Granada y Western University a las que ambos grupos están vinculados.

Referencias

- [1] Terrés-Nícoli, JM. (2008) Mechanisms of vortex induced vibration. PhD Thesis. Universidad de Granada in collaboration with The University of Western Ontario.
- [2] Zasso, A., Belloli, M., Giappino, S., & Mugiasca, S. (2008). Pressure field analysis on oscillating circular cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 24, 628-650.
- [3] Sarpkaya, T. A. (2004). A critical review of the intrinsic nature of vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 19, 389-447.
- [4] Williamson, C., & Govardhan, R. (2004). Vortex-induced vibrations. *Annual Rev. Fluid Mech*, 36, 413-455.
- [5] Terrés-Nícoli, J. M. (2002). *Torsional Vortex Induced Response of The Storebaelt Bridge*. MSc Thesis. London, Ontario, Canada: The University of Western Ontario.
- [6] Schewe, G., & Larsen, A. (1998). Reynolds number effects in the flow around a bluff bridge deck cross section. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 829-838.
- [7] Terrés-Nícoli, JM et al (2017) Estudio de los efectos del viento en la ampliación del Puente de Rande. Oritia & Boreas.
- [8] Mills, R., Sheridan, J., & Hourigan, K. (2002). Response of base suction and vortex shedding from rectangular prisms to transverse forcing. *Journal of Fluid Mechanics*, 461, 25-49.
- [10] 2J. Terres-Nicoli and G. A. Kopp, "Mechanisms of the vertical vortex induced vibration of the storebaelt bridge," in Proceedings of the 11th Americas Conference on Wind Engineering, San Juan, Puerto Rico (2009) pp. 22–26.
- [11] Terrés-Nícoli, J.M. et al "Estudio de los efectos del viento en el puente de Hisgaura, Santander, Colombia", The University of Western Ontario, Faculty of Engineering, BLWT-SS10-2015, London, Ontario, Canada, April 2018.