

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO
PARA PUENTES ATIRANTADOS

INGRID ROCÍO IRREÑO PALOMO
CLAUDIA MARCELA MARTÍNEZ PAREDES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2014

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO
PARA PUENTES ATIRANTADOS

INGRID ROCÍO IRREÑO PALOMO
CLAUDIA MARCELA MARTÍNEZ PAREDES

Trabajo de Grado para optar el título de
Ingeniera Civil

Director:

Ph D. ÁLVARO VIVIESCAS JAIMES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2014

AGRADECIMIENTOS

Damos gracias a DIOS primeramente, ya que sin Él no hubiese sido posible el desarrollo de nuestro proyecto de grado.

A nuestro profesor y director de proyecto Álvaro Viviescas Jaimes por su guía y apoyo en todo el transcurso del trabajo.

A nuestros padres, ya que siempre fueron nuestro apoyo, palabras de ánimo y superación para seguir adelante hasta el final de nuestra carrera universitaria y poder finalmente optar estos logros profesionales.

Contenido

INTRODUCCIÓN	13
1. PUENTES ATIRANTADOS	15
1.1. Generalidades.....	15
1.1.1. Partes y funciones de un puente atirantado.....	16
1.1.2. Reseña Histórica	18
1.1.3. Comportamiento Aeroelástico de Puentes Atirantados	20
2. TÚNEL DE VIENTO.....	25
2.1. Tipos de Túnel de Viento	27
3. ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO.....	30
3.1. Laboratorios más reconocidos.....	32
3.1.1. México.....	32
3.1.2. España.....	33
3.1.3. Canadá.....	36
3.1.5. Argentina	39
3.1.6. Colombia.....	40
3.1.7. Estados Unidos.	41
3.1.8. Francia	42
3.1.9. Brasil.....	43
4. CASOS DE EJEMPLO: ENSAYO EN TÚNEL DE VIENTO DEL PUENTE SOBRE LA BAHÍA DE CÁDIZ.....	45
5. CRITERIOS NORMATIVOS.....	49
6. CONCLUSIONES.....	52
CITAS BIBLIOGRÁFICAS	54
BIBLIOGRAFÍA.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Partes principales de un puente atirantado.....	16
Figura 2 Oscilaciones verticales en un tablero del puente debido al desprendimiento de torbellinos.....	20
Figura 3 Fenómeno de Wake Galloping.....	22
Figura 4 Colapso del tablero del puente sobre el estrecho de Tacoma.....	23
Figura 5 Ejemplo de bataneo de estela.....	24
Figura 6 Nuevo Puente Colgante Carquinez.....	24
Figura 7 Esquema de semejanza geométrica de un modelo, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.....	26
Figura 8 Análisis del viento en túnel de viento.....	27
Figura 9 Túnel de viento de circuito cerrado.....	28
Figura 10 Primer Túnel de Viento de la Universidad de Washington.....	30
Figura 11 Modelo del puente Tacoma, en túnel de viento, Laboratorio de Investigación Estructural, Universidad de Washington.....	31
Figura 12 Túnel de viento de la UNAM, México.....	33
Figura 13 Generador del túnel de viento del Centro de innovación tecnológica y edificación de ingeniería civil, España.....	34
Figura 14 Sala de túnel de viento Ignacio Da Riva, España.....	35
Figura 15 Túnel de Viento BLWTL, Canadá.....	38
Figura 16 Laboratorio del Simulador del Viento.....	39
Figura 17 Laboratorio de túnel de viento de la Universidad Nacional de la Plata, Argentina.....	40
Figura 18 Túnel de viento de la Universidad de Los Andes, Colombia.....	41
Figura 19 Túnel de viento de la Universidad Federal de Río Grande de Sur, Brasil.....	44
Figura 20 Definición de flujo incidente, ejes y fuerzas y momentos en una sección del puente. U_{∞} es la velocidad de la corriente incidente y α el ángulo que forma ésta con el cuerpo.....	45
Figura 21 Vista del camión lista para el ensayo.....	46

Figura 22 Representación esquemática del montaje	47
Figura 23 Determinación de las velocidades críticas de flameo a partir de las derivadas de estabilidad. Lugar de las raíces del determinante de flameo (parte real e imaginaria) para coeficiente de amortiguamiento del 1% en el caso de 6° con barreras.....	48

RESUMEN

TÍTULO: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO PARA PUENTES ATIRANTADOS^{*1}

AUTOR (ES): INGRID ROCÍO IRREÑO PALOMO^{**2}
CLAUDIA MARCELA MARTÍNEZ PAREDES^{**2}

PALABRAS CLAVES: Túnel, Viento, Puente, Atirantado, Laboratorio, Efecto, Aeroelasticidad.

DESCRIPCION:

En éste trabajo de grado se presenta el estado actual sobre el estudio de los efectos producidos por diferentes fenómenos inducidos por la fuerza del viento y su efecto en puentes atirantados. De igual manera se analizan los ensayos realizados en túnel de viento en diferentes laboratorios alrededor del mundo, los cuales son necesarios para entender el comportamiento aeroelástico de los tirantes ante dichos fenómenos. Para éste trabajo se tomaron en cuenta las diferentes aplicaciones investigativas y avances tecnológicos de cada uno de los laboratorios donde se realizaron los ensayos, con el fin de poder entender la clasificación de los túneles de viento.

Además, se describe brevemente el ensayo realizado en túnel de viento para el puente atirantado La Pepa, sobre la Bahía de Cádiz, junto con los resultados obtenidos en dicho ensayo. También se muestran los criterios normativos a tener en cuenta para el diseño de puentes atirantados teniendo en cuenta el efecto del viento, según la norma Americana y la norma europea.

Finalmente, con base en lo analizado, se realizó una descripción detallada en donde se explican dichos fenómenos, además de tener una investigación más minuciosa acerca de los puentes atirantados, los túneles de viento, y los diferentes puentes analizados en cada uno de éstos túneles, para así obtener el estado actual del conocimiento en ensayos en túnel de viento para puentes atirantados.

*1 Trabajo de Grado

**2 Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil.
Director: Álvaro Viviescas Jaimes, Ingeniero Civil.

ABSTRACT

Title: ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO EN ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO PARA PUENTES ATIRANTADOS^{*3}

Author: INGRID ROCÍO IRREÑO PALOMO^{**4}
CLAUDIA MARCELA MARTÍNEZ PAREDES^{**4}

Key Words: Tunnel, Wind, Bridge, Cable-stayed, Laboratory, Effect, Aeroelasticity

DESCRIPTION:

The article presents the current status on the study of the effects produced by different phenomena due to the strength of the wind and its effect on the cable-stayed bridges. In the same facton by analyzing the test carried out in wind tunnels in different laboratories around the world, which are needed to understand the aeroelastic behavior of the straps before these phenomena. To work it they took into accounts the different investigative applications and technological advances of each of the laboratories where the trials were conducted, so as to be able to understand the classification of the wind tunnels.

In addition, we briefly describe the test performed wind tunnel to the cable-stayed bridge La Pepa, on the Bay of Cádiz, together with the results obtained in this test. Regulatory criteria are also shown to be considered for the design of cable-stayed bridges considering wind effect, according to the American standard and European standard.

Finally, based on the analysis, there was a detail description where they explain these phenomena, in addition to having a more thorough investigation about the cable-stayed bridges, the wind tunnels, and the different bridges tested in each and every one of these tunnels, to obtain the current state of knowledge in wind tunnel testing for bridges.

^{*3} Work Degree

^{**4} Industrial University of Santander. Faculty of Engineerings Physicist - Mechanics. School of Civil Engineerings. Director: Álvaro Viviescas Jaimes, Civil Engineering.

INTRODUCCIÓN

Debido a la necesidad de poder cubrir grandes luces especialmente sobre ríos, lagos, cañones entre otros, se produjo el auge de los puentes atirantados alrededor de todo el mundo.

La historia de los puentes atirantados inicia en el siglo XIX cuando aparecieron los primeros, hechos de acero tal como lo fue el puente de DRIBURGH ABBEY en Escocia, que debido a sus fallas presentadas en su construcción hicieron que esta colapsara; lo cual produjo que se descartaran las ideas de este tipo de construcción, sin embargo, después de la segunda guerra mundial se reconstruyeron los puentes colapsados, aplicando nuevas técnicas y se descubre que los puentes de tipo atirantados de grandes luces requieren menor cantidad de materiales y por consiguiente son mucho más económicos.

Actualmente, se han realizado varios ensayos para el análisis de comportamiento de puentes ante el efecto del viento ya que con el ejemplo del Puente de Tacoma se pudo observar que es de vital importancia el análisis del impacto del viento sobre la estructura, ya que si no se toma en cuenta puede ocasionar el colapso del puente.

Colombia no ha sido ajena al uso de esta tipología acerca de los puentes atirantados, casos como el puente Pumarejo o el viaducto Pereira Dos-Quebradas fueron los primeros ejemplos de puentes atirantados en Colombia; más recientemente el Viaducto La Novena y los diseños actuales del nuevo puente Pumarejo que con sus 380 metros de luz central se convertirá en el mayor atirantado del país.

Para la realización de dichos estudios se ha implementado el uso necesario de laboratorios especiales en los casos en donde sea necesario, debido a la gran

influencia del viento en el lugar donde se realizara la estructura, los cuales están dotados de túneles de viento con diferentes características de geometría y propiedades físicas, al igual que la elaboración de la estructura a escala.

Este artículo conllevará a la recopilación de la información histórica de los estudios realizados en los últimos años y análisis de pruebas tanto teóricas como prácticas elaboradas por diferentes universidades y entidades de investigación aeroelástico en distintas partes del mundo; adicionalmente se tendrá como referencia los diferentes artículos publicados por parte de ingenieros especialistas en el tema.

1. PUENTES ATIRANTADOS

1.1. Generalidades

La necesidad de superar obstáculos geográficos con grandes distancias como valles, ríos, etc., obligó a la aparición de tipologías de puentes que resolvieran éste problema. Los puentes atirantados desde el punto de vista funcional se conciben como una solución a grandes luces.

Los avances de diferentes procesos constructivos para estructuras de puentes han hecho que cada vez sean más grandes, flexibles y ligeros, lo que ha provocado que sean más inestables a fuerzas tales como el viento, por lo cual se genera la necesidad de un profundo análisis de ellos, que permita evitar, entre otros, posibles colapsos en las estructuras por éste fenómeno.

Los puentes atirantados son estructuras en las cuales, su tablero está sostenido por una serie de cables rectos e inclinados llamados tirantes, apoyados en sus mástiles. Se caracterizan por ser eficientes para cubrir grandes luces y poseer gran belleza estética.

Es conocido que los puentes atirantados poseen más rigidez que los puentes colgantes en cuanto a la actuación de sobrecargas no simétricas o de viento, además se utiliza menos cantidad de acero en los tirantes que en el cable de colgado. A medida que la luz aumenta y sobrepasa los 1000 metros se presenta su desventaja más visible, debido a que las compresiones ejercidas por los tirantes sobre el dintel obligan a rigidizarlo produciendo así el encarecimiento sobre éste. Sin embargo, en luces de 1000 a 1500 metros se entra a competir entre los puentes atirantados y los puentes colgantes.

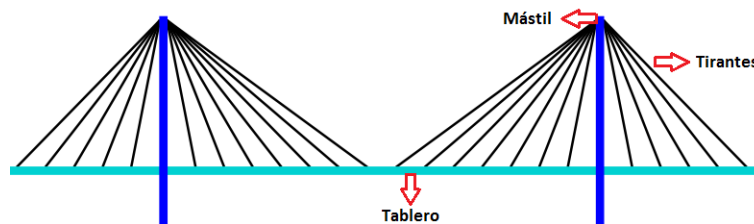
Una de las mayores ventajas que tienen los puentes atirantados sobre los puentes colgantes es que se demuestra que no es necesario un gran porcentaje en la

rigidez de sus anclajes, y su proceso de construcción es más sencillo actuando de manera más sólida, ante las fuerzas del viento; sin embargo, es necesario realizar los estudios en túneles de viento para asegurar su estabilidad aerodinámica.

1.1.1. Partes y funciones de un puente atirantado

Los puentes atirantados están conformados por tres partes importantes que conforma la estructura básica resistente, éstos son el tablero, el mástil y los tirantes.

Figura 1 Partes principales de un puente atirantado



Fuente: Perdomo D. Blogspot [Internet]. Javier David Perdomo. 2011 Ago. Disponible en: <http://ingdavidperdomo.blogspot.com/2011/08/puentes-atirantados.html>

1.1.1.1. Tablero

Está soportado de forma elástica por los tirantes, haciendo que sus cargas sean transmitidas al mástil por medio de los mismos.

1.1.1.2. Mástil

Elemento que sirve para sostener el anclaje fijo de los tirantes. Su altura depende de la distancia libre del tablero, el sistema de atirantamiento, entre otros factores.

Hoy en día existen muchos tipos de mástiles, cuyo nombre está en función de su forma geométrica. Los más comunes son:

- ✓ Y invertida o A prolongada con un pilar vertical
- ✓ V invertida
- ✓ Pila en H
- ✓ Pilón de Borde
- ✓ Pilón en forma de diamante

1.1.1.3. Cables o Tirantes

Para los puentes atirantados se conocen dos tipos de cables:

- CABLES DE ATIRANTAMIENTO: tirantes que van conectados desde el mástil y anclados en el tablero. Su función principal es la repartición de cargas distribuidas a lo largo del tablero de la estructura.
- CABLES DE RETENCIÓN: tirantes que cumplen la función de evitar movimientos en la cabeza del mástil, y a su vez, según sea el caso ayudaran en el atirantamiento del puente.

Cabe señalar que debido a problemas de corrosión y fatiga los tirantes pueden deteriorarse lo que afecta el comportamiento de rigidez dinámica de los mismos, por lo cual es importante tener en cuenta estos factores al momento de su diseño.

[1]

1.1.1.3.1. Tipos de atirantamiento

Actualmente existen muchas clases de puentes atirantados que dependen del número de tirantes y de la separación entre ellos, tales como:

- ✓ Abanico o Radianes
- ✓ Arpa
- ✓ Semiarpa

1.1.2. Reseña Histórica

Los puentes han sido de gran utilidad desde sus comienzos para facilitar la movilización en lugares que presentan obstáculos geográficos. Según su funcionalidad se encuentra los atirantados que surgieron a partir de la evolución de los puentes colgantes. [2]

En tiempos ancestrales los detalles que dieron inicio a los puentes atirantados fueron dados en el lejano oriente, por puentes construidos de bambú conectados por parras (planta enredadora).

Los primeros registros escritos indican que el primer puente atirantado fue construido por el veneciano Verantius en 1617, que construyó una cubierta hecha de madera, la cual estaba sujeta por barras inclinadas, amarradas a torres de albañilería. Seguidamente, en 1784 el carpintero alemán Loescher, diseñó una estructura completamente en madera que trabajaba como un puente atirantado; desafortunadamente ninguno de éstos puentes han sido conservados. Otros diseños de ésta tipología de puentes fueron realizados por los ingenieros británicos Redpath y Brown, con un puente peatonal cuya longitud fue de 33.6 metros, con tirantes en semiarpa. [2]

Las primeras construcciones se desarrollaron durante la época de la edad media, hechas a partir de materiales como madera y con cuerdas que servían como tensores, que funcionaban en la entrada de castillos existentes en esa época.

Los desarrollos más innovadores de puentes atirantados datan desde finales del siglo XVI y principios del XVII, en donde fueron encontrados los primeros diseños de puentes colgantes y atirantados en el libro de *Machinae Novae* de Fausto Veranzio. [3]

Uno de los primeros puentes de esta tipología desarrollados en la historia es el Puente Victoria en Bath (Reino Unido) a mediados del siglo XIX, donde la aparición de estos abrieron paso para la creación de puentes atirantados con cables más rígidos. [4]

Sin embargo, la construcción de los primeros puentes hechos de acero se desarrolló en 1817 con el puente Dryburgh Abbey sobre el río Tweed en Escocia, con una luz de 79.3 metros, que seis meses después colapsó debido a las fuertes oscilaciones que fueron presentadas en el tablero de la estructura. Adicionalmente, en 1824 se construyó el puente sobre el río Saale en Alemania, con una luz de 78 metros, que un año después colapsó a causa de excesos de cargas que no pudo soportar la estructura, lo cual hizo que para ese momento los puentes atirantados se dejaran a un lado y comenzara el auge de los puentes colgantes por más de 100 años.

Debido al avance de los puentes colgantes se observó que los cables suspendidos no servían de resistencia para el transporte de ferrocarriles, haciendo que tuviese mayor desarrollo el uso de cables totalmente rígidos a lo largo de todo el tablero, más conocido como puentes atirantados lo cual permitió un desarrollo en la infraestructura en diferentes países, tal como el caso del puente Pumarejo sobre el río Magdalena en Barranquilla diseñado por el ingeniero civil Riccardo Morandi que cuenta con 4 tirantes, los cuales se encuentran recubiertos de concreto.

1.1.3. Comportamiento Aeroelástico de Puentes Atirantados

1.1.3.1. Fenómenos de Viento

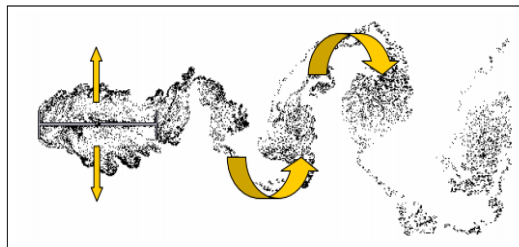
Según Simiu y Scanlan [5], la interacción fluido-estructura puede dar lugar a diversos fenómenos que son crecientes en función del tiempo, que generan inestabilidades aeroelásticas en diferentes estructuras, entre los cuales están:

1.1.3.1.1. Desprendimiento de Torbellinos o Vortex Shedding

Fenómeno que es generado por generaciones y desprendimientos de torbellinos o torrentes de aire también llamados *vortex shedding*, que se generan por la separación del flujo del aire debido a su encuentro con obstáculos que para el caso de los puentes será el tablero, y que se caracteriza por el desprendimiento consecutivo de torbellinos de sentido rotacional alternado llamados vórtices de Von Kármán.

Éste fenómeno aeroelástico genera fuerzas verticales y que al momento de su contacto con el tablero ocasiona vibraciones en direcciones paralelas a la fuerza.

Figura 2 Oscilaciones verticales en un tablero del puente debido al desprendimiento de torbellinos.



Fuente: NIETO MOURONTE, Felix. Disponible en el Catalogo Bibliográfico de Tesis de Doctorado en la Universidad de Coruña:

http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/1033/5/NietoMouronte_Felix_td_2006_2de6.pdf.

En muchos puentes se ha observado éste fenómeno, tal como es el caso del puente Golden Gate que presentó oscilaciones torsionales que obligaron a aumentar su rigidez.

Wardlaw indica que el desprendimiento de torbellinos se dio también en los siguientes puentes colgantes: Mil Islas, Isla de Deer, Fykesund y el Bronx-Whitestone; así como en los puentes atirantados de Longs Creek y el de Kessock. [8]

En los puentes construidos recientemente el fenómeno ha sido evitado mediante amortiguadores de masa en los vanos de aproximación.

1.1.3.1.2. Galope Transversal o Galloping

Fenómeno que provoca movimientos de gran amplitud en dirección normal al flujo de aire, con frecuencias menores a las de los torbellinos.

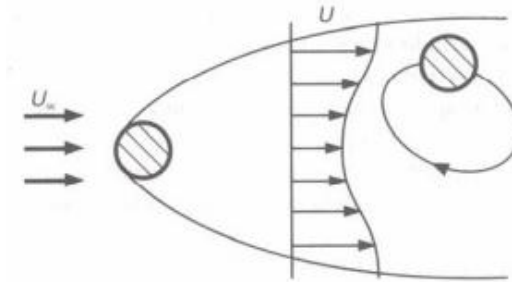
Es muy frecuente su presencia en estructuras esbeltas con secciones transversales rectangulares, y en los cables atirantados de grandes longitudes.

Los efectos de galope ocurren cuando se presenta variación en los ángulos de la dirección del viento con respecto al tablero de la estructura, ya que genera movimientos verticales y de torsión en el puente.

1.1.3.1.3. Galope inducido por una estela o Wake Galloping

Fenómeno que se presenta cuando existen dos obstáculos muy cercanos de tal forma que uno de los cuerpos se encuentra en el inicio del otro.

Figura 3 Fenómeno de Wake Galloping.



Fuente: NIETO MOURONTE, Felix. Disponible en el Catalogo Bibliográfico de Tesis de Doctorado en la Universidad de Coruña: http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/1033/5/NietoMouronte_Felix_td_2006_2de6.pdf.

1.1.3.1.4. Flameo o Flutter

Está definido como un fenómeno de inestabilidad que es causado por la velocidad crítica del viento cuando las fuerzas producidas por el flujo del aire que actúa sobre el tablero del puente se juntan con los movimientos propios del tablero tales como torsión y flexión.

Dentro de los puentes afectados por éste fenómeno se encuentran el puente de Tacoma en Estados Unidos, y el Puente de Jingsha en Japón que cuenta con una luz principal de 500 m y dos luces laterales de 200 m que presentó problemas de torsión a lo largo del tablero de la estructura.

Figura 4 Colapso del tablero del puente sobre el estrecho de Tacoma.



Fuente: NIETO MOURONTE, Felix. Disponible en el Catalogo Bibliográfico de Tesis de Doctorado en la Universidad de Coruña:

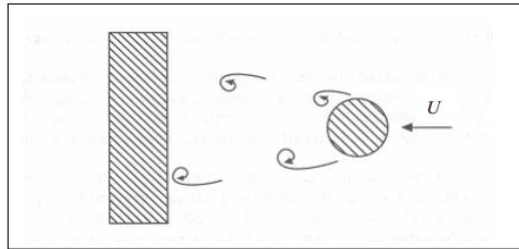
http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/1033/5/NietoMouronte_Felix_td_2006_2de6.pdf.

1.1.3.1.5. Bataneo o Buffeting

El Bataneo es causado por la misma turbulencia de la fuerza del viento manifestado en grandes destellos de viento. Es necesario aclarar que ésta turbulencia se puede dar por sí misma o ser causada por obstáculos que se opongan a su corriente de flujo más conocido como bataneo de estela.

Un ejemplo de bataneo por estela se presenta cuando entre rascacielos próximos en áreas urbanas la dirección del viento es tal que un edificio queda en la estela del otro.

Figura 5 Ejemplo de bataneo de estela.



Fuente: NIETO MOURONTE, Felix. Disponible en el Catalogo Bibliográfico de Tesis de Doctorado en la Universidad de Coruña:

http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/1033/5/NietoMouronte_Felix_td_2006_2de6.pdf.

Un claro ejemplo de éste se encuentra en el puente colgante sobre Carquinez en California, ya que se encuentra muy cercano a los puentes ya construidos en éste estado. Su demolición fue desarrollada a causa de su envejecimiento, problemas sísmicos y aumento de tráfico; por lo cual a causa de ello se realizó un nuevo puente colgante llamado Alfred Zampa Memorial el cual fue inaugurado el 11 de noviembre de 2003.

Figura 6 Nuevo Puente Colgante Carquinez.



Fuente: Disponible en: <http://www.fierasdelaingenieria.com/los-puentes-colgantes-con-mayor-longitud-de-vano-de-los-estados-unidos/>

2. TÚNEL DE VIENTO

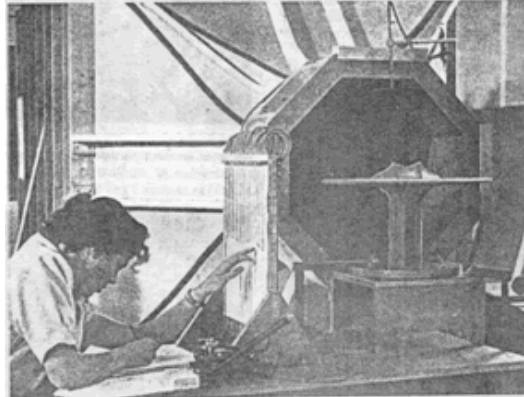
La aeroelasticidad que según Simiu y Scanlan está definida como la “disciplina que estudia la interacción entre el flujo de aire y las fuerzas que provoca en un sólido deformable inmerso en él, teniendo en cuenta que los movimientos de éste modifican a aquellas”. Por lo cual se hace necesaria la creación de laboratorios que permitan el estudio de este tipo de fenómenos. [5]

El túnel de viento es un canal por donde se hace circular aire con velocidades específicas, que permite aplicar un determinado flujo del mismo a una estructura para evaluar su comportamiento.

Los ensayos se realizan en cámaras donde se utilizan modelos a escala con semejanzas del prototipo que pueden ser a nivel seccional o módulos completos. La elección de uno u otro modelo depende por una parte de las capacidades físicas del laboratorio de túnel de viento disponible y por otra parte de las características aeroelásticas del puente y el sitio donde se va a ubicar la estructura.

Los primeros túneles de viento no simulaban el viento natural, sino flujos de aires reducidos con escasas simulaciones de turbulencia, enfocándose inicialmente en estudios aerodinámicos que poco tiempo después se introdujeron a estudios aeroelásticos en diferentes estructuras civiles.

Figura 7 Esquema de semejanza geométrica de un modelo, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina.

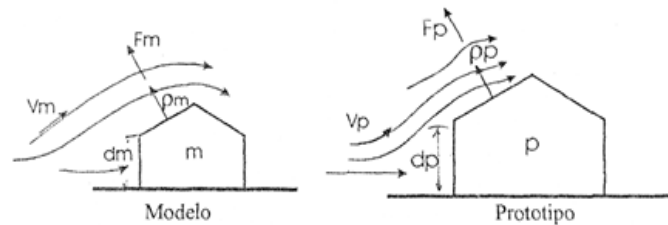


Fuente: Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. Reglamento CIRSOC (Centro de investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles) 102: procedimiento de túneles de viento.

Es importante destacar que desde sus inicios para túneles de viento se tenía en cuenta las siguientes leyes:

1. Semejanza geométrica: relación que debe existir entre el modelo a escala y el prototipo a escala real de la estructura a analizar.
2. Semejanza cinemática: relación entre las velocidades del modelo y del prototipo real en cada punto, es decir turbulencia semejante la cual se hallará a partir de estudios de intensidad de turbulencias presentada en la estructura.
3. Semejanza dinámica: la distribución entre los módulos de fuerza deben ser constantes entre el modelo y el prototipo de la estructura. Los coeficientes de presiones media medidos en el modelo son iguales a los reales en el prototipo. [6]

Figura 8 Análisis del viento en túnel de viento.



Fuente: Universidad Nacional del Nordeste. Argentina. Reglamento CIRSOC (Centro de investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles) 102: procedimiento de túneles de viento.

El objetivo principal del ensayo en túnel de viento es permitir el estudio del movimiento relativo entre el objeto y el aire, que permita obtener datos de presiones, fuerzas, información de la capa límite, y visualizar las líneas de corriente, entre otros; para lo cual se hace necesario el estudio del flujo a partir de diferentes ensayos, que varían en función de su velocidad.

2.1. Tipos de Túnel de Viento

En la actualidad encontramos varios tipos de túneles de viento. Según su propósito aeroelástico se encuentra el túnel de viento de capa límite y el túnel de viento aerodinámico y según el circuito de aire tenemos el túnel de viento de circuito cerrado y el túnel de viento de circuito abierto.

Los túneles de viento de capa límite principalmente utilizados para usos aeronáuticos se caracterizan por tener una gran longitud y sección transversal, además que permiten ensayar modelos completos escalados de estructuras y tener una clara visualización de la deformación y comportamiento del modelo.

Debido a su gran tamaño se requiere de laboratorios muy grandes y de mantenimiento muy costoso.

Por otra parte, los túneles de viento aerodinámicos son de sección transversal y longitud mediana o pequeña por lo que requiere menos espacio para los laboratorios y los experimentos son más económicos ya que utiliza flujo uniforme de baja turbulencia. Debido a esto se dificulta un poco más el estudio de estructuras completas y no se puede visualizar muy bien su deformación.

Para explicar mejor su funcionamiento, en los túneles abiertos se toma el aire directamente de la atmósfera para realizar los ensayos, y después de realizarlos se devuelve nuevamente a ésta. En cambio en los túneles cerrados el aire circula repetidamente por la cámara, teniendo así menos pérdidas de aire, además de permitir tener controlada la densidad, temperatura y presión del aire. Una de las diferencias entre estos dos túneles es el precio, debido a que el túnel cerrado requiere de un espacio mayor para sus instalaciones lo que influye directamente en el precio.

Figura 9 Túnel de viento de circuito cerrado.



Fuente: Disponible en: <http://www.f1aldia.com/10650/tuneles-de-viento-i/>

De forma general en los túneles de viento se debe tener en cuenta lo siguiente:

- ✓ La capa límite atmosférica natural ha sido modelada para tener en cuenta la variación de la velocidad del viento con la altura.
- ✓ Las escalas pertinentes de macro longitud y micro longitud de la componente longitudinal de la turbulencia atmosférica están modeladas aproximadamente a la misma escala que la usada para modelar el edificio u otra estructura.
- ✓ El área proyectada del edificio u otra estructura y alrededores modelados es menor que el 8% del área de la sección transversal de ensayo, a menos que se haga una corrección durante su estudio.
- ✓ Los efectos del número de Reynolds sobre las presiones y las fuerzas están minimizados.

3. ENSAYOS EN TÚNEL DE VIENTO

Los primeros estudios para puentes atirantados por medio de túneles de viento fueron realizados por Farquharson de la Universidad de Washington para analizar el Puente de Tacoma debido a las vibraciones verticales presentadas en el tablero de la estructura.

Figura 10 Primer Túnel de Viento de la Universidad de Washington



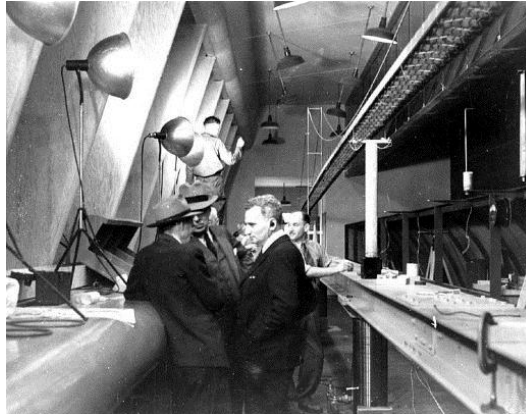
Fuente: Frey, Lawrence E. Disponible en:
http://content.lib.washington.edu/cdm4/item_viewer.php?CISOROOT=/uwcampus&CISOPTR=1707&CISOBX=1&REC=5

El 2 de noviembre de 1940 se realizaron dos modelos a escala para estudiar la hipótesis de las causas de las vibraciones del puente Tacoma, uno con escala 1/200 y el otro con escala 1/20 de la sección del tablero del puente; la primera consistía en realizar agujeros en el alma de las vigas laterales que se encontraban a lo largo del tablero para que diera acceso a la circulación del aire, y la segunda se planteó con un cambio en la geometría del tablero que fuera más aerodinámica en su sección transversal, colocando piezas metálicas curvadas a lo largo del canto, la cual fue la escogida a realizar. Sin embargo no pudo desarrollarse ya que cinco días después sucedió el colapso del puente.

Como consecuencia del colapso del puente de Tacoma, se construyó el primer túnel de viento en 1942 en la Universidad de Washington bajo la dirección del Ingeniero Civil Andrew, mostrado en la figura 30 y 31, tomando modelos reales a escala en 3D, adicionalmente se realizó un modelo completo a escala del puente de Tacoma con el objetivo de estudiar su comportamiento aeroelástico y lograr garantizar su seguridad ante la acción del viento, ya que sería el proyecto de puente sustituto a realizarse.

Aproximadamente por cuatro años se realizaron éstos estudios por parte del profesor Farquharson en túnel de viento, bajo la supervisión del Dr. T. Von Kármán.

Figura 11 Modelo del puente Tacoma, en túnel de viento, Laboratorio de Investigación Estructural, Universidad de Washington.



Fuente: Frey, Lawrence E. Disponible en:
http://content.lib.washington.edu/cdm4/item_viewer.php?CISOROOT=/uwcampus&CISOPTR=1707&CISOBOX=1&REC=5

Los avances de diferentes métodos de análisis, materiales y procesos constructivos para estructuras de puentes han hecho que cada vez estos logren cubrir un rango de luces mayores, haciéndolos más flexibles y ligeros, lo que ha

provocado que presenten un comportamiento más crítico ante las diferentes acciones que la solicitan (viento, sismo, etc.), y por ende su estudio deba considerar cada vez más fenómenos, haciendo necesario la evolución de los métodos numéricos para su análisis.

3.1. Laboratorios más reconocidos.

Debido al auge de los puentes atirantados en todas partes del mundo y a su necesidad de realizar ensayos en túneles de viento, cada vez un mayor número de universidades e institutos de investigación han decidido acometer la construcción de laboratorios para la realización de ensayos en túnel de viento. Colombia no ha sido ajena a esta situación siendo la universidad de los Andes y la universidad del Valle pioneras en éste sentido.

A nivel mundial los laboratorios más destacados son:

3.1.1. México.

3.1.1.1. Laboratorio de la Universidad Nacional Autónoma de México – UNAM.

El laboratorio de la UNAM tuvo sus inicios a mediados del año 1996, y contó con la participación del profesor Neftalí Rodríguez Cuevas. Está ubicado en la torre de Ingeniería de la Universidad, y tiene como objetivo realizar investigaciones de los efectos del viento que actúa sobre las estructuras, análisis de presiones y movimientos aplicados en diferentes puentes de México.

Figura 12 Túnel de viento de la UNAM, México.



Fuente: Structural Research Laboratory wind tunnel, University of Washington Engineering Experiment Station Collection of Tacoma Narrows Bridge Photographs and Ephemera. PH Coll 290.141, Disponible en: http://content.lib.washington.edu/cdm4/item_viewer.php?CISOROOT=/farquharson&CISOPTR=32&CISOBX=1&REC=1

3.1.2. España

3.1.2.1. Centro de Innovación tecnológica en edificación de ingeniería civil.

“Éste laboratorio tiene por objeto el análisis aeroelástico híbrido del comportamiento de puentes de grandes vanos frente a la acción del viento. Los métodos híbridos analizan computacionalmente un modelo estructural del puente completo para determinar la aparición de inestabilidades como el flameo (flutter en inglés). Necesitan previamente los coeficientes aerodinámicos y las funciones de flameo del tablero que deben obtenerse de forma experimental en un túnel de viento mediante ensayos seccionales del tablero. Después del cálculo estructural se aplica una metodología de visualización avanzada para representar la evolución de los movimientos del puente completo en tiempo real durante el fenómeno de inestabilidad. Se basa en el procesado de imágenes realistas de los

elementos del puente deformado, para lo que se utilizan los resultados del análisis computacional de la estructura. Se obtienen así animaciones digitales del comportamiento de puentes completos de grandes vanos soportados por cables”. [17]

Figura 13 Generador del túnel de viento del Centro de innovación tecnológica y edificación de ingeniería civil, España.



Fuente: Generador del túnel de viento, Centro de innovación tecnológica y edificación de ingeniería civil, Disponible en: <https://www.udc.es/citeec/nueva/castellano/aerolastica/index.html>

Dentro de los resultados se obtienen presiones horizontales y verticales, aceleración, velocidad, traslaciones y coeficientes aeroelásticos en el tablero, generados a causa de la fuerza del viento, que para éste caso se aplicaría al fenómeno de Flutter.

3.1.2.2. Escuela de Ingenieros Aeronáutico de la Universidad Politécnica de Madrid

El laboratorio aerodinámico de la universidad Politécnica de Madrid está compuesto por túneles aerodinámicos, en donde tres son de calibración y los otros cinco son para realizar modelos a escala que pertenecen al Instituto Universitario de Microgravedad.

Entre los puentes estudiados en éste laboratorio, los más destacados son:

- ✓ Puente La Pepa, España.
- ✓ Nuevo Puente Pumarejo en Barranquilla, Colombia.

Figura 14 Sala de túnel de viento Ignacio Da Riva, España.



Fuente: Instituto universitario de microgravedad Ignacio Da Riva, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, Disponible en: <http://www.idr.upm.es/index.html>

3.1.2.3. Laboratorio de ingeniería del viento Oritia y Boreas de la Universidad de Granada, España.

El laboratorio de ingeniería de viento Oritia & Boreas, fundado por José María Terrés-Nícoli y Christian Mans, desarrolla diferentes investigaciones acerca de consultoría avanzada de los efectos del viento en sistemas estructurales en la Universidad de Granada en España, es válido aclarar que también tienen sedes en Canadá y Estados Unidos.

Su objetivo principal es el de realizar estudios, por medio de ensayos en túnel de viento de capa límite con la mejor tecnología, de los efectos del viento en edificios singulares y de gran altura, además de puentes, estructuras flexibles, sistemas de energía renovable y ciencias del deporte.

Para los proyectos de investigación en puentes, se analiza la flexibilidad debido a sus grandes luces, que permita la determinación de las cargas estructurales y la identificación de posibles inestabilidades aerodinámicas en la estructura, por medio de estudios en túnel de viento y a través de un modelo de sección del tablero, o un modelo aeroelástico completo del mismo a escala. De igual manera se estudian los detalles de diseño incluidos en el proceso de construcción, la vibración de los cables, condiciones de turbulencia del sitio, amortiguamientos estructurales, entre otros.

Una de las formas en las que son realizados los ensayos es por medio de modelos de sección del tablero para analizar sus características aerodinámicas, evaluando inestabilidades que generan vibraciones causadas por alguno de los fenómenos del viento mencionados anteriormente.

Otra forma de estudiar éste tipo de estructuras aplica para casos en donde los puentes presenten flexibilidad en el tablero, realizándose modelos aeroelásticos y que permitan analizar la dinámica en la interacción entre la estructura, el fluido y la frecuencia de fenómenos aeroelásticos con cargas estáticas equivalentes presentada en el puente.

Entre los proyectos de puentes más reconocidos estudiados por éste laboratorio se encuentran:

- ✓ Pasarela sobre el río Miño, España.

3.1.3. Canadá

3.1.3.1. Laboratorio de túnel de viento de capa límite de la Universidad de Western (BLWTL), Canadá.

El laboratorio de Túnel de Viento de capa límite ubicado en la Universidad de Western en Ontario, investiga y analiza diferentes estructuras.

El ensayo del modelo es colocado en el túnel de viento usando un sistema de montaje a escala, en donde las condiciones de viento son simuladas ya sea con flujo suave o turbulento, con el objetivo principal de obtener los parámetros aerodinámicos de la sección del puente para considerarlas en los criterios de diseño y obtener la estructura con el mejor comportamiento ante las acciones del viento.

Otro caso en el que también se realizan investigaciones en puentes es para el análisis por medio de modelos aeroelástico en túneles de viento, con el fin de evaluar el comportamiento del puente durante la construcción.

Seguidamente cuando los modelos ya están contruidos, se adicionan las condiciones de la velocidad y dirección de las fuerzas del viento que depende de su topografía, en la mayoría de los casos se estudia los tableros, mástiles para conocer las deformaciones y aceleraciones presentadas.

Los principales ensayos sobre puentes atirantados que han sido realizados en éste laboratorio son:

- ✓ Puente Sunshine Skyway, USA
- ✓ Puente Shenzhen Western, China
- ✓ Puente Stonecutters, China
- ✓ Puente sobre el rio Maumme, USA
- ✓ Puente del Alamillo, Sevilla, España
- ✓ Puente de Clarck, Illinois, USA
- ✓ Puente Chesapeake y Delaware, USA
- ✓ Puente sobre el rio Neches, USA
- ✓ Puente Baluarte, México
- ✓ Viaducto Cesar Gaviria Trujillo, Risaralda, Colombia

- ✓ Puente Nipigon, Ontario, Canadá
- ✓ Puente atirantado en Jerusalén, Israel
- ✓ Puente Ting Kau, Japón.

Figura 15 Túnel de Viento BLWTL, Canadá.



Fuente: Grupo de ingeniería de viento Alan G Davenport, Universidad de Western, Ontario, Disponible en: <http://www.blwtl.uwo.ca/Public/TheSectionModel.aspx>

3.1.4. Japón

3.1.4.1. Laboratorio de Puentes y Estructuras de la Universidad de Tokio, Japón.

Túnel de viento que cuenta con una longitud de 16 metros, desarrolla y estudia los efectos del viento por medio de modelos de secciones completas. Caracterizado por ser uno de las más grandes en Japón. Para los estudios de cada uno de sus ensayos se trabaja a través de simulaciones de viento con velocidades máximas de 30 m/s. Éste túnel de viento es de capa límite, con grandes innovaciones tecnológicas en sus equipos de trabajo.

Uno de los ensayos aplicados para estructuras de puentes es:

- ✓ Puente Akashi Kaikyou Ohashi, Japón.

Figura 16 Laboratorio del Simulador del Viento.



Fuente: Universidad de Tokio, Disponible en: http://www.bridge.t.u-tokyo.ac.jp/equipments_e.html#keisoku

3.1.5. Argentina

3.1.5.1. Laboratorio de capa límite y fluido dinámico ambiental de la Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

Sus instalaciones están en los laboratorios del Departamento de Aeronáutica de la facultad de Ingeniería, que inició en 2007; es de circuito abierto, con 2.60 metros de ancho y 1.83 metros de altura y funciona por succión.

Tiene como ventaja simular condiciones de dispersión de contaminantes debido a sus grandes dimensiones, en donde también entra con la participación del CIMA (Control e Investigación del Medio Ambiente) de la facultad de Ciencias Exactas, para que se pueda realizar de manera simultánea el estudio de la propagación de la contaminación generada por fábricas y diseminada por el viento.

Figura 17 Laboratorio de túnel de viento de la Universidad Nacional de la Plata, Argentina.



Fuente: Laboratorio de Túnel de viento de la Universidad de La Plata, La Plata, Argentina. 12 de Mayo de 2009. Disponible en: http://www.unlp.edu.ar/articulo/2009/5/11/tunel_de_viento

3.1.6. Colombia

3.1.6.1. Túnel de viento de la Universidad de Los Andes, Colombia.

Túnel de viento que estudia los efectos de éste por medio de modelos a escala de objetos tales como aviones, estructuras, puentes, entre otros, a velocidades bajas de viento.

Figura 18 Túnel de viento de la Universidad de Los Andes, Colombia.



Fuente: Universidad de los Andes.. Imagen tomada de:
<https://revistacontacto.uniandes.edu.co/index.php/edicion/2-numero1/numero1/4-tunel-de-viento>

3.1.7. Estados Unidos.

3.1.7.1. Laboratorio de Aerodinámica, Estados Unidos.

Éste túnel de viento es el único que actualmente ayuda a garantizar la estabilidad en diferentes estructuras y puentes de grandes longitudes en el país. Para las pruebas de laboratorio se trabaja con simulaciones de turbulencia, más conocidas como ráfagas, y se realizan modelos de la sección a diferentes escalas con flujos laminares, bajas velocidades y altas frecuencias. Tal como lo asegura el Instituto, éste laboratorio es único porque “aunque otros túneles de viento utilizan balanzas de alta frecuencia , la nuestra es única, ya que es en realidad dos balances combinados en un sistema y se puede utilizar para medir directamente las cargas desequilibradas en el modelo estructural. El Laboratorio de Puente de Aerodinámica se utiliza para estudiar las interacciones entre el viento y los

puentes u otras estructuras. Es utilizado por ingenieros e investigadores interesados en el diseño, la estabilidad, la seguridad y el rendimiento de las estructuras de las carreteras en todas las combinaciones geográficas.” [7]

Éste laboratorio es la única instalación de túnel de viento en Estados Unidos dedicado a estudiar los comportamientos exclusivos de los efectos del viento sobre las estructuras, pertenece al Estado y está conformado por ingenieros de las áreas de estructuras, dedicados al estudio aerodinámico, ensayos experimentales, dinámica de fluidos computacional e ingeniería del viento.

Éste laboratorio ha estudiado diversos puentes atirantados alrededor del mundo, entre lo que se encuentran:

- ✓ Puente Bunker Hill, Boston, USA
- ✓ Puente Bill Emerson, Missouri, USA
- ✓ Puente Isla Deer Sedgwick, USA
- ✓ Puente Luling, Louisiana

3.1.8. Francia

3.1.8.1. Centro científico y técnico de edificaciones en Nantes, Francia.

Instituto de investigación europea que realiza consultoría de los efectos del viento que se presentan en diferentes estructuras desde la fase de diseño hasta la culminación del proyecto, ya sea para grandes o pequeñas estructuras a gran escala.

Para el caso de puentes atirantados éste organismo realiza modelos aeroelásticos de la estructura, para permitir realizar el análisis detallado de diferentes fenómenos tales como vibraciones inducidas en los tirantes del puente, con el fin

de evaluar su resistencia ante el efecto del viento, que además tiene en cuenta los efectos de los terrenos topográficos cercanos al lugar de estudio.

Una vez realizado el modelo de la estructura y obtenido su comportamiento dinámico se realiza el cálculo analítico para poder obtener los desplazamientos del puente ante la fuerza del viento.

Entre los principales estudios realizados en este túnel de viento en puentes atirantados se encuentran:

- ✓ Puente Murom, Francia
- ✓ Viaducto Millau, Francia
- ✓ Puente sobre el Rio Antirio, Grecia
- ✓ Puente Nantes, Francia
- ✓ Puente de la Isla de Russky, Rusia

3.1.9. Brasil

3.1.9.1. Laboratorio aerodinámico de la construcción de la Universidad Federal de Río Grande del Sur (UFRGS).

El Laboratorio de Aerodinámica de la construcción está conformado por un grupo de profesionales que aplican sus conocimientos y servicios a problemáticas relacionadas con la acción y los efectos del viento. Sus actividades se iniciaron en 1973, siendo la primera en América Latina, garantizando así un alto nivel de calidad en la simulación de los vientos naturales y las pruebas en modelos a escala.

Éste túnel de viento de circuito cerrado estudia los comportamientos estáticos y dinámicos a través de simulaciones de viento, aplicados a diferentes estructuras tales como edificios, puentes entre otros.

En la cámara del túnel se simulan velocidades de viento hasta de 150 Km/h, y las aspas de los ventiladores son manejadas por motores eléctricos de 100 Hp.

Figura 19 Túnel de viento de la Universidad Federal de Río Grande de Sur, Brasil.

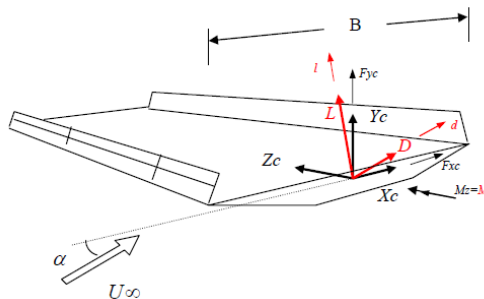


Fuente: Laboratorio aerodinámico de Universidad federal de Rio grande del Sur.
Disponible en: <http://www.ufrgs.br/lac/TV%20FOTO%20zoom.htm>.

4. CASOS DE EJEMPLO: ENSAYO EN TÚNEL DE VIENTO DEL PUENTE SOBRE LA BAHÍA DE CÁDIZ.

A manera de ejemplo y aprovechando que la información del ensayo nos fue suministrada se describen aquí los principales aspectos del ensayo en túnel de viento del Puente sobre la bahía de Cádiz, en el cual se tomó un modelo a escala 1:60, al cual se le aplicaron varias pruebas, entre ellas medir las fuerzas aerodinámicas producidas sobre el modelo a diferentes valores de ángulo de ataque para determinar los coeficientes aerodinámicos.

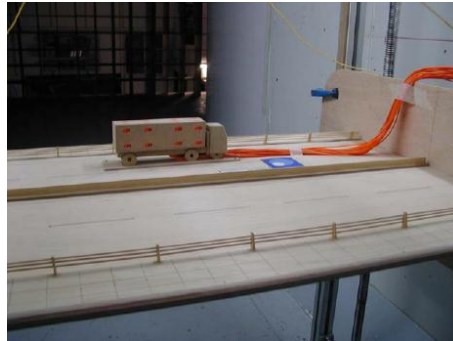
Figura 20 Definición de flujo incidente, ejes y fuerzas y momentos en una sección del puente. U_∞ es la velocidad de la corriente incidente y α el ángulo que forma ésta con el cuerpo.



Fuente: BARRERO, A. ALONSO, G. SANZ, A. MESEGUER, J. Ensayo aeroelástico en túnel aerodinámico de un modelo bidimensional de puente sobre la bahía de Cádiz.

Además de esto se realizaron pruebas al tablero con y sin barreras, esto con el fin de estudiar la eficiencia de éstas sobre la disminución del efecto del viento sobre el tráfico rodado. Para esto se realizó un modelo a escala 1:60 de un camión genérico.

Figura 21 Vista del camión lista para el ensayo



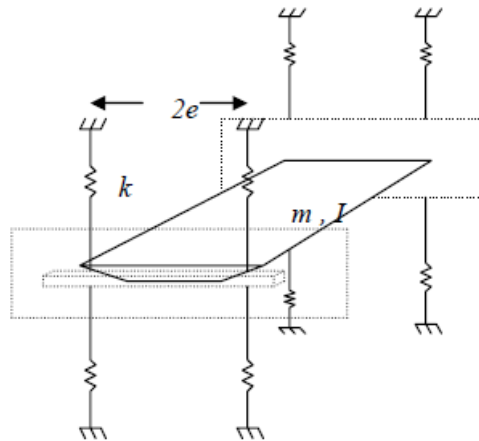
Fuente: BARRERO, A. ALONSO, G. SANZ, A. MESEGUER, J. Ensayo aeroelástico en túnel aerodinámico de un modelo bidimensional de puente sobre la bahía de Cádiz.

Después de realizada la prueba se pudo observar que al instalar la barrera se encuentra una notable disminución de la carga de aire sobre el tráfico.

Cabe señalar que para la obtención de mejores resultados se deben cumplir las leyes de semejanza que proporcionan los factores de escala apropiados.

“Los ensayos consisten en que, dadas unas condiciones de viento incidente, se le proporciona al modelo un pequeño desplazamiento simultáneo inicial según los grados de libertad de traslación y rotación (h y α) mediante un dispositivo diseñado para ello. Posteriormente se suelta el modelo y se registra la señal de atenuación según h y α mediante dos acelerómetros. Finalmente, dichas señales se utilizan para, mediante el sistema de identificación, obtener los valores de las derivadas de estabilidad.” [8]

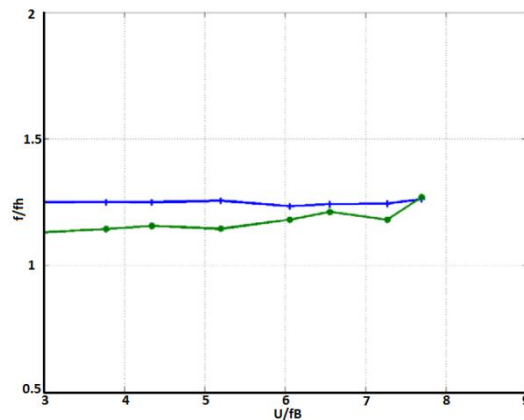
Figura 22 Representación esquemática del montaje



Fuente: BARRERO, A. ALONSO, G. SANZ, A. MESEGUER, J. Ensayo aeroelástico en túnel aerodinámico de un modelo bidimensional de puente sobre la bahía de Cádiz.

Para el análisis de estabilidad es necesario obtener la velocidad crítica de flameo la cual se logra mediante la igualación de las raíces de la parte real y la parte imaginaria de las dos ecuaciones obtenidas de la solución del determinante de flameo. Éstas velocidades de flameo obtenidas deben ser comparadas con los resultados de inestabilidad observados en el túnel durante los ensayos.

Figura 23 Determinación de las velocidades críticas de flameo a partir de las derivadas de estabilidad. Lugar de las raíces del determinante de flameo (parte real e imaginaria) para coeficiente de amortiguamiento del 1% en el caso de 6° con barreras.



Fuente: BARRERO, A. ALONSO, G. SANZ, A. MESEGUER, J. Ensayo aeroelástico en túnel aerodinámico de un modelo bidimensional de puente sobre la bahía de Cádiz.

En cuanto a la influencia del amortiguamiento estructural se sabe que cuanto mayor sea el amortiguamiento de la estructura, mayor será su capacidad de disipar energía. En el caso del ensayo del puente sobre la bahía de Cádiz se espera que los resultados dados en el informe sean conservativos.

Después de los ensayos realizados se concluye que no se observaron problemas significativos de inestabilidad por desprendimiento de torbellinos o Vortex Shedding, y tampoco se encuentra un cambio apreciable en la estabilidad del modelo al momento de aplicar turbulencias de alta intensidad. [8]

5. CRITERIOS NORMATIVOS

Después de la exhaustiva inspección en la literatura y en códigos internacionales se observa que no existen apartados específicos para la consideración de los efectos del viento en puentes atirantados, aunque sí se encontraron algunos criterios para evaluar fenómenos relacionados en puentes en general.

En el capítulo 3.8 de las Especificaciones de Diseño de Puentes de la Aashto se encuentra:

Según los requisitos generales para la presión horizontal de viento, se deben investigar las condiciones locales para puentes de grandes dimensiones y/o gran altura. Además en numeral 3.8.1.2.1 se presentan requisitos generales para las presiones de viento sobre la estructura se encuentra que se deben seleccionar las presiones especificadas, de tal manera que se produzca la mayor carga de viento neta sobre la estructura. También se considera importante el ensayo en túnel de viento si éste constituye una carga de diseño importante, con el fin de obtener estimaciones más precisas de las presiones del viento.

En el caso de las presiones verticales de viento “se deberá considerar una fuerza de viento vertical ascendente de $9,6 * 10^{-4} [MPa]$ por el ancho del tablero, incluyendo los parapetos y aceras, como una carga lineal longitudinal” [9], esto a menos que el punto 3.8.3 indique lo contrario. Además esto se tomará en cuenta si no hay viento actuando sobre la sobrecarga; llegado el caso que sí exista ésta fuera lineal, se deberá aplicar a un cuarto del ancho del tablero a barlovento junto con las cargas de viento horizontales. Ésta carga se considera importante cuando se desea investigar el vuelco del puente.

En el artículo 3.8.3 se considera la inestabilidad aeroelástica, tomando en cuenta que cualquier puente o componente estructural del mismo cuya relación longitud de tamo / ancho o profundidad pase los 30.0 será tomado como sensible al viento,

tomando también en cuenta las vibraciones en los cables provocadas por la interacción de viento – lluvia. Para puentes flexibles se requerirán estudios especiales con base en información obtenida en ensayos en túnel de viento, el cual “involucra la simulación del ambiente eólico local del sitio de emplazamiento del puente.” [10]. De igual manera, el diseño de los puentes y sus componentes estructurales, incluidos los cables, deben estar exentos de daños por fatiga inducida por oscilaciones provocadas por los fenómenos aeroelásticos, con velocidades de viento de hasta 1,2 veces la velocidad de diseño. En el caso de los cables de puentes atirantados se han logrado estabilizar mediante amortiguadores fijados al puente a la altura del tablero, o arriostrando múltiples cables en forma cruzada.

Por otra parte, de acuerdo al Eurocódigo 1 Parte 1-4 de 1991, describe:

Según el capítulo 3.5. El efecto del viento sobre la estructura depende del tamaño, forma y propiedades dinámicas.

Adicionalmente en el ítem 8.4 describe que la fuerza del viento que se ejerce sobre el tablero de un puente se descompone en tres direcciones diferentes; donde estas acciones producen fuerzas en las direcciones x , Y y Z , donde:

x =dirección paralela al ancho del tablero

Y =dirección que va a lo largo del tablero

z =es la dirección perpendicular al tablero

En donde estas fuerzas, se deben al viento que sopla en diferentes direcciones y normalmente ya que no son simultáneas. Las fuerzas producidas en la dirección Z pueden resultar del viento que sopla en una amplia gama de direcciones.

Para puentes el Eurocódigo dice en el 8.4.1. (Direcciones del viento y situaciones de diseño):

- (1) Las acciones del viento sobre tableros de puentes y sus pilares de apoyo deben calcularse mediante la identificación de las direcciones del viento más desfavorables, en toda la estructura ante cualquier fenómeno.
- 2) Es importante realizar diferentes análisis de las acciones del viento en fases progresivas de la construcción del puente proyecto. [11]

En el anexo Nacional del Eurocódigo 1 se modela el viento con el fin de obtener la variación de la velocidad media del viento con relación al terreno, la intensidad y la escala para la turbulencia se dará de acuerdo al terreno. [12]

6. CONCLUSIONES

- Los puentes atirantados han sido de gran utilidad para cubrir grandes luces, y gracias a los avances ingenieriles éstos han podido ir aumentando la longitud de sus vanos logrando así competir con los puentes colgantes en soluciones de más de 1 km.
- En Colombia se ha empezado a ver el auge de los puentes atirantados, por lo que se hace necesario el estudio del comportamiento aerodinámico de los mismos, y así tenerlos presentes en los diseños de las nuevas vías de nuestro país.
- El viento debe ser una carga considerada en el diseño de puentes atirantados.
- Los túneles de viento son una herramienta muy importante en el análisis del comportamiento aerodinámico de los puentes atirantados, debido a que por medio de ensayos se obtienen datos de estabilidad, fundamentales para el diseño de los puentes.
- Dependiendo de las condiciones ambientales y geográficas del sitio donde se construirá el puente atirantado, se determinará si se requiere o no el análisis del modelo en túnel de viento.
- Deben existir semejanzas geométricas, cinemáticas y dinámicas entre la estructural real y el modelo a realizar.
- Existe variedad de túneles de viento ya sean de capa límite o aerodinámicos, especializados en estudiar diferentes fenómenos del viento

tales como Desprendimientos de torbellinos (Vortex Shedding), Galope transversal (Galloping), Galope inducido por una estela (Wake Galloping), Flameo (Flutter) y Bataneo (Buffeting).

- Actualmente se cuenta con muy poca información de criterios normativos aplicados en túneles de viento para puentes atirantados; los únicos que proporcionan algunos parámetros de diseño son el Eurocódigo 1991 PARTE 1-4: Acciones del Viento (Norma Europea) y la AASHTO 2012 Especificaciones de Diseño para Puentes (Norma Americana).

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CHENG, S.H. LAU, David T. Modeling of cable vibration effects of cable-stayed bridges. Department of Civil and Environmental Engineering Carleton University, Ottawa, Ontario, Canada.

[2] HERNANDEZ, Santiago. Las formas del viento, Coruña, 2006,49 h. Trabajo de pregrado (Ingeniería Civil). Universidad de Coruña. Disponible en el Catalogo Bibliográfico de Tesis de Ingeniería Civil en la Universidad de Coruña.

[3] HERNANDEZ JIMENEZ, José Ricardo. CARRION VIRAMONTES, Francisco Javier.2005. Diseño de Loescher's Alemania en 1784. Estudio experimental de un puente atirantado, evaluación de cargas. Publicación técnica No 265.Sanfandila, México.

[4] MANTEROLA, Javier. Evolución de los puentes en la historia reciente.1894. Disponible en: <http://informesdelaconstruccion.revistas.csic.es>

[5] Simiu, E. y Scanlan, R.H., Efectos del viento en estructuras, John Wiley, 1996
Cai S Chun, Montens Serge. Efectos del viento en puentes de gran vano. Departamento de transporte de Florida y Jean Muller, Francia. Capítulo 57.2

[6] Procedimiento de Túnel de Viento. Universidad del Nordeste. Reglamento de CIRSOC 102 (Centro de Investigación de los reglamentos nacionales de seguridad para las obras civiles).

[7] Laboratorio Aerodinámica de Estados Unidos. Departamento de transporte FHWA (Federal Highway Administration. Wind Induced Vibration of Stay Cables. Disponible en:
<http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/infrastructure/bridge/05084/index.cfm>

[8] BARRERO, A. ALONSO, G. SANZ, A. MESEGUER, J. Madrid, Junio de 2006. Ensayo aeroelástico en túnel aerodinámico de un modelo bidimensional de puente sobre la bahía de Cádiz.

[9] AASHTO LRFD BRIDGE. Design Specifications. 2012. 6th Ed. Article 3.8.2.

[10] AASHTO LRFD BRIDGE. Design Specifications. 2012. 6th Ed. Article 3.8.3.1.

[11] Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions.

[12] UK National Annex to Eurocode 1-Actions on Structures. Part 1.4. - General actions - wind actions. Disponible en:
<https://law.resource.org/pub/uk/ibr/bs.na.en.1991.1.4.2010.pdf>

BIBLIOGRAFÍA

BARRERO A, ALONSO G, MESEGUER J. Construcción del modelo de ensayos. Ensayo aeroelástico en túnel aerodinámico de un modelo bidimensional de puente sobre la bahía de Cádiz, Instituto Ignacio Da Riva, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, Junio de 2006.

BARRERO A, ALONSO G, MESEGUER J. Estudio experimental del comportamiento aerodinámico y aeroelástico de una sección del puente sobre el río Magdalena en Barranquilla - Colombia, Instituto Ignacio Da Riva, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España, Mayo de 2013.

HERNANDEZ IBAÑEZ, Santiago. 2008. Destrucción del puente de cadenas de Brighton. Las formas del viento. Universidad de Coruña. España.

HERNANDEZ JIMENEZ, José Ricardo. CARRION VIRAMONTES, Francisco Javier. 2005. Estudio experimental de un puente atirantado, evaluación de cargas. Publicación técnica No 265. Sanfandila, México.

NIETO MOURONTE, Felix. Análisis de sensibilidad y optimización aeroelástica de puentes colgantes en entornos de computación distribuida 2 de 6, Coruña, 2006, 49 h. Trabajo de doctorado (Ingeniería Civil). Universidad de Coruña. Disponible en el Catálogo Bibliográfico de Tesis de Doctorado en la Universidad de Coruña: http://ruc.udc.es/dspace/bitstream/2183/1033/5/NietoMouronte_Felix_td_2006_2de6.pdf

POZOS ESTRADA, Adrián; SÁNCHEZ GARCÍA, Raúl, GÓMEZ MARTÍNEZ, Roberto. XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural. Análisis de un puente atirantado ante cargas de viento y su comparación con resultados experimentados. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural. México. 2012. Tomado de: http://www.smie.org.mx/SMIE_Articulos/co/co_17/te_10/ar_05.pdf

ROMO, Marcelo; HERRERA CEVALLOS, Marlon Ricardo. Estudio de puentes atirantados con una aplicación práctica para el ESPE. Coruña, 2007. Trabajo de Grado (Ingeniería Civil). Universidad de Coruña. Disponible en el Catálogo Bibliográfico de Tesis de Ingeniería Civil en la Universidad de Coruña: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/1579>