



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Pruebas en túnel de viento de un
modelo de sección para investigar la
respuesta inducida por el viento de un
puente atirantado**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Civil

P R E S E N T A

Laura Itzel Nequis López

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Roberto Gómez Martínez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025

“La felicidad se puede hallar hasta en los momentos más oscuros, si somos capaces de encontrar la luz” – Albus Dumbledore en Harry Potter y el prisionero de Azkaban, 2004.

AGRADECIMIENTOS

A mi madre, Tere López, por tu amor incondicional, tu apoyo constante y por siempre creer en mí, incluso en los momentos en los que yo misma dudaba. Tu sacrificio, dedicación y sabios consejos han sido una fuente de inspiración y fortaleza a lo largo de mi vida. Este logro no habría sido posible sin ti.

A mi hermano Víctor, por tu constante apoyo, inspiración y ánimo ya que fueron fundamentales en este camino. Por estar a mi lado en cada paso, por escucharme en los momentos difíciles y por nunca permitirme rendirme fácilmente. Por los momentos vividos juntos que son invaluable, y por tu presencia que ha sido una luz que ha iluminado mi camino. Por ser una persona muy importante para mí.

A mi padre, David, por brindarme los mejores consejos, por darme la mejor infancia con grandes experiencias y momentos inolvidables.

A mi asesor de tesis, el Dr. Roberto Gómez por la confianza brindada en todo momento y por permitirme ser parte de este proyecto.

Al Dr. Raúl Sanchez, quiero expresar mi más sincero agradecimiento por su guía y apoyo en mi proyecto de tesis. Siempre estuvo dispuesto a escuchar, brindar consejos valiosos y compartir su experiencia conmigo.

Al M.I. Efraín Sanchez te agradezco por tu constante apoyo y orientación. Desde el principio mostraste una paciencia invaluable, mostrándome el camino con sabiduría y dedicación.

A mis sinodales porque cada uno de ustedes contribuyó en mi formación académica. Por compartir su tiempo, dedicación, experiencia y conocimientos conmigo.

Al túnel de viento de la UNAM por haberme brindado la oportunidad de desarrollar este trabajo y a cada uno que forma parte del túnel ya que contribuye a que este siga creciendo.

A la Facultad de Ingeniería y a la UNAM, la máxima casa de estudios, la cual me brindo la oportunidad de desarrollarme académicamente, en la que pasé los momentos más agradables y también los más duros, donde conocí personas que me enseñaron el valor y la importancia de la ingeniería. Y de la cual siempre me sentiré orgullosa de llevar su nombre en alto.

DEDICATORIA

Para mi tío Fernando López, que recuerdo con mucho cariño y aunque ya no estas físicamente con nosotros, siempre recordaré tus chistes y bromas que hacías a cada rato, desde que te fuiste no dejo de pensar en lo orgulloso que estabas de mí y en lo orgulloso que estarías en estos momentos. Fuiste un tío maravillo, tu partida me dejo un gran dolor, pero siempre te recuerdo con esa sonrisa en tu rostro. Siempre te recodaré y haré que te sientas orgulloso de mí, así como siempre me lo hacías saber cuándo aún estabas con nosotros. Estarás en mi corazón por el resto de mi vida.

Para mi abuelita Martha, quisiera abrazarte una vez más y decirte cuánto te quiero. Tu presencia era una luz en mi vida, cada domingo compartido contigo eran tan maravillosos llenos de risas y anécdotas que ahora recuerdo con mucho cariño. Eres la mujer que días antes de partir me enseñó la importancia de amarse a uno mismo, que me dijiste que tan orgullosa estabas de mí. Por el resto de mi vida serás parte de mi historia familiar, siempre te llevaré en los recuerdos y en los momentos felices que compartimos juntas. No sabes cuanto me hubiera gustado que estuvieras en este momento de mi vida, sintiendo una vez más tu abrazo que siempre me hacen falta.

RESUMEN

Este texto explora los desafíos enfrentados por puentes atirantados y colgantes debido a fenómenos aerodinámicos como el "flutter", provocado por vórtices de viento, evocando el colapso icónico del puente Tacoma Narrows. Se discute en detalle cómo estos vórtices pueden ocasionar fatiga estructural a largo plazo y se exploran soluciones efectivas, como el uso de deflectores de viento para mitigar estos efectos adversos.

Además, se presenta un estudio exhaustivo sobre el comportamiento aerodinámico de un modelo a escala de sección de un puente ferroviario atirantado, realizado en el túnel de viento de la UNAM. Este estudio incluye pruebas tanto con pantallas acústicas como sin ellas, con el objetivo de estimar las características aerodinámicas del puente. Los principales objetivos de la investigación son analizar las fuerzas aerodinámicas actuantes, comprender la estabilidad del puente bajo diversas condiciones de viento, desarrollar estrategias efectivas de mitigación de riesgos, y aplicar estos descubrimientos en el proceso integral de diseño y construcción del puente.

ABSTRACT

This text introduces the challenges faced by cable-stayed and suspension bridges due to aerodynamic phenomena such as flutter caused by wind vortices, exemplified by the infamous collapse of the Tacoma Narrows Bridge. It discusses in detail how these vortices can induce long-term structural fatigue and explores solutions, such as wind deflectors, to mitigate these adverse effects.

Furthermore, it presents a comprehensive study on the aerodynamic behavior of a scaled model section of a cable-stayed railway bridge in the UNAM wind tunnel. This study includes tests with and without acoustic screens to estimate the bridge's aerodynamic characteristics. The primary objectives include analyzing aerodynamic forces, understanding bridge stability under different wind conditions, developing effective risk mitigation strategies, and integrating these findings into the bridge design and construction process.

CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	ii
ÍNDICE DE TABLAS	iv
INTRODUCCIÓN.....	I
OBJETIVOS.	III
I. Antecedentes.....	1
1.1 Efectos del viento en el tablero de un puente.....	11
1.1.1 Efectos Aerodinámicos.....	11
1.1.2 Efectos Aeroelásticos.	13
1.1.3 Efectos de inestabilidad en puentes.	15
1.1.3.1 Desprendimiento de vórtices.	15
1.1.3.2 Aleteo o Flutter.....	18
1.1.3.3 Golpeteo o Buffeting.	19
1.2 Simulación en túnel de viento.	19
1.2.1 Tipos de prueba en túneles de viento.....	20
1.2.1.1 Modelos aeroelásticos.....	21
1.2.1.2 Modelos rígidos de presión.	22
1.2.1.3 Modelo de banda tensada.....	23
1.2.1.4 Modelo de sección.....	24
II. Descripción del puente.....	27
2.1 Descripción de la Estructura.....	29
2.2 Descripción del Tablero.	33
2.3 Sistema de atirantado.....	34
2.4 Clima de viento.	36
III. Modelo de sección del puente.	41
3.1 Parámetros de escala para el modelo de sección.	43
3.2 Fabricación del modelo.	45
3.3 Instrumentación.	47
3.3.1 Equipos de comunicación, registro y almacenamiento.	48

3.3.2	Sensores.....	49
3.4	Metodología para las pruebas.....	51
3.4.1	Pruebas de estabilidad del tablero.....	52
3.4.2	Pruebas de coeficientes aerodinámicos medios.....	53
IV.	Túnel de viento de capa límite atmosférica de la UNAM.....	56
4.1	Prueba de viento “suave”.....	57
4.2	Prueba de viento “Turbulento”.....	57
V.	Resultados.....	59
5.1	En fase de construcción (sin pantallas acústicas).....	59
5.1.1	Viento suave.....	59
5.1.2	Viento turbulento.....	61
5.1.3	Coefficientes aerodinámicos medios.....	62
5.2	En fase de servicio (con pantallas acústicas).....	64
5.2.1	Viento suave.....	65
5.2.2	Viento turbulento.....	66
5.2.3	Coefficientes aerodinámicos medios.....	67
VI.	Conclusiones.....	69
VII.	Referencias.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Puente Tacoma Narrow antes del colapso (Yablonski, 2021).....	1
Figura 2.	Derrumbe del Puente Tacoma Narrow (Long, 2003).....	2
Figura 3.	Tablero del puente Tacoma Narrow después del colapso (Yablonski, 2021).....	2
Figura 4.	Puente Atirantado Ferroviario Garra de Jaguar (Fonatur, 2023).....	3
Figura 5.	Superestructura y subestructura de un puente (Rodríguez, 2020).....	4
Figura 6.	Elemento de viga (Ingeniería por el mundo, 2014).....	4
Figura 7.	Elemento de pila (Ingeniería por el mundo, 2014).....	5
Figura 8.	Claro de un puente (Ingeniería por el mundo, 2014).....	5
Figura 9.	Zapata de cimentación (ingeniería por el mundo, 2014).....	6
Figura 10.	Tablero de un puente (Ingeniería por el mundo, 2014).....	6
Figura 11.	Puente de viga “Ponte do Freixo, ubicado de Portugal” (Ingeniería por el mundo, 2014).....	7
Figura 12.	Puente de ménsula (Ingeniería por el mundo, 2014).....	8

Figura 13. Puente de arco “Puente sobre el río Tajo” (Ingeniería por el mundo, 2014).....	8
Figura 14. Puente colgante “Puente Golden Gate” (Ingeniería por el mundo, 2014).....	9
Figura 15. Puente Atirantado “Puente Baluarte” (Warrick, 2012).	10
Figura 16. Presión y succión debido al viento en un puente (Romero, 2014).	12
Figura 17. Sistema de fuerzas y momentos actuantes en el tablero de un puente.....	13
Figura 18. Área de presiones en la superficie de un cilindro (Blevins, 1990).	15
Figura 19.Regímenes de flujo alrededor de un cilindro circular (Vasallo).....	17
Figura 20. Diferentes movimientos de aleteo con el paso del tiempo (González).	18
Figura 21.Modelo aeroelástico del puente Lions Gate, Vancouver (Larsen, 1992).....	21
Figura 22. Modelos de puentes para ensayos en túneles de viento. Puente completo (izquierda) y segmento de tablero (derecha). (Hernández, 2022).	22
Figura 23. Ejemplo del modelo de banda tensada. (Geo, 2018).	24
Figura 24. Ejemplo del modelo de sección del tablero de un puente.....	25
Figura 25. Fuerzas aerodinámicas en el tablero de un puente debidas al viento.....	26
Figura 26. Localización del puente GARRA DE JAGUAR.....	27
Figura 27. Cueva Garra de Jaguar.....	28
Figura 28. Red ferroviaria de Tren Maya de Tramo 1 a Tramo 7.	28
Figura 29. Plano Alzado del Puente Atirantado Garra de Jaguar.	29
Figura 30. Plano en planta del Puente Atirantado Garra de Jaguar.....	29
Figura 31. Plano Alzado del Puente (izquierda) Plano en planta (derecha).....	30
Figura 32. Modo 1 - 1° modo de vibración vertical ($f=0.892\text{Hz}$).	31
Figura 33. Modo 2 - 1° modo de torsión y vibración transversal ($f=0.984\text{Hz}$).	31
Figura 34. Modo 3 - 2° modo de torsión y vibración transversal ($f=1.234\text{Hz}$).	32
Figura 35. Modo 8 - 1° modo de vibración longitudinal ($f=2.212\text{Hz}$).	32
Figura 36. Sección transversal del tablero.....	33
Figura 37. Trabes longitudinales, general (izq) próxima a pilono (der).	34
Figura 38. Anclaje de tirante en tablero.....	35
Figura 39. Localización del Aeropuerto de Cancún. Fuente: Google Maps.	36
Figura 40. Huracán Willma que devastó a Cancún.	37
Figura 41. Histograma de velocidades máximas anuales.	38
Figura 42. Mapa de isotacas para un Periodo de Retorno de 200 años (CFE, 2008).	38
Figura 43. Rosas de viento anual para el sitio de estudio.	40
Figura 44. Representación del modelo de sección, vista en planta.	42
Figura 45. Puntos de sujeción del modelo y ubicación de sensores (celdas de carga y láser).	42
Figura 46. Vista en planta del modelo de sección con las End Plate.....	44
Figura 47. Registro de vibración libre del sistema Tablero-Resortes.....	45
Figura 48. Espectro de aceleración vertical (vibración libre).	45
Figura 49. Diafragmas internos de soporte de lámina de acero (IIUNAM).	46
Figura 50. Modelo de sección del puente Garra de Jaguar (IIUNAM).....	46
Figura 51. Tablero del puente Garra de Jaguar sin pantallas acústicas.	47

Figura 52. Tablero del puente Garra de Jaguar con pantallas acústicas.....	47
Figura 53. Plataforma Compact RIO NI-9014.	48
Figura 54. Fuente de poder.	49
Figura 55. Celda de carga.	50
Figura 56. Sensor de distancia.	50
Figura 57. Sensor de hilo caliente.	51
Figura 58. Ángulo de incidencia del viento en el modelo de sección del tablero del puente.....	52
Figura 59. Dirección y sentido de las fuerzas aerodinámicas del tablero del puente.....	54
Figura 60. Generador pasivo de turbulencia.....	58
Figura 61. Gráfica de sección en fase constructiva, viento "suave", desplazamiento vertical a flexión.	60
Figura 62. Gráfica de sección en fase constructiva, viento "suave", desplazamiento de torsión.	60
Figura 63. Gráfica de sección en fase constructiva, viento "turbulento", desplazamiento vertical de flexión.	61
Figura 64. Gráfica de sección en fase constructiva, viento "turbulento", desplazamiento de torsión.	62
Figura 65. Gráfica del coeficiente aerodinámico de fuerza de Arrastre "Cx".	63
Figura 66. Gráfica del coeficiente aerodinámicos de fuerza de levantamiento "Cy".	63
Figura 67. Gráfica del coeficiente aerodinámicos de fuerza de torsión "Cm".	64
Figura 68. Gráfica de la sección en fase de servicio, viento "suave", desplazamiento vertical de flexión.	65
Figura 69. Gráfica de la sección en fase de servicio, viento "suave", desplazamiento de torsión.	65
Figura 70. Gráfica de la sección en fase de servicio, viento "turbulento", desplazamiento vertical de flexión.	66
Figura 71. Gráfica de la sección en fase de servicio, viento "turbulento", desplazamiento de torsión.	66
Figura 72. Gráfica de coeficientes aerodinámicos de fuerzas de arrastre "Cx".	67
Figura 73. Gráfica de coeficientes aerodinámicos de fuerzas de levantamiento "Cy".	68
Figura 74. Gráfica de coeficientes aerodinámicos de fuerzas de torsión "Cm".	68

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Velocidades de viento regional para diferentes periodos de retorno en km/h de acuerdo con el MOC-CFE-2020.....	39
Tabla 2. Velocidades de viento para diferentes periodos de retorno para el aeropuerto de Cancún.	39
Tabla 3. Escalas de Froude para el modelo de sección.....	43
Tabla 4. Parámetros del modelo de sección.....	44
Tabla 5. Velocidades de viento para diferentes periodos de retorno para el aeropuerto de Cancún.	56

INTRODUCCIÓN.

En el presente trabajo se investiga de manera experimental los efectos del viento sobre el tablero del “Puente Ferroviario Atirantado Garra de Jaguar”, mediante un estudio realizado en el Laboratorio de Túnel de Viento del IIUNAM, en un modelo de sección a escala de la sección de este puente. En el capítulo I, titulado “Antecedentes”, se destaca la importancia de la ingeniería civil en la aplicación de conocimientos para resolver desafíos, como la creación de puentes atirantados o colgantes que permiten tener grandes claros. Se menciona que este tipo de puentes son más vulnerables a fenómenos aerodinámicos como el aleteo aeroelástico, demostrado en el colapso del puente Tacoma Narrow en 1940. Se explican los efectos del viento, que pueden ser aerodinámicos y aeroelásticos, incluyendo una detallada explicación sobre la excitación por desprendimiento de vórtices, inestabilidad torsional y golpeteo debido a la turbulencia del viento; todos estos fenómenos aplicados al modelo de sección del puente antes mencionado.

De igual forma, en el capítulo I se menciona la importancia que tienen los túneles de viento mediante la simulación con diferentes modelos de investigación: modelos aeroelásticos, modelos rígidos de presión, modelo de banda tensada, modelo de sección; los cuales se construyeron para obtener un análisis más completo de la estructura y poder estudiar de manera más sencilla la interacción viento – estructura. Se construyó un modelo de sección escalando la geometría y las propiedades dinámicas más relevantes del puente a escala real. Este modelo de sección permite obtener información que corrobora los efectos del viento en el tablero del puente, mediante las propiedades dinámicas, las que a su vez ayudan a calcular los coeficientes aerodinámicos.

En el capítulo II titulado “Descripción del puente”, se describe a detalle el puente de estudio “Puente Ferroviario Atirantado Garra de Jaguar”, mencionando su ubicación y geometría. Se abordan aspectos como la cantidad de claros, el tablero, los cables y, con base en los planos, se muestra ilustrativamente la geometría de este. Además, se presenta el clima predominante en la ubicación, ya que esta información es crucial para determinar las condiciones de viento necesarias para realizar la prueba en el túnel de viento.

En el capítulo III titulado “Modelo de sección del puente”, se presenta el modelo a escala del “Puente Ferroviario Atirantado Garra de Jaguar”. Se detallan los parámetros de escala asignados, destacando que la escala de la geometría es de 1:20 y la escala de velocidades es de 1:4.47, explicando cómo se obtuvo esta escala. También se mencionan las dimensiones generales del modelo a escala. Se describe el proceso de fabricación, la

metodología empleada para su construcción, las pruebas de estabilidad del tablero y las pruebas de coeficientes aerodinámicos medios.

En el capítulo IV titulado “Pruebas en túnel de viento”, se explican las pruebas realizadas en el túnel de viento, que incluyen dos tipos de viento: suave y turbulento. Se considera que, para analizar el comportamiento del puente en el desprendimiento de vórtices, el caso más desfavorable es el viento “suave”, ya que permite apreciar mejor el fenómeno.

En el capítulo V se presentan los resultados, con el objetivo de investigar el comportamiento de las fuerzas aerodinámicas de arrastre, sustentación y momento de torsión del tablero, expresadas mediante coeficientes adimensionales. En las conclusiones se destaca la importancia de calcular estos coeficientes de fuerza para entender el comportamiento del tablero y superar la resistencia al viento. Con base en esta información, se hacen recomendaciones para mejorar el desempeño del tablero ante los fenómenos aerodinámicos.

OBJETIVOS.

PRINCIPAL.

Estudiar y analizar el comportamiento aerodinámico del “Puente Ferroviario Atirantado Garra de Jaguar”, mediante un modelo de sección del tablero, evaluando la aerodinámica de la sección con y sin pantallas acústicas, mediante el cálculo y análisis de las fuerzas aerodinámicas, incluyendo las fuerzas de sustentación, las fuerzas torsionales y las cargas de arrastre.

COMPLEMENTARIOS.

- Calcular con precisión las fuerzas aerodinámicas actuantes sobre el puente atirantado, incluyendo las fuerzas de sustentación, las fuerzas torsionales y las cargas de arrastre, mediante pruebas en túnel de viento.
- Analizar los resultados obtenidos de las pruebas para comprender el comportamiento del puente bajo diferentes condiciones de viento y ángulos de incidencia, identificando los factores que contribuyen a su inestabilidad.
- Utilizar las gráficas representativas de la inestabilidad del puente para discernir las causas subyacentes de dicha inestabilidad y desarrollar estrategias efectivas de mitigación de las vibraciones.
- Integrar los hallazgos del análisis aerodinámico en el proceso de diseño y construcción del puente, asegurando su seguridad y estabilidad ante condiciones climáticas adversas.

I. Antecedentes.

La ingeniería Civil es la profesión en la que se aplican conocimientos técnicos y científicos para el diseño, construcción y mantenimiento de infraestructuras que permiten el crecimiento de la sociedad. En la antigüedad, una de las mayores dificultades era cruzar de un lugar a otro enfrentando grandes obstáculos, ya fueran estos terrestres o acuáticos, como ríos o montañas. La solución a este desafío fue la construcción de puentes atirantados o puentes colgantes, los cuales permiten tener claros más largos. Los primeros ejemplos de estos fueron puentes hechos a base de lianas de la selva o cadenas de hierro, que no siempre ofrecían un camino seguro debido a la gran susceptibilidad de torsión a causa del viento y a las cargas presentes.

Para ofrecer mayor rigidez se introdujo un tablero que permitía distribuir las cargas a lo largo de los cables mediante el esfuerzo de cortante y los momentos. Sin embargo, esto no disminuye la susceptibilidad a la torsión, estos puentes suelen sufrir más daños estructurales, principalmente en la superestructura ya que es muy flexible, y son más susceptibles a los fenómenos aerodinámicos producidos por las ráfagas de viento. Un ejemplo muy conocido, fue el colapso del puente colgante de Tacoma Narrow en 1940, tal como se aprecia en la *Figura 1* el cual se muestra antes del colapso, mientras que en la *Figura 2* y *Figura 3*, se puede apreciar después del colapso, debido a vientos de velocidad moderada que ocasionaron un aleteo aeroelástico el cual coincidía con la frecuencia natural del puente.



Figura 1. Puente Tacoma Narrow antes del colapso (Yablonski, 2021).



Figura 2. Derrumbe del Puente Tacoma Narrow (Long, 2003).

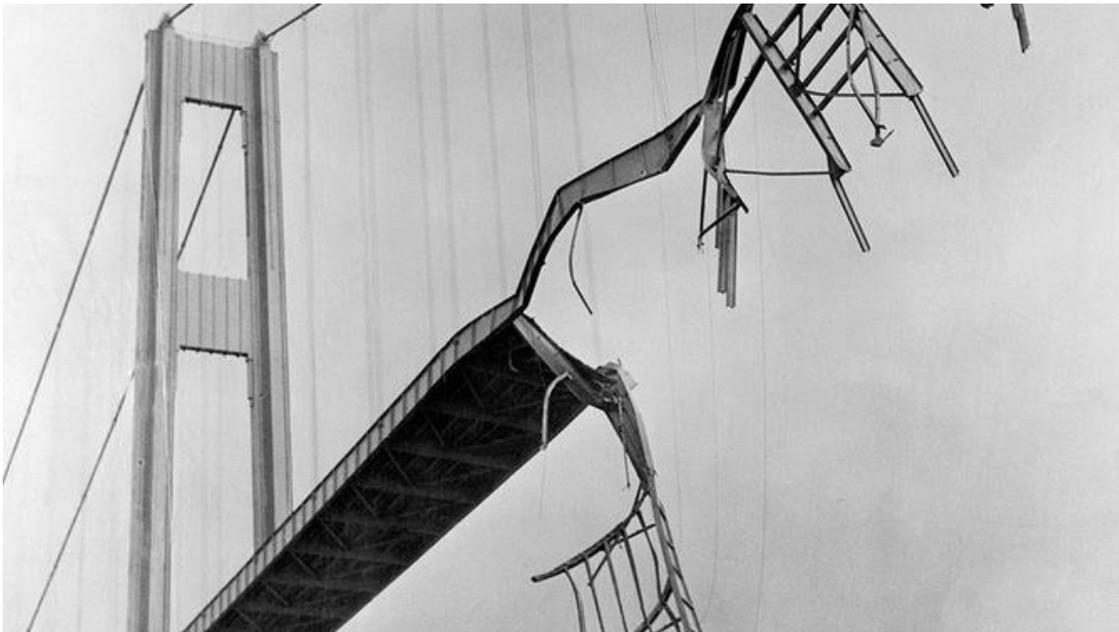


Figura 3. Tablero del puente Tacoma Narrow después del colapso (Yablonski, 2021).

A consecuencia de lo anterior, en la actualidad, durante las fases de construcción y de servicio, de acuerdo con las Normas para diseño de puentes, se debe revisar la seguridad de la estructura principal ante el efecto de las fuerzas que se generan por las presiones (empujes o succiones) producidas por el viento sobre las superficies de la estructura expuestas y que son transmitidas al sistema estructural. La revisión deberá considerar la acción del viento y la dinámica cuando la estructura sea sensible a estos efectos; en el caso de los puentes se realiza un estudio aerodinámico y/o un estudio aeroelástico. Estos estudios se suelen llevar a cabo mediante pruebas en túnel de viento, las cuales son una herramienta esencial en el campo de la ingeniería aerodinámica. Estas pruebas tienen como objetivo estudiar cómo el aire fluye alrededor de las estructuras y así conocer su respuesta.

Actualmente, a lo largo de toda la república mexicana existen en total 115 puentes de diferentes tipos, distribuidos en todo el Territorio Nacional (Gobierno de México, 2018). Entre ellos, se destaca el puente de este trabajo, el “Puente Atirantado Ferroviario Garra de Jaguar”, *Figura 4*; el cual se encuentra ubicado en Quintana Roo, México. Este puente de 266m de longitud total se construirá para librar la cueva “Garra de Jaguar” en el municipio de Tulum.



Figura 4. Puente Atirantado Ferroviario Garra de Jaguar (Fonatur, 2023).

Los puentes constan de dos partes que son fundamentales, la superestructura, o conjunto de tramos que salvan los claros situados entre los soportes, y la infraestructura o subestructura, que son los apoyos o soportes (Rodríguez, 2020).

- Superestructura (*Figura 5*): Incluyen aquellos elementos que reciben de forma directa las cargas vehiculares y peatonales, por lo general, esta parte del puente suele ser muy flexible y con bajo amortiguamiento en claros grandes.
- Subestructura (*Figura 5*): Incluyen las pilas y estribos con sus respectivas cimentaciones, estos elementos aseguran la transmisión de las cargas desde la superestructura hasta el suelo.

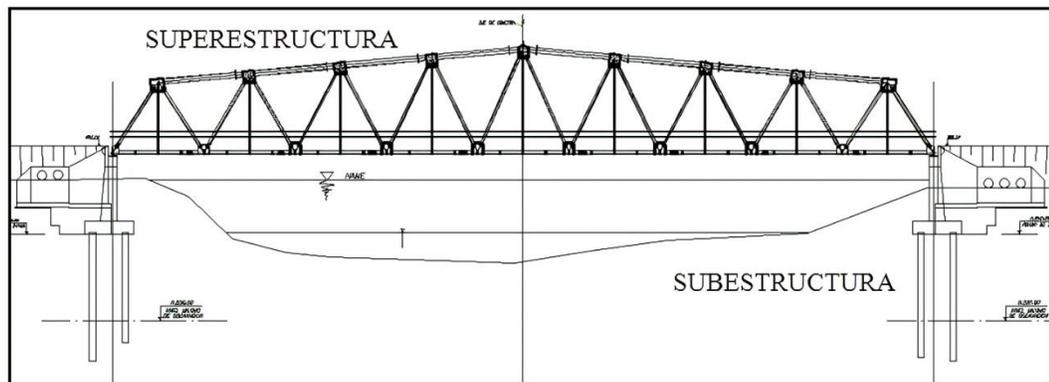


Figura 5. Superestructura y subestructura de un puente (Rodríguez, 2020).

Elementos de un puente

Los puentes son estructuras complejas cuyo comportamiento depende de la integración precisa y efectiva de varios elementos estructurales. Cada componente tiene un papel crucial en la funcionalidad y durabilidad del puente. La correcta construcción de estos elementos asegura que los puentes puedan cumplir su función de manera segura y eficiente, resistiendo las fuerzas de la naturaleza y el desgaste del tiempo.

Vigas:

Son aquellos elementos horizontales que se encargan de soportar las cargas y las transmiten a otros elementos de la estructura.



Figura 6. Elemento de viga (Ingeniería por el mundo, 2014).

Pilas:

Son aquellos elementos verticales que se encargan de soportar las cargas de la estructura y transmitirla hasta la cimentación.



Figura 7. Elemento de pila (Ingeniería por el mundo, 2014).

Claros:

Es la distancia que existe entre los ejes de las pilas.

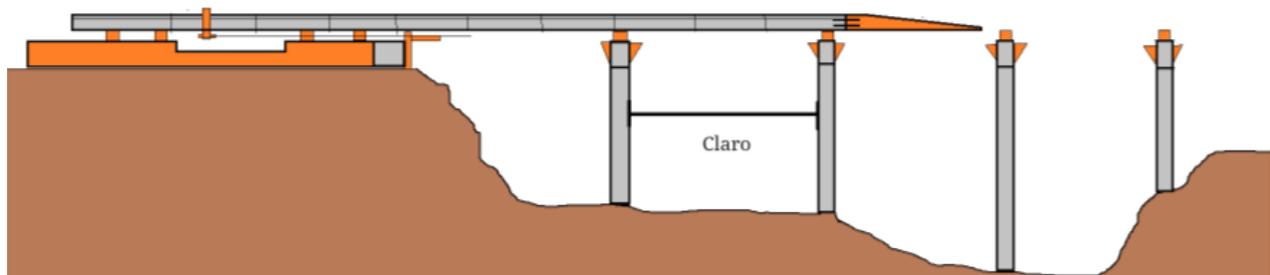


Figura 8. Claro de un puente (Ingeniería por el mundo, 2014).

Zapata:

Son aquellos elementos de cimentación de forma prismática rectangular que ayudan a transmitir las cargas de la estructura al suelo.

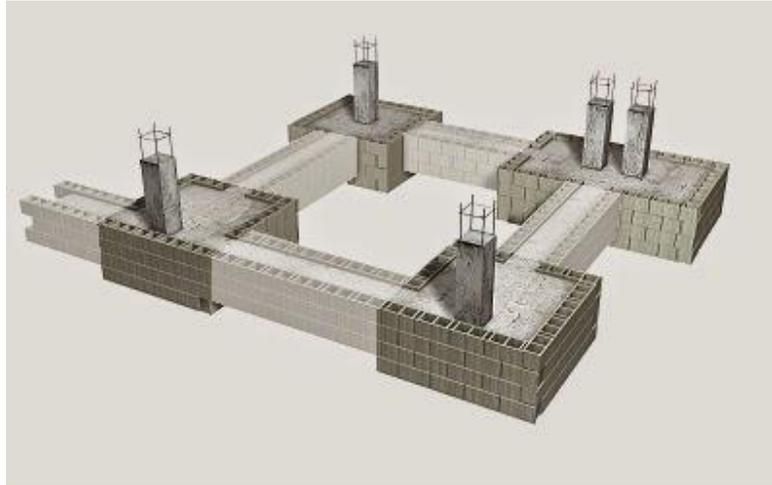


Figura 9. Zapata de cimentación (ingeniería por el mundo, 2014).

Tablero:

Es la losa superficial del puente, encargada de absorber los esfuerzos de tráfico y cargas para transmitirlos a la pila del puente.

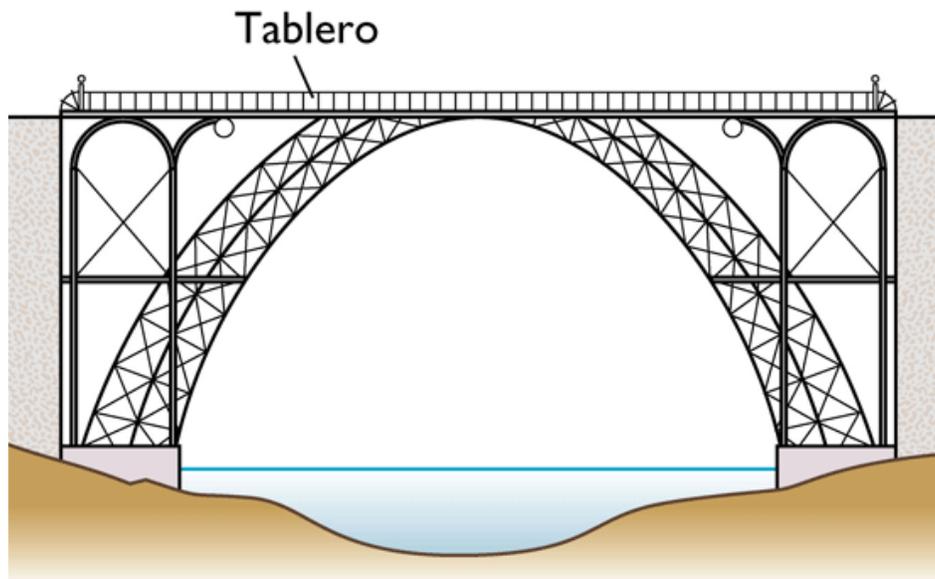


Figura 10. Tablero de un puente (Ingeniería por el mundo, 2014).

Tipos de puentes

Existen varios tipos de puentes, cada uno de ellos está diseñado de tal forma que se pueda adaptar al tipo de suelo, a las cargas que debe soportar y a los recursos disponibles. Los más comunes son:

Puentes de viga:

Los puentes de viga son conocidos por su simplicidad y antigüedad. Trabajan bajo el principio de la flexión, donde la zona inferior de la estructura trabaja a tensión y la zona superior a compresión. Están compuestos por una serie de vigas horizontales que se apoyan sobre pilas, lo que permite distribuir el peso y soportar las cargas de manera eficiente. Son más usados cuando los claros son más cortos.



Figura 11. Puente de viga “Ponte do Freixo, ubicado de Portugal” (Ingeniería por el mundo, 2014).

Puente de ménsula:

Al igual que los puentes de viga, estos puentes se caracterizan por trabajar a flexión, la diferencia es que en la zona superior de la estructura trabaja a tensión mientras que la zona inferior se encuentra sometida a compresión. Esta distribución de esfuerzos permite que las vigas horizontales, apoyadas sobre las pilas, distribuyan eficientemente las cargas a lo largo de la estructura.

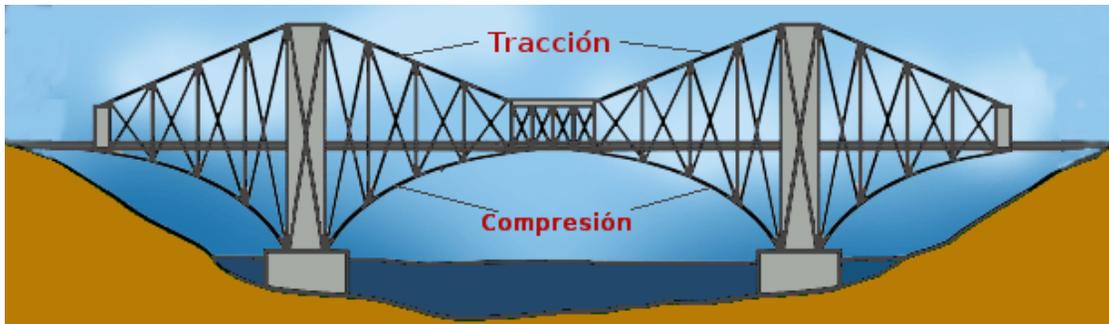


Figura 12. Puente de ménsula (Ingeniería por el mundo, 2014).

Puentes de arco:

Estos puentes se caracterizan porque la mayor parte de la estructura trabaja a compresión, lo que los hace que sean extremadamente robustos. Los principales materiales en este tipo de puentes son, piedra, acero, y concreto; esto permite transferir el peso del puente y las cargas que soporta hacia los apoyos que se encuentran en los extremos del arco.



Figura 13. Puente de arco "Puente sobre el río Tajo" (Ingeniería por el mundo, 2014).

Puente colgante:

Estos puentes se caracterizan porque trabajan a tensión. Un ejemplo de este tipo de puentes es el Puente Golden Gate. Los cables se encuentran suspendidos desde altas torres que soportan el tablero del puente, permitiendo la distribución eficiente de las cargas. Este tipo de estructuras es ideal para cruzar grandes claros, a diferencia de otros puentes.



Figura 14. Puente colgante “Puente Golden Gate” (Ingeniería por el mundo, 2014).

Puente Atirantado:

En estos puentes, el tablero está suspendido mediante cables que se conectan directamente desde una o varias pilas al tablero, a diferencia de los puentes colgantes donde los cables cuelgan de cables principales. Los puentes atirantados combinan eficiencia estructural con un diseño llamativo, haciéndolos ideales para proyectos que requieren tanto funcionalidad como atractivo visual.



Figura 15. Puente Atirantado “Puente Baluarte” (Warrick, 2012).

1.1 Efectos del viento en el tablero de un puente.

Al diseñar un puente, los ingenieros estructuralistas deben considerar aspectos críticos que afectan la estabilidad del tablero; como son las fuerzas sísmicas, las fuerzas generadas por el viento, entre otras. El estudio de los efectos del viento no solo garantiza la seguridad de los usuarios que transitan sobre el puente, sino que también tiene en cuenta las cargas que provocan tensiones significativas en los materiales.

En particular, los puentes atirantados son especialmente vulnerables a los efectos del viento debido a su alta flexibilidad, bajo amortiguamiento y la forma del tablero y pilones. Los fenómenos de inestabilidad provocados por el viento suelen estar asociados a modos de flexión vertical y torsión del tablero a bajas velocidades, pueden generar vibraciones derivadas del desprendimiento de vórtices, por el contrario, a altas velocidades podrían surgir inestabilidades aeroelásticas. Estos efectos son perceptibles tanto en la etapa de construcción como de servicio (Sánchez, 2024)

Según las características geométricas de longitud y ancho, un puente puede volverse más sensible a los efectos del viento. La interacción viento – estructura es un fenómeno bastante complejo, donde la estructura responderá de diversas maneras. Además de las cargas longitudinales (en dirección del viento), pueden existir cargas transversales y de torsión originadas por una distribución asimétrica de las presiones sobre sus superficies y el desprendimiento de vórtices.

1.1.1 Efectos Aerodinámicos.

En puentes con claro largo, todos los componentes estructurales trabajan en conjunto para optimizar el rendimiento aerodinámico general de la estructura. El tablero de un puente desempeña un papel crucial, ya que suele soportar la mayor parte de la carga del viento. Además, en puentes atirantados, las torres y los cables también contribuyen significativamente en el comportamiento aerodinámico total de la estructura.

Los cables son elementos cruciales para soportar cargas en puentes con claro largo, como los puentes colgantes y atirantados. Es fundamental evaluar su fuerza de arrastre durante el diseño e incluirla en la carga total del viento que soportará el puente.

Por otro lado, las torres adquieren gran importancia durante la construcción, ya que se debe considerar el rendimiento aerodinámico tanto en posición libre (cuando no se tienen otras estructuras que la bloqueen o interfieran con el flujo de aire alrededor de ella) como en

posición retranqueada (cuando está ubicada en una posición más protegida, de tal forma que el viento no la impacta directamente).

Las cargas producidas por fenómenos externos en estructuras suelen representarse como fuerzas o momentos. En el caso del viento, existen dos tipos de cargas: las estáticas y las fluctuantes. Las cargas estáticas permanecen constantes en el tiempo, mientras que las fluctuantes cambian con el tiempo. Estas cargas generadas por el viento afectan el tablero del puente al pasar sobre o a través de él. El impacto del viento en el tablero crea áreas de presión y succión: cuando el viento golpea el tablero se forman zonas de alta presión (áreas de presión) y zonas de baja presión (áreas de succión). Estas diferencias de presión pueden tener un impacto significativo en la estabilidad y el comportamiento del tablero.

Al observar el tablero de un puente de forma bidimensional y suponiendo que el viento sopla de izquierda a derecha, se generan áreas de alta presión en el lado del puente donde el viento incide (barlovento). A medida que el viento continúa fluyendo alrededor del tablero, se produce un fenómeno llamado separación en las esquinas o bordes del puente, lo que significa que el flujo de aire se desvía de la superficie del puente en estas áreas, creando zonas de baja presión o succión. En estas zonas, la presión del aire es máxima negativa. En la parte opuesta al lado por donde entra el viento (sotavento), también se forma una zona de succión debido al efecto del flujo de aire alrededor del puente, que genera condiciones de baja presión en esta área. Esto se puede apreciar en la ilustración *Figura 16*.

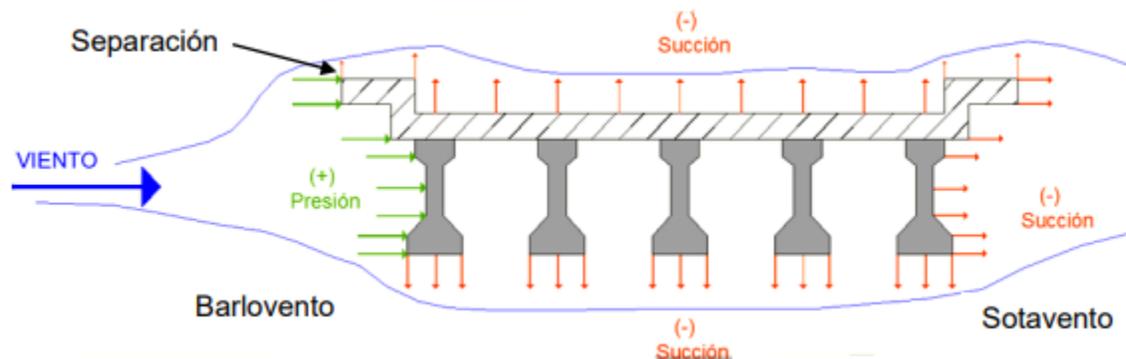


Figura 16. Presión y succión debido al viento en un puente (Romero, 2014).

Al integrar estas distribuciones de presiones, se obtienen tres fuerzas resultantes, las cuales se hace una representación visual en la *Figura 17*.

- Fuerza de arrastre: Esta es la fuerza que actúa en dirección del viento. Es la fuerza que empuja al objeto o estructura en la misma dirección en la que sopla el viento.
- Fuerza de levantamiento: Esta es la fuerza perpendicular a la fuerza de arrastre. Puede entenderse como la fuerza que empuja al objeto hacia arriba o hacia abajo, perpendicularmente a la dirección del viento.
- Momento de torsión: Además de las fuerzas de arrastre y levantamiento, el viento también induce un momento de volteo. Esto implica que el viento puede ejercer una fuerza que intenta hacer girar al tablero del puente.

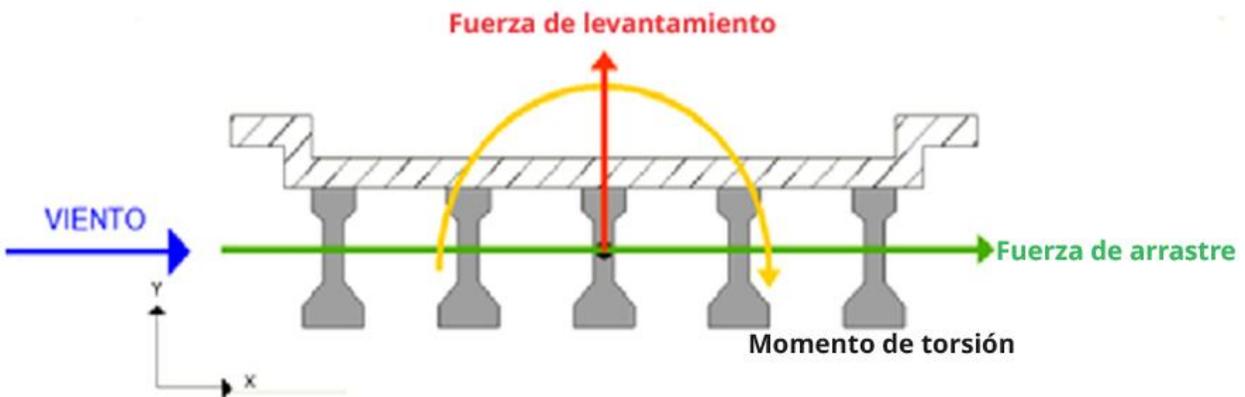


Figura 17. Sistema de fuerzas y momentos actuantes en el tablero de un puente.

1.1.2 Efectos Aeroelásticos.

Cuando una corriente de viento incide sobre puentes de grandes claro, no solo causa que el puente se desplace, sino que también modifica las cargas que el viento ejerce sobre la estructura, es decir, se presenta la interacción viento – estructura que puede generar fuerzas autoexcitadas, conocidas como fuerzas aeroelásticas, que podrían ocasionar que la estructura falle. Por lo tanto, es esencial estudiar experimentalmente la respuesta de la estructura ante la acción del viento durante la fase de proyecto para así cumplir con la seguridad estructural, es decir, soportar las cargas del viento sin colapsar o sufrir daños significativos.

La aeroelasticidad se basa en varias disciplinas interrelacionadas, entre las que se incluyen la aerodinámica, la dinámica estructural y la elasticidad (Hodges y Alvin Pierce,

2002). Para comprender cómo estas disciplinas se relacionan entre sí, es crucial tener un conocimiento profundo de cada una de ellas:

- **Aerodinámica:** Es la encargada del comportamiento del flujo de aire alrededor de un objeto. En el contexto de la aeroelasticidad, la aerodinámica es fundamental para entender como el viento interactúa con la geometría de un objeto y qué fuerzas aerodinámicas se generan como resultado de esta interacción.
- **Elasticidad:** Es la capacidad que tiene un material para deformarse reversiblemente cuando se le aplica una carga. En el contexto de la aeroelasticidad, la elasticidad es importante porque se estudia cómo responde una estructura, como un puente, cuando se le aplican cargas aerodinámicas.
- **Dinámica estructural:** Se centra en el estudio del movimiento y la respuesta dinámica de las estructuras ante diversas cargas, incluyendo las fuerzas de inercia que surgen debido a la aceleración de la estructura. En el contexto de la aeroelasticidad, la dinámica estructural es esencial para comprender cómo las fuerzas aerodinámicas y las deformaciones elásticas afectan el comportamiento dinámico de la estructura, como su vibración, oscilación o estabilidad.

Entre estas tres disciplinas, existen dos áreas, la combinación entre la aerodinámica y la elasticidad se conoce como “aeroelasticidad estática”, mientras que si intervienen las fuerzas de inercia a esta primera se tiene “aeroelasticidad dinámica”. Una inestabilidad aerodinámica puede ser un fenómeno que ocurre únicamente en el fluido, como cuando una serie de vórtices se desprende de un cuerpo fijo. Pero si el cuerpo en un flujo se flexiona debido a alguna fuerza y ese desplazamiento inicial modifica la distribución de presiones ocasionados por el viento y da lugar a desplazamientos sucesivos de carácter oscilatorio y/o divergente, entonces se trata de una inestabilidad aeroelástica. Una inestabilidad aerodinámica pura, como el desprendimiento de vórtices, puede ocasionar desplazamientos estructurales también, y da lugar a un fenómeno que tiene carácter aeroelástico. De hecho, todas las inestabilidades aeroelásticas involucran fuerzas aerodinámicas que actúan sobre el cuerpo como consecuencia de su movimiento. Tales fuerzas se denominan autoexcitadas (Emil Simiu y Robert H. Scanlan, 1996).

1.1.3 Efectos de inestabilidad en puentes.

Algunos de los efectos de inestabilidad que ocurren en los puentes con claros grandes, son:

- Desprendimiento de vórtices alternantes
- Golpeteo
- Aleteo o Flutter
- Galope o Galloping (en cables)

1.1.3.1 Desprendimiento de vórtices.

La excitación por desprendimiento de vórtices se refiere a la formación alternada de vórtices en la superficie superior e inferior del tablero (Larsen, 1992). Este fenómeno ocurre cuando un cuerpo se expone a una corriente de fluido a una velocidad crítica V_{cr} . Esto provoca variaciones en las presiones en la superficie del cuerpo a lo largo del tiempo, como se puede observar en la *Figura 18* para un cilindro (Blevins, 1990). Como consecuencia, se desarrollan fuerzas fluctuantes transversales al flujo, resultado del desprendimiento alternativo de estos vórtices.

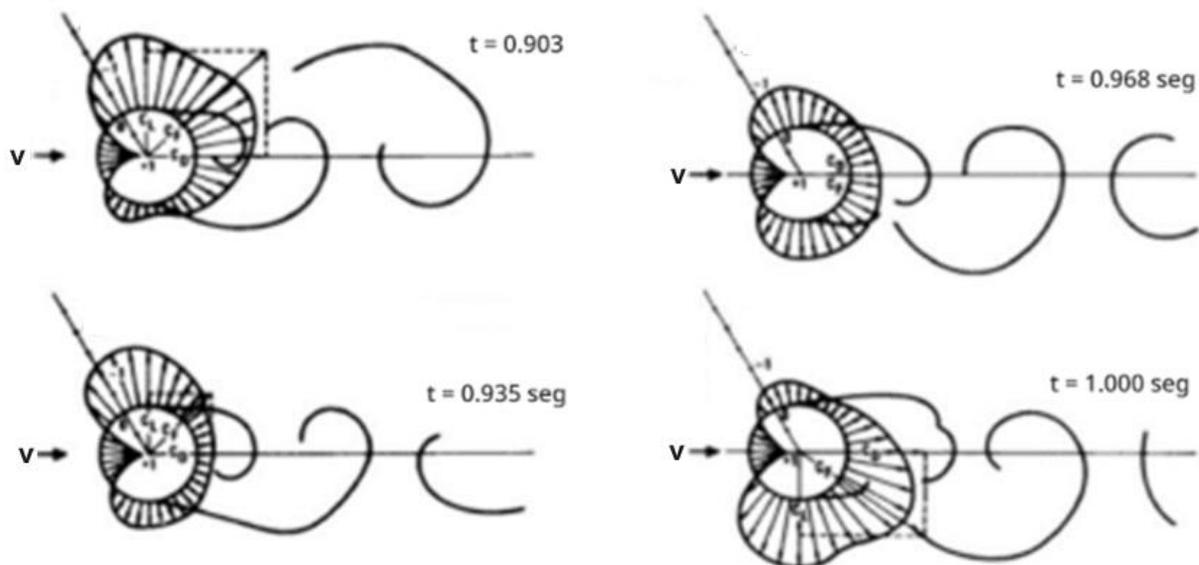


Figura 18. Área de presiones en la superficie de un cilindro (Blevins, 1990).

Conforme los vórtices se desprenden de manera alternada en los lados opuestos del cilindro, se generan fuerzas periódicas sobre el cuerpo en dirección perpendicular al flujo. Si el cilindro tiene libertad de movimiento en la dirección transversal a la corriente del fluido, estas fuerzas periódicas interactúan con el movimiento del cilindro, produciendo vibraciones inducidas por el desprendimiento de vórtices.

El número de Strouhal es crucial para el análisis de vórtices, los cuales se crean cuando un fluido fluye alrededor de un objeto. Se puede definir como la relación entre la frecuencia de oscilación (f) de un fenómeno en el flujo, una dimensión característica del objeto (L), y la velocidad del flujo (U), y se expresa de la siguiente manera:

$$St = \frac{f * L}{U}$$

Donde:

St = Número de Strouhal

f = Frecuencia de oscilación

L = Longitud característica

U = Velocidad del flujo

Los vórtices se forman tanto en viento laminar como en viento turbulento, sin embargo, de acuerdo con observaciones experimentales realizadas en viento turbulento la turbulencia ayuda a bloquear el efecto de los vórtices y, por lo tanto, a suprimir la repuesta del desprendimiento de estos. Los principales regímenes de desprendimiento de vórtices, se originan a partir de la relación entre los efectos inerciales y viscosos representados por el número de Reynolds. Este número ayuda a determinar si un flujo será laminar o turbulento. Si se tiene un número de Reynolds bajo, las fuerzas viscosas predominan, lo que mantiene el flujo ordenado (laminar). Por otro lado, un número de Reynolds alto sugiere que las fuerzas de inercia son mayores, provocando un flujo desordenado (turbulento).

Para valores por debajo del número de Reynolds ($Re < 5$), el fluido pasa alrededor del cilindro sin que ocurra desprendimiento de vórtices. Cuando se encuentra entre el 5 y 40, el fluido se separa, formando un par de vórtices estacionarios en la parte posterior del cilindro. Esta configuración es inestable, y una pequeña perturbación puede provocar un desprendimiento alternado y periódico de vórtices.

El desprendimiento alternado de vórtices en un cilindro circular se produce con valores de entre 40 y 150 del número de Reynolds, tal y como se muestra en la *Figura 19*. Para valores de entre 150 y 300, se observa una transición del régimen laminar al turbulento. En el rango de 300 a 300,000, la estela es completamente turbulenta, pero el desprendimiento de vórtices sigue ocurriendo con una frecuencia bien definida. Por último, para valores mayores de 3,000,000, en condiciones de viento turbulento, se restablece el desprendimiento alternado de vórtices.

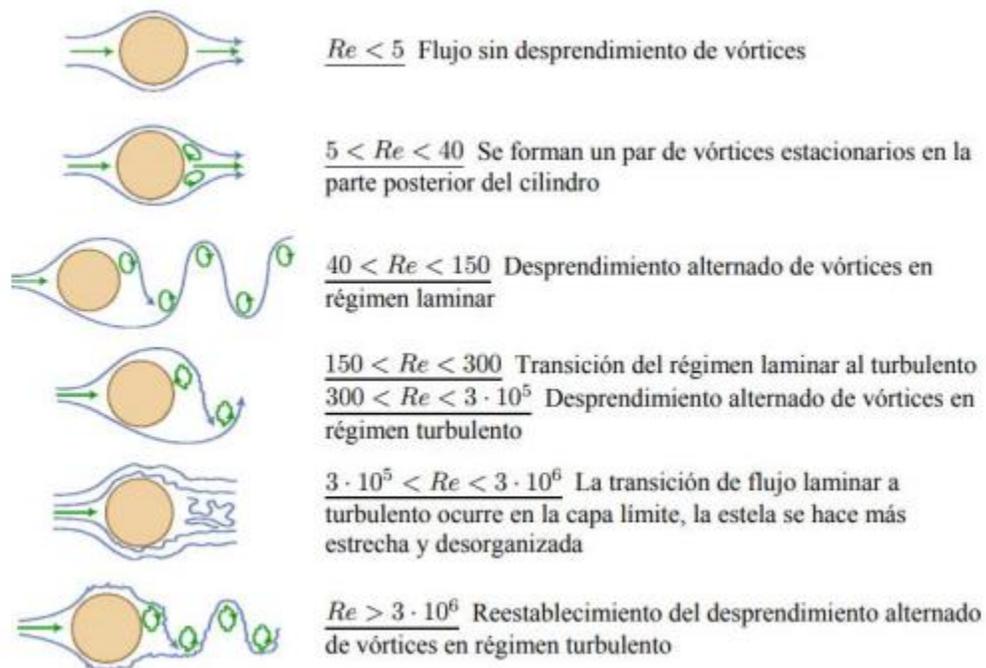


Figura 19. Regímenes de flujo alrededor de un cilindro circular (Vasallo).

1.1.3.2 Aleteo o Flutter.

El fenómeno de aleteo, también denominado “Flutter”, es una vibración producida en un puente por la interacción con el flujo de viento, y su amplitud no solo es ilimitada, sino que también aumenta con cada ciclo que se genera. El aleteo es el proceso en el que las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre una estructura flexible, a una velocidad crítica, aumentan su deformación (deflexión), y esta deformación va aumentando con el tiempo, lo que a su vez ocasiona que estas fuerzas vayan incrementándose (Rincón, 2013). Esta velocidad crítica deberá ser determinada por medio de pruebas de túnel de viento, en modelo seccionales con flujo laminar, con el fin de determinar el punto en el que un puente o cualquier estructura aerodinámica puede experimentar inestabilidad debido a la interacción entre las fuerzas aerodinámicas y las propiedades estructurales.

Si la velocidad es menor a la velocidad crítica ($V < V_{cr}$) el cuerpo se puede volver neutralmente estable. Por otro lado, si la velocidad es mayor a la velocidad crítica las oscilaciones que comienzan con una pequeña perturbación en la posición de equilibrio aumentarán con el tiempo, como se aprecia con la *Figura 20*. Las fuerzas autoexcitadas que causan estas oscilaciones crecientes pueden considerarse como generadoras de un efecto de amortiguamiento negativo, que se refiere a la disipación de energía que reduce la amplitud de las oscilaciones.

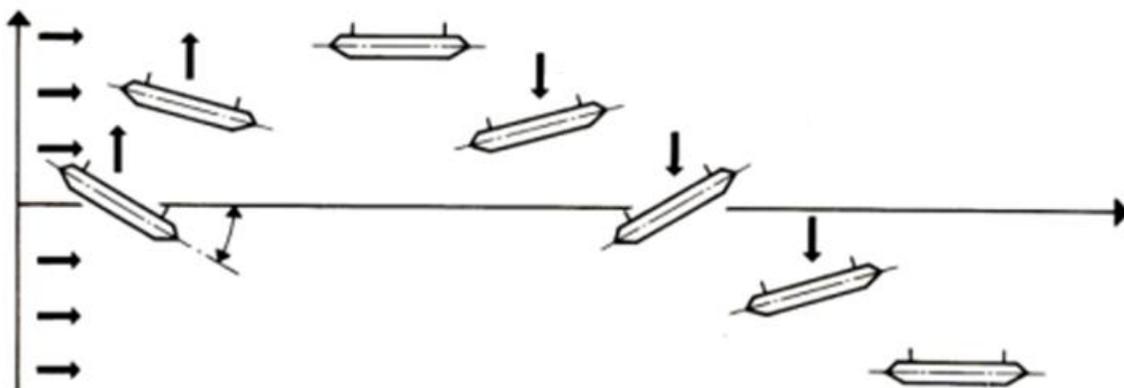


Figura 20. Diferentes movimientos de aleteo con el paso del tiempo (González).

1.1.3.3 Golpeteo o Buffeting.

El Buffeting es una vibración provocada por un flujo de viento turbulento. Este fenómeno genera ráfagas de viento con diferentes velocidades promedio en un puente. Aunque no suele causar inestabilidad estructural, es crucial limitarlo, al igual que en el caso del desprendimiento de vórtices, para asegurar una vida útil adecuada y prolongada del puente (Jurado, 2011).

Un cuerpo sometido al buffeting experimenta primero un movimiento oscilatorio muy pequeño inducido por una perturbación inicial. Estas oscilaciones, al principio tienen un resultado insignificante, pero esto puede convertirse en resultado significativo cuando se excede la velocidad crítica del viento. El golpeteo puede presentarse en la dirección longitudinal del cuerpo o en torsión cuando se trata de un cuerpo articulado. En este último caso, el golpeteo torsional es un fenómeno mucho más complejo debido a los diferentes ángulos de incidencia, el desplazamiento angular, la velocidad, la diferencia de fases y la dinámica implicada en el movimiento de rotación. Cuando se inicia el golpeteo longitudinal, la amplitud de la vibración aumentará con el incremento de la velocidad del flujo y este no parará, incluso a velocidades del viento muy altas. Esta característica distingue los fenómenos de inestabilidad de resonancia.

El golpeteo es causado por las variaciones espaciales y temporales de las velocidades del viento a lo largo de la estructura. Los reglamentos recomiendan un método simplificado para evaluar la respuesta a la fuerza de golpeteo para estructuras sensibles al viento. Este método se basa en el concepto de factor de ráfaga, desarrollado por Davenport, en el que considera que la fuerza del viento puede aproximarse mediante una fuerza estática, debida a la velocidad media que se multiplica por un factor de ráfaga que tiene en cuenta los efectos del golpeteo en la respuesta máxima de la estructura. El uso del concepto de factor de ráfaga simplifica considerablemente el problema de diseño de puentes ante cargas de viento. Este factor depende de las características dinámicas de la estructura y de la caracterización estadística de la parte fluctuante de la velocidad del viento.

1.2 Simulación en túnel de viento.

Las simulaciones en túnel de viento son fundamentales en la ingeniería, y en el diseño de diversas estructuras expuestas a corrientes de aire porque permiten evaluar las fuerzas aerodinámicas, proporcionando datos sobre las fuerzas aerodinámicas, como los coeficientes aerodinámicos. Estas simulaciones permiten evaluar cómo se comporta una

estructura en presencia de viento, asegurando que el diseño sea aerodinámico y eficiente. Funcionan generando una corriente de aire controlada para simular tanto el flujo turbulento como las propiedades dinámicas alrededor de un objeto o estructura. Los modelos suelen ser a escala reducida para pruebas económicas y controladas. Estas técnicas son particularmente útiles en el diseño de puentes.

1.2.1 Tipos de prueba en túneles de viento.

Existen diferentes tipos de pruebas que se usan en los túneles de viento, esto se debe principalmente al enfoque y a la metodología utilizada para estudiar el comportamiento aerodinámico de las estructuras. Cada prueba tiene sus propias características distintivas y aplicaciones específicas, es decir, diferencias significativas en términos de diseño experimental, instrumentación y análisis de datos. Las pruebas en túneles de viento más usadas son: modelos aeroelásticos, modelos rígidos de presión, modelos de banda tensada y modelos de sección.

Un componente fundamental de la simulación en túnel de viento es la incorporación de modelos aeroelásticos, los cuales capturan la respuesta dinámica de una estructura aeroelástica bajo la influencia de las fuerzas aerodinámicas generadas por el flujo de aire en el túnel. Este enfoque implica considerar tanto la respuesta elástica de la estructura como las interacciones aerodinámicas que pueden causar vibraciones, oscilaciones o deformaciones debido a las fluctuaciones en la velocidad y dirección del viento (Jurado, 2014)

En otras palabras, el modelo aeroelástico simula cómo una estructura real se comportaría en condiciones de viento, teniendo en cuenta tanto sus propiedades estructurales como las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre ellas. Esto es crucial para comprender y predecir con precisión el comportamiento de la estructura en condiciones de viento variable y para diseñar estructuras que sean seguras y estables en tales condiciones. Los modelos aeroelásticos en la simulación de túnel de viento permiten estudiar una amplia gama de fenómenos aeroelásticos, incluyendo el flutter, las vibraciones inducidas por el viento, las resonancias estructurales y la respuesta dinámica frente a ráfagas y turbulencia. Estos modelos pueden variar en complejidad, desde modelos simplificados que consideran solo una respuesta modal hasta modelos detallados que tienen en cuenta la geometría completa de la estructura y su comportamiento no lineal.



Figura 21. Modelo aeroelástico del puente Lions Gate, Vancouver (Larsen, 1992).

La simulación de modelos aeroelásticos en túneles de viento requiere un enfoque multidisciplinario que combine la ingeniería estructural, la aerodinámica y la dinámica de fluidos computacional. Además, se necesita de una cuidadosa calibración y validación de los modelos utilizando datos experimentales para garantizar su precisión y fiabilidad.

1.2.1.1 Modelos aeroelásticos.

Los modelos aeroelásticos se centran en estudiar la interacción dinámica entre la estructura y el flujo de aire circundante, teniendo en cuenta la flexibilidad y la respuesta estructural ante las fuerzas aerodinámicas. Estos modelos permiten realizar un estudio de los efectos del viento turbulento en puentes, debido a que modelan estadísticamente tanto las características del viento como las propiedades dinámicas estructurales del puente a una cierta escala.

La interacción entre la estructura y las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre ella, suelen dar lugar a fenómenos como la flexión, la torsión, el “flutter” (vibración autoexcitada), entre otras formas de inestabilidad que pueden comprometer la seguridad y el rendimiento de la estructura. Estos modelos se basan en los principios de la dinámica estructural y la aerodinámica. Por un lado, la dinámica estructural estudia el comportamiento de la estructura bajo cargas externas, que incluyen la respuesta a vibraciones y deformaciones.

Por otro lado, la aerodinámica analiza las fuerzas y momentos generados por el flujo de aire sobre la estructura. No obstante, deben tener una escala relativamente pequeña, lo cual exige un alto nivel de precisión durante la fabricación del modelo.

Para su estudio se requiere una instrumentación especializada para medir tanto la respuesta estructural como las fuerzas aerodinámicas, por lo que su importancia radica en su capacidad para predecir y comprender los fenómenos aeroelásticos que pueden surgir en diversas aplicaciones expuestas al viento. La simulación en túnel de viento implica la exposición del modelo aeroelástico a un flujo de aire variable mientras se registran los datos correspondientes para su análisis, como se observa en la *Figura 22*.



Figura 22. Modelos de puentes para ensayos en túneles de viento. Puente completo (izquierda) y segmento de tablero (derecha). (Hernández, 2022).

1.2.1.2 Modelos rígidos de presión.

Los modelos rígidos de presión son réplicas a escala de estructuras que se utilizan para medir la distribución de presión estática sobre su superficie cuando están expuestos a un flujo de aire en un túnel de viento. Estos modelos pueden ser de diversas formas y tamaños, dependiendo de la aplicación específica, pero comparten la característica de ser sólidos y no deformables durante las pruebas.

La función principal de los modelos rígidos de presión es obtener datos precisos sobre la distribución de presión en la superficie del objeto en estudio. Estos datos son esenciales para calcular los coeficientes aerodinámicos relevantes, como el coeficiente de arrastre, el coeficiente de sustentación y el momento aerodinámico, que son críticos para evaluar el rendimiento y la estabilidad de un puente, ante diferentes incidencias del viento.

La simulación de modelos rígidos de presión en túneles de viento implica colocar el modelo a escala dentro del túnel y exponerlo a un flujo de aire controlado. Se instalan sensores de presión en la superficie del modelo para medir la distribución de presión en diferentes puntos. Estos sensores están conectados a equipos de adquisición de datos que registran y procesan los datos obtenidos durante las pruebas. Durante las pruebas en el túnel de viento, se varían las velocidades del aire, la dirección del flujo y otras condiciones relevantes para evaluar el comportamiento aerodinámico del modelo. Los datos de presión recopilados se utilizan luego para calcular los coeficientes aerodinámicos y realizar análisis detallados sobre el rendimiento de la estructura.

Estos modelos son especialmente útiles en la fase inicial de diseño, donde ayudan a los ingenieros a comprender cómo el flujo de aire interactúa con la estructura y a identificar áreas de alta presión, puntos críticos de separación del flujo y otros fenómenos aerodinámicos importantes.

1.2.1.3 Modelo de banda tensada.

Los modelos de banda es una combinación entre el modelo aeroelástico y el modelo de sección. Estos modelos, que simulan la interacción entre el flujo de aire y una superficie flexible tensionada, son esenciales para comprender cómo las fuerzas aerodinámicas afectan a objetos estructurales flexibles. Se construyen utilizando una membrana delgada y resistente, que se estira y tensa sobre un marco rígido, lo que les confiere características únicas que las distinguen de los métodos de construcción tradicionales. Una de las principales ventajas de las estructuras de membrana tensada es su ligereza. A diferencia de los materiales de construcción tradicionales, como el acero o el concreto, las membranas tensadas requieren una cantidad significativa menor de material para cubrir grandes superficies. Este método permite una libertad de diseño que es difícil de alcanzar con materiales rígidos.

Esta técnica permite simular la respuesta dinámica de una superficie flexible ante las fuerzas aerodinámicas generadas por el flujo de aire en un túnel de viento. La importancia de los modelos de banda tensada radica en la capacidad de la membrana flexible para deformarse y adaptarse al flujo de aire, permitiendo así capturar fenómenos aerodinámicos complejos, como la separación del flujo, la formación de vórtices y la interacción fluido – estructura. Esta flexibilidad proporciona una representación más realista del comportamiento aerodinámico de estructuras flexibles en comparación con modelos rígidos convencionales. El modelo está compuesto por segmentos de revestimiento que reproducen la geometría y la masa del puente a escala real. Estos segmentos de revestimiento se fijan

posteriormente a cables tensados que facilita la rigidez vertical, lateral y torsional del modelo, como se puede observar en la *Figura 23*.



Figura 23. Ejemplo del modelo de banda tensada. (Geo, 2018).

La simulación de modelos de banda tensada en túneles de viento implica suspender la estructura flexible dentro del túnel y exponerla a un flujo de aire controlado. La membrana tensada se ajusta y se asegura en su lugar, y se instalan sensores de presión u otros dispositivos de medición en la superficie de la membrana para registrar la distribución de fuerzas aerodinámicas.

Durante las pruebas en el túnel de viento, se varían la velocidad del aire, la dirección de flujo y otras condiciones relevante para evaluar el comportamiento aerodinámico de la estructura flexible. Los datos recopilados durante las pruebas se utilizan para analizar la respuesta dinámica de la membrana tensada, identificar patrones de flujo y fenómenos aerodinámicos.

1.2.1.4 Modelo de sección.

El modelo de sección es una representación simplificada de una porción transversal de una estructura, como puede ser el caso de un puente o una viga, que se utiliza para analizar su comportamiento mecánico y aerodinámico. Este tipo de modelo se encuentra suspendido por medio de resortes lo que permite hacer una modelación de la rigidez del tablero, en los primeros 3 modos fundamentales (lateral, vertical, y torsión del tablero) *Figura 24*.

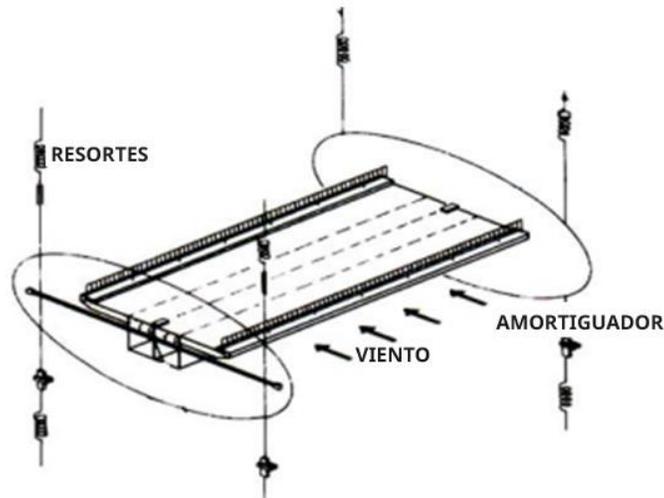


Figura 24. Ejemplo del modelo de sección del tablero de un puente.

En su diseño, el modelo de sección tiene como objetivo ofrecer una representación precisa de la distribución de materiales y cargas dentro de la estructura en una escala reducida. Esto permite realizar análisis detallados y cálculos precisos, siendo especialmente útil en la ingeniería de puentes, donde es crucial comprender cómo diferentes secciones transversales contribuyen al comportamiento global de la estructura mediante los coeficientes aerodinámicos, tal es el caso, del de arrastre, el de levantamiento y el momento de torsión.

En el contexto de la simulación de túneles de viento, el modelo de sección se utiliza para representar la forma y las características aerodinámicas de una porción transversal de la estructura. Esto permite estudiar cómo el flujo de aire interactúa con la sección y cómo esto afecta el comportamiento aerodinámico de la estructura en su conjunto, proporcionando las fuerzas aerodinámicas actuantes de acuerdo con el ángulo de incidencia del viento, como se puede ver en la *Figura 25*.

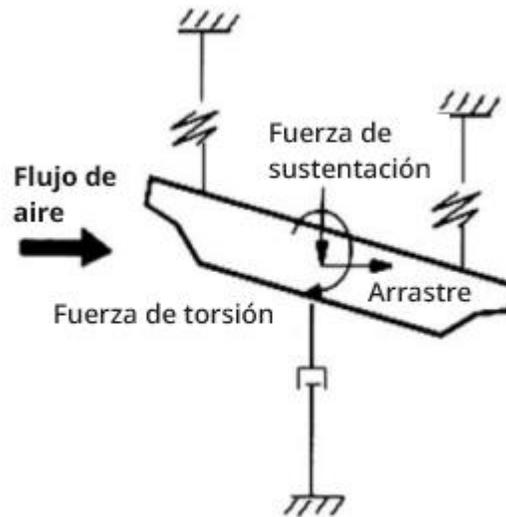


Figura 25. Fuerzas aerodinámicas en el tablero de un puente debidas al viento.

Específicamente, un modelo de sección a escala de un puente representa una parte del tablero de este. Estos modelos son útiles para determinar los coeficientes aerodinámicos de la sección del tablero, como el arrastre, el levantamiento y el momento de torsión. Además, también pueden emplearse para estudiar los efectos de inestabilidad ocasionados por el viento.

Los estudios han demostrado que los modos de vibración más susceptibles de ser excitados son el modo vertical y el de torsión. Por lo tanto, el método experimental clásico sugiere suspender el modelo de sección de un marco mediante resortes y excitar este modelo con el flujo del viento. Para este fin, se diseñan sistemas de sujeción que permiten sujetar el modelo a escala desde ocho puntos mediante resortes, proporcionando la flexibilidad necesaria para capturar una amplia gama de comportamientos estructuras bajo diversas condiciones de viento.

II. Descripción del puente.

La estructura en estudio es el “Puente Ferroviario Atirantado Garra de Jaguar”, el cual se encuentra en el municipio de Tulum, en el corazón de la Península de Yucatán. Forma parte del tramo 5 sur del Tren Maya, específicamente entre el trayecto de Playa del Carmen y Tulum (ver *Figura 26*).

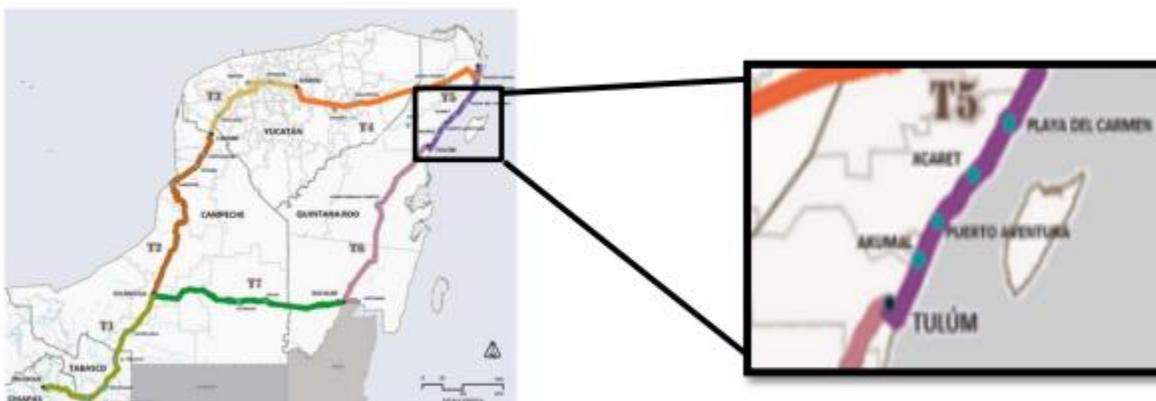


Figura 26. Localización del puente GARRA DE JAGUAR.

Este puente tiene como propósito librar la cueva conocida como “Garra de Jaguar” por esta razón el nombre, esta cueva es una formación natural que, debido a su intrincada red de túneles y su profundidad, representaban un obstáculo significativo para el tránsito en la zona (*Figura 27*). Forma parte del tramo 5 sur del proyecto del Tren Maya el cual la red ferroviaria completa se encuentra en la *Figura 28*, el puente conectará de manera crucial los puntos cardinales de Playa del Carmen y Tulum. Su construcción tiene una importancia en la modernización y conectividad de la región, facilitando el flujo de personas y mercancías de manera eficiente y segura.

La región es considerada montañosa caracterizada por su accidentada geografía y su gran variedad de vegetación. La cueva “Garra de Jaguar”, ha sido un punto de referencia en la región, tanto por su historia como por la fauna que hay a sus alrededores, incluyendo un enigmático “jaguar” que le da su nombre. El puente, con su diseño tan robusto y su capacidad para soportar grandes cargas, no solo facilita el tránsito vehicular y peatonal, sino que también resalta la importancia de la infraestructura en la mejora de la conectividad regional.

Este puente simboliza la unión entre la modernidad y el respeto por el entorno natural. No solo facilita el tránsito, sino que también permite disfrutar de las vistas panorámicas de la región.



Figura 27. Cueva Garra de Jaguar.

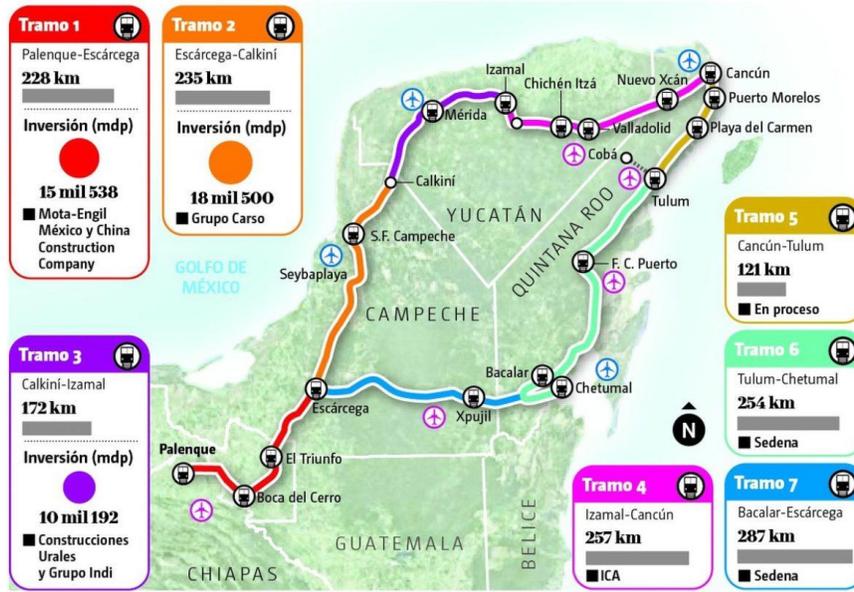


Figura 28. Red ferroviaria de Tren Maya de Tramo 1 a Tramo 7.

El sitio escogido para la construcción del “Puente Ferroviario Atirantado Garra de Jaguar” se encuentra en un terreno abierto, clasificado como categoría 2 según el Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad del año 2020, esto quiere decir, que al estar clasificado como categoría 2 indica que el diseño y la construcción de la estructura deben de tener en cuenta la posibilidad de enfrentar condiciones de viento significativas. Por lo tanto, se deben aplicar medidas adecuadas para garantizar que el puente sea capaz de resistir estas fuerzas aerodinámicas y mantener su estabilidad y funcionalidad en todo momento. La ubicación del puente no solo asegura su funcionalidad como parte integral del Tren Maya, sino que también ofrece una vista panorámica de la naturaleza que rodea la zona.

2.1 Descripción de la Estructura.

La estructura cuenta con una envergadura de 266.4 m. Contando con 7 claros en total (21.6, 21.6, 28.8, 122.4, 28.8, 21.6, 21.6). El claro principal es de 122.4 m. Se definen a cada lado tres vanos de tenida de 21.6, 21.6, 28.8 m. La estructura tiene un trazo en planta recta y con pendiente longitudinal ascendente del 0.2%. La plataforma ferroviaria se apoya sobre una losa de concreto que apoya sobre la estructura metálica con un bombeo del 2% hacia cada lado en su cara superior.

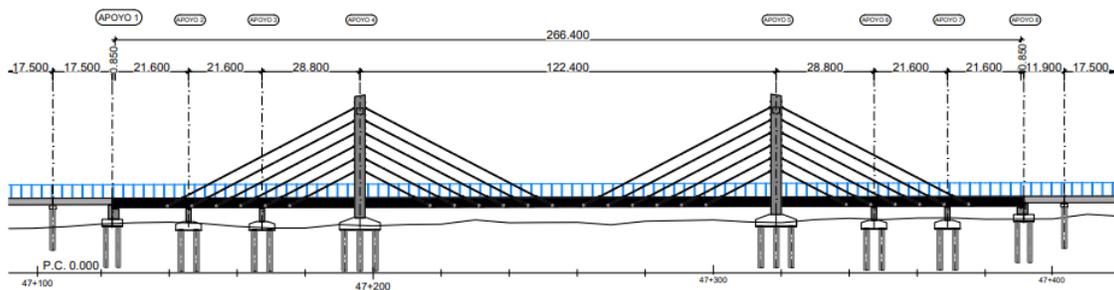


Figura 29. Plano Alzado del Puente Atirantado Garra de Jaguar.

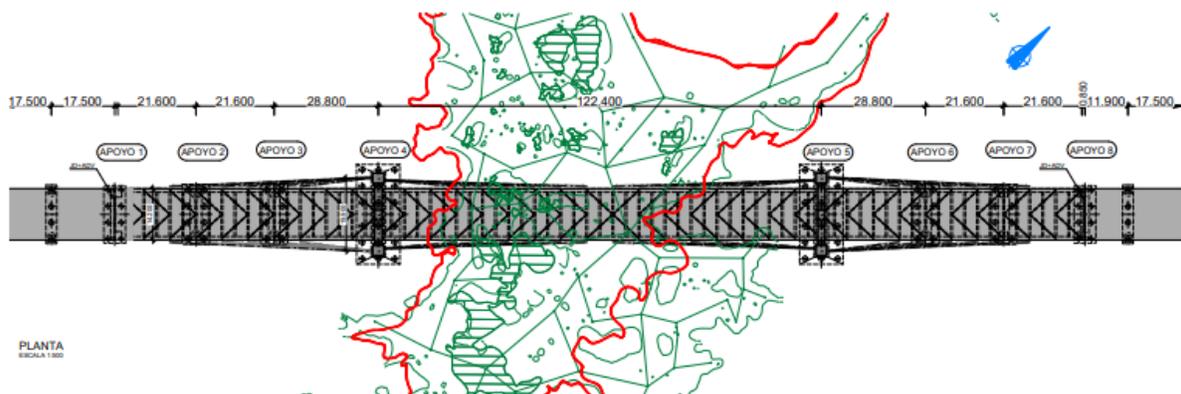


Figura 30. Plano en planta del Puente Atirantado Garra de Jaguar.

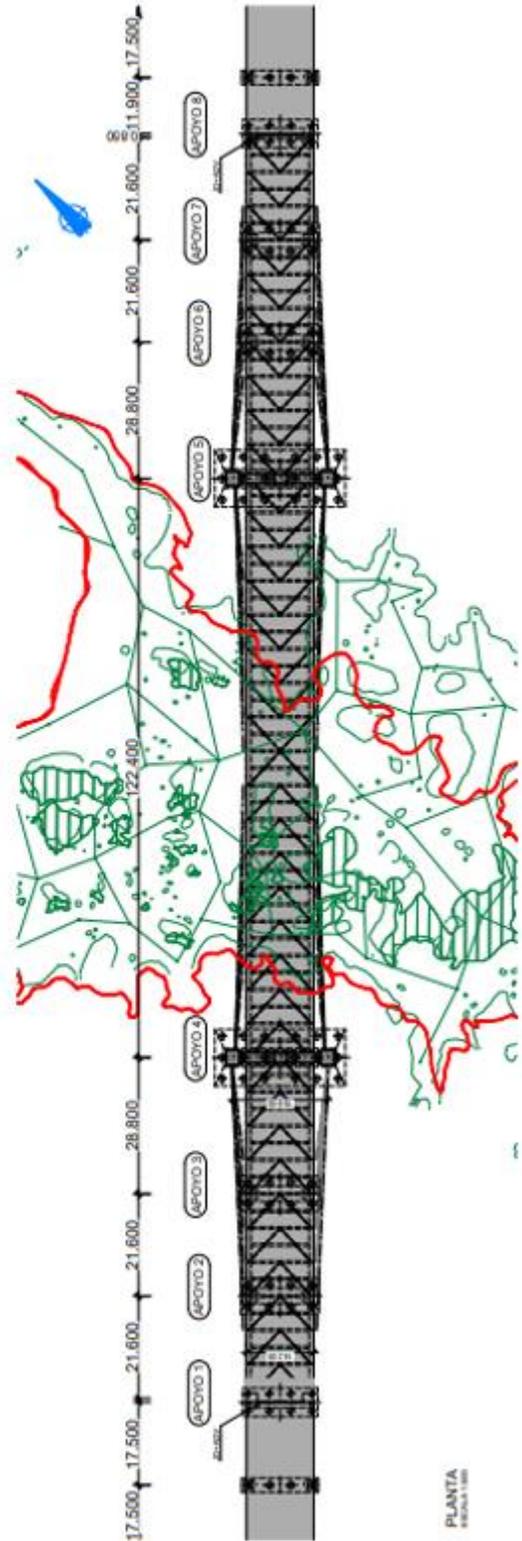
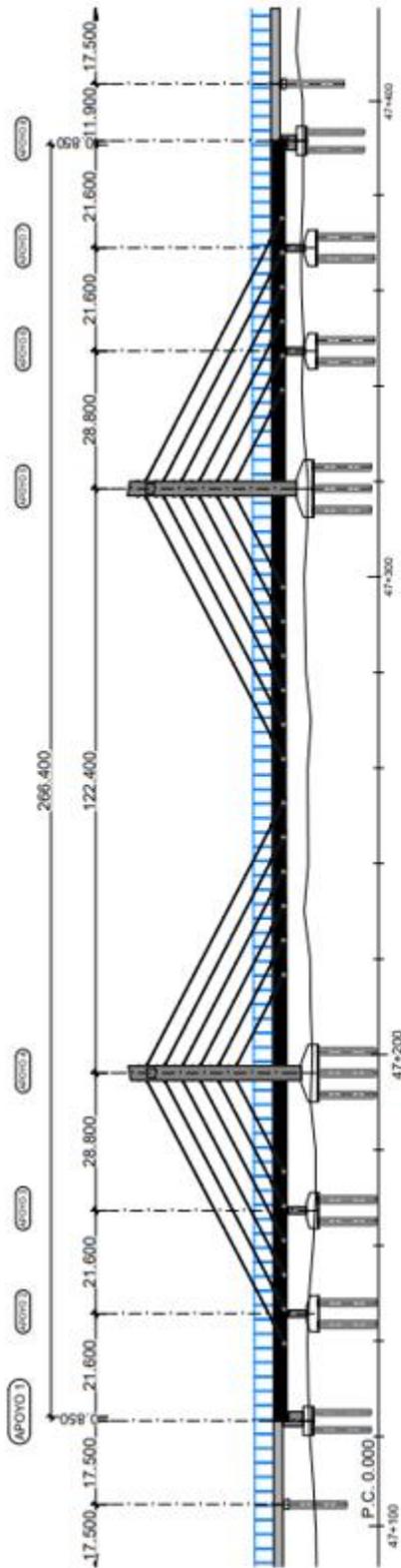


Figura 31. Plano Alzado del Puente (izquierda) Plano en planta (derecha).

En el puente de estudio se presentaron diferentes formas de vibrar. El Modo 1 se presenta en la *Figura 32* que está asociado al primer modo de vibración vertical; el Modo 2 se presenta en la *Figura 33* asociado al primer modo de torsión y a su vibración transversal; el Modo 3 de la *Figura 34* asociado al segundo modo de torsión y vibración transversal; por último, se presenta el Modo 8 de la *Figura 35* asociado al primer modo de vibración longitudinal. Estas vibraciones pueden ser pequeñas y no representar un problema, pero en ciertas condiciones, como vientos fuertes o cambios repentinos en la dirección del viento, las vibraciones pueden aumentar y entrar en resonancia con la frecuencia natural de la estructura.

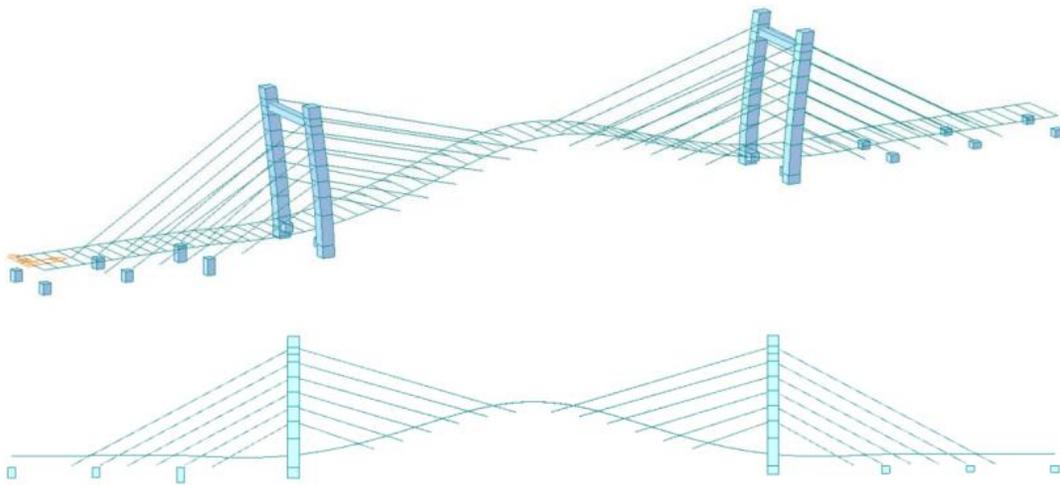


Figura 32. Modo 1 - 1° modo de vibración vertical ($f=0.892\text{Hz}$).

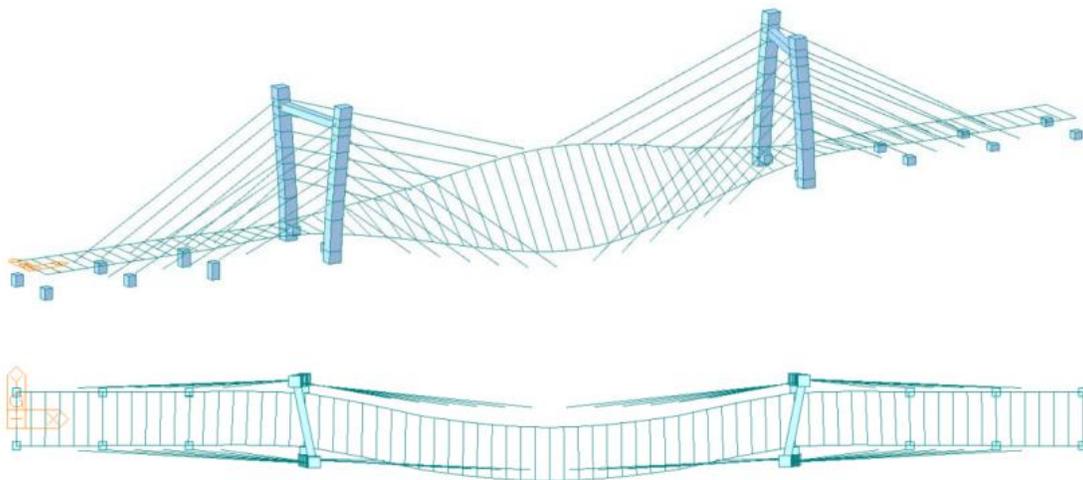


Figura 33. Modo 2 - 1° modo de torsión y vibración transversal ($f=0.984\text{Hz}$).

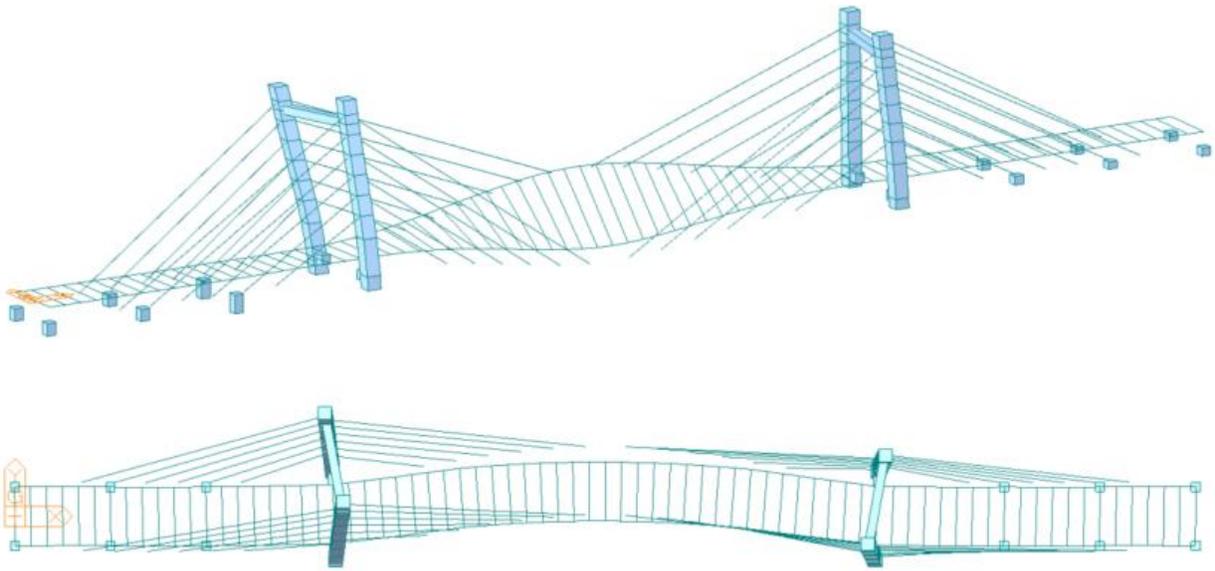


Figura 34. Modo 3 - 2º modo de torsión y vibración transversal ($f=1.234\text{Hz}$).

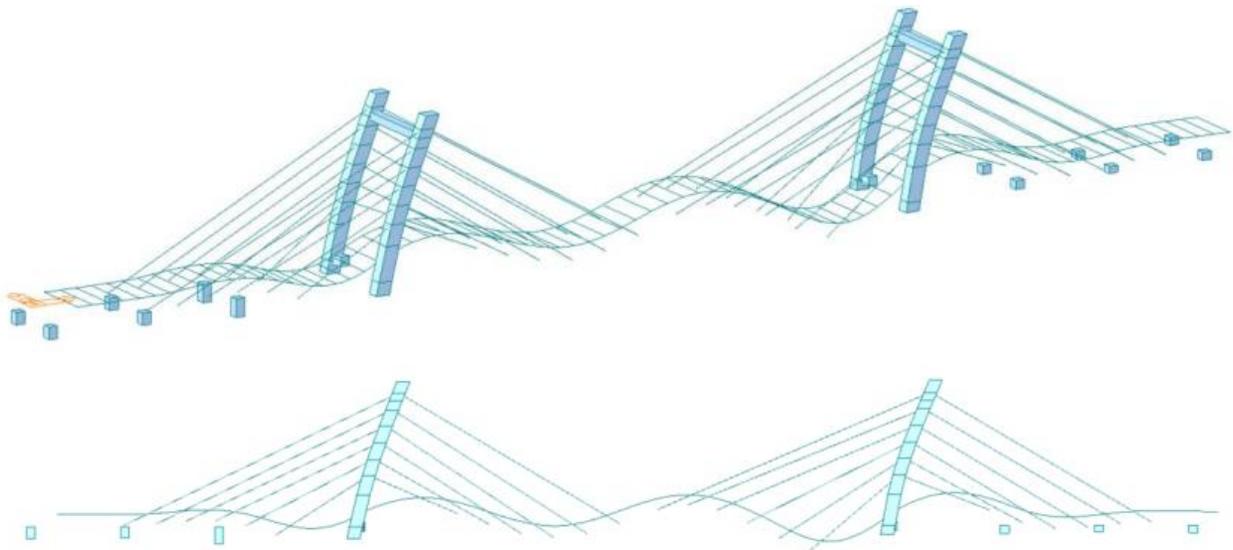


Figura 35. Modo 8 - 1º modo de vibración longitudinal ($f=2.212\text{Hz}$).

2.2 Descripción del Tablero.

La sección transversal del tablero de 14.20 m. De ancho está formada por 2 traveses metálicos longitudinales de 2.40 m. De peralte de sección en "I" dispuestas en los laterales del tablero, como se puede observar en la *Figura 36*. Entre las traveses longitudinales se definen también traveses metálicos transversales cada 3.60 metros y de 1.85 m. De peralte. La vinculación entre traveses longitudinales y transversales se definen mediante uniones atornilladas pretensadas que permite un rápido montaje en campo de la estructura metálica, Sobre esta retícula de traveses se dispone una losa superior de concreto colaborante con las misma a través de su conexión mediante pernos conectores.

La losa de concreto con una resistencia de 450 kg/cm^2 se define de 25 cm. De espesor en sus extremos y un bombeo del 2% que da lugar a un canto de 39.2 cm. En el eje del tablero.

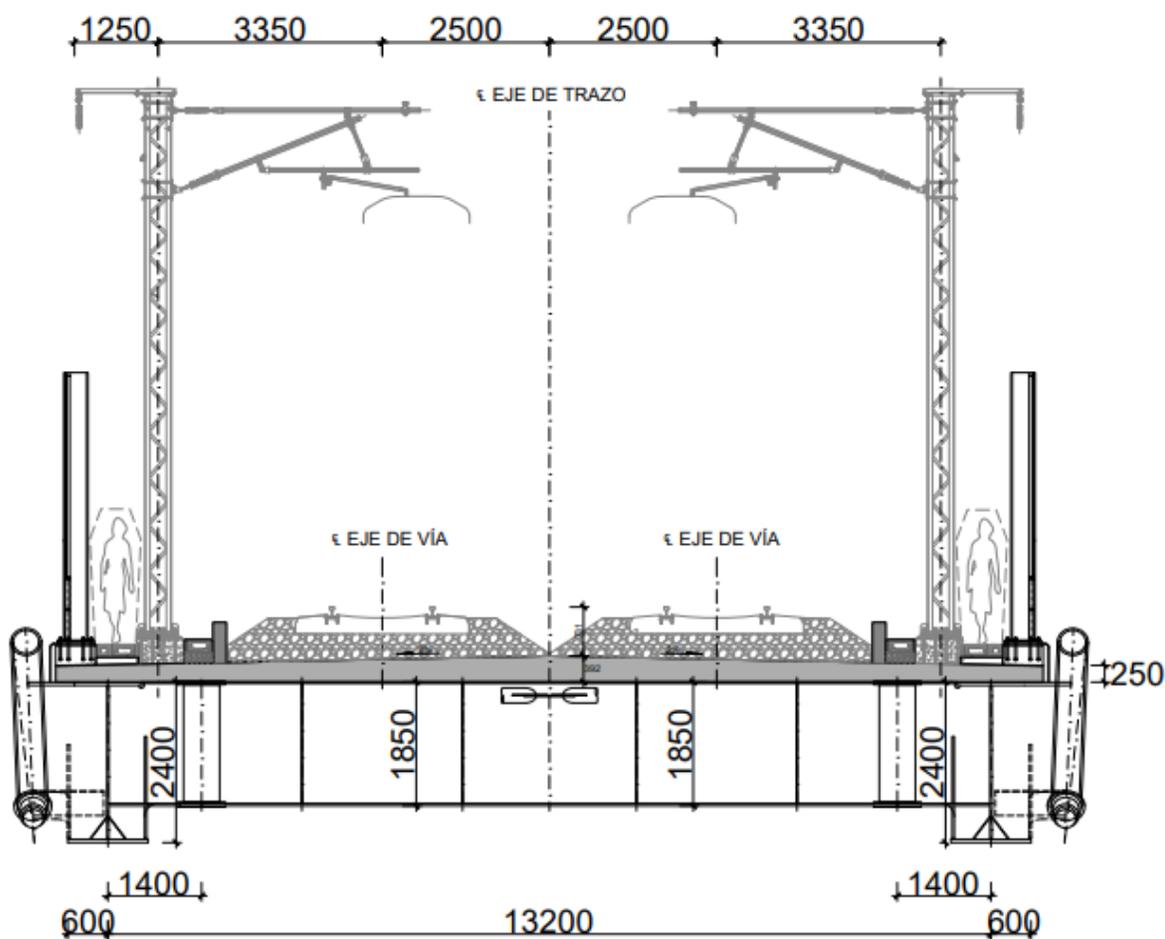


Figura 36. Sección transversal del tablero.

Las traves longitudinales de 2.40 m. De peralte se definen de patines de ancho variable, los cuales se encuentra entre 800 y 1000 mm en el patín superior y entre 1200 y 1750 mm en el patín inferior con espesores de hasta 76 mm. Las medidas se pueden observar mejor en la *Figura 37*. Las almas son de 22 a 38 mm de espesor. A lo largo del puente se varía el espesor de las placas con objeto de ajustarse a las sollicitaciones a las que están sometidas las placas.

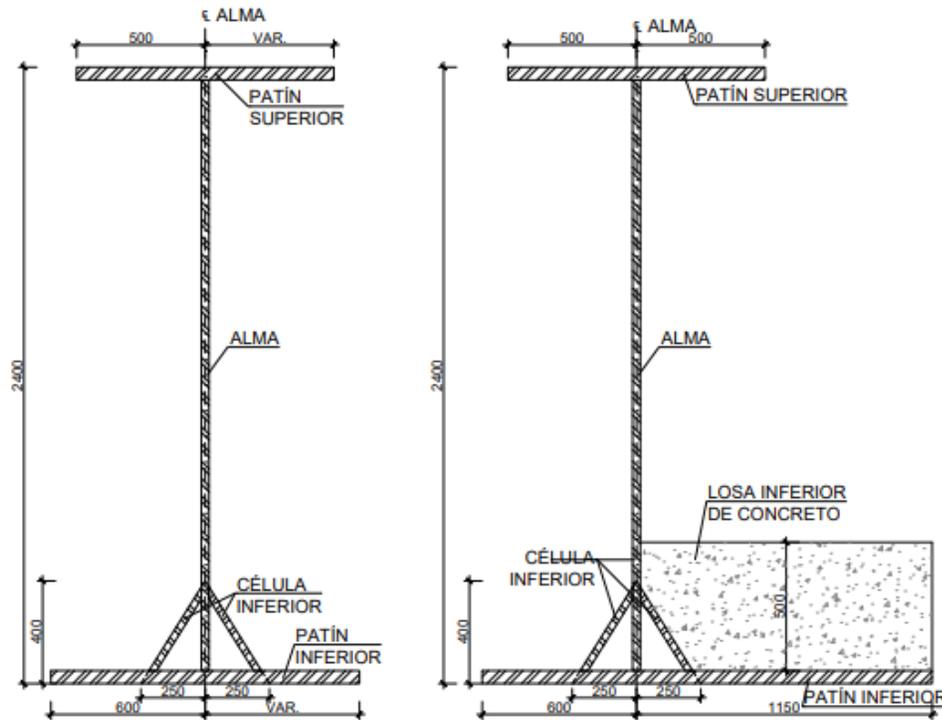


Figura 37. Traveses longitudinales, general (izq) próxima a pilono (der).

2.3 Sistema de atirantado.

El tablero se sustenta mediante dos planos de tirantes definidos a cada lado. En cada plano de tirantes se definen un total de 6 cables de 61 torones con un diámetro de 0.6" paralelos entre sí según el alzado frontal del puente. Cada plano de tirantes describe un pequeño movimiento en planta de apertura hacia el pilón el cual es inevitable para permitir que el tablero pueda ser empujado entre cada uno de los dos fustes del pilón.

Los tirantes se anclan en el tablero cada 7.20 m. Coincidiendo con la distribución de las traveses transversales. En anclaje en el tablero se realiza sobre un tubo metálico estructural que recibe la carga del tirante y lo transfiere a las traveses longitudinales a través de dos placas paralelas soldadas al tubo.

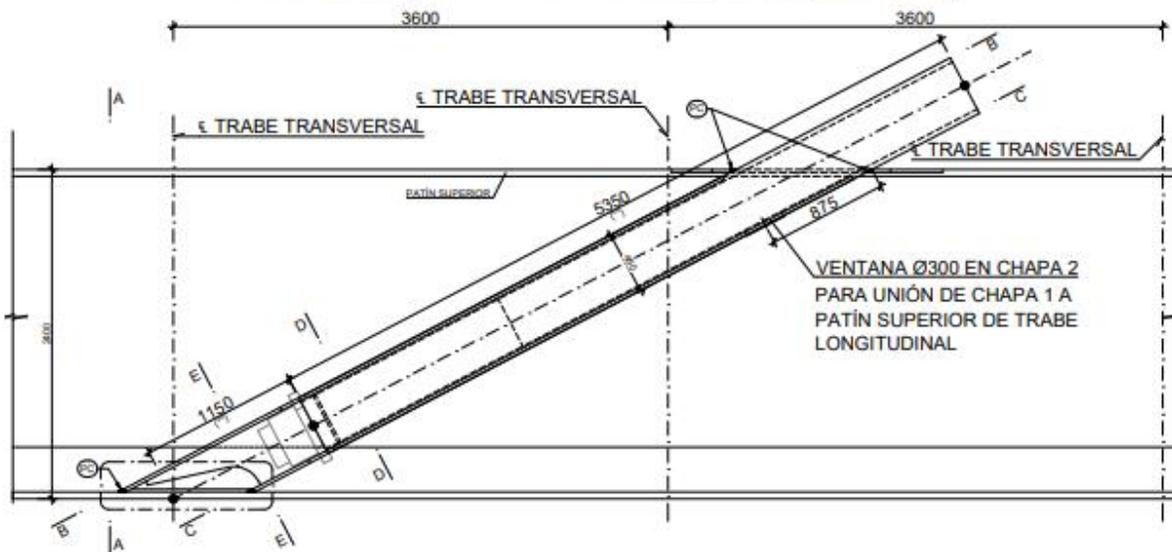


Figura 38. Anclaje de tirante en tablero.

Para mejorar la estabilidad del “Puente Ferroviario Atirantado Garra de Jaguar” se propone la instalación de pantallas estructurales. Esta propuesta surge como una medida preventiva y proactiva para garantizar la seguridad y estabilidad de la infraestructura en todas las condiciones.

La propuesta consiste en la instalación estratégica de pantallas estructurales a lo largo de ciertas secciones del puente. Estas pantallas están diseñadas para proporcionar soporte adicional y reducir la exposición del puente a fuerzas aerodinámicas, tales como las generadas por el viento.

2.4 Clima de viento.

Se llevó a cabo un análisis estadístico del viento utilizando los registros de la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto de Cancún (*Figura 39*), con el objetivo de utilizar los datos más actualizados disponibles. Esta estación ha recopilado datos de viento desde 1974, lo que la hace ideal para realizar un análisis del viento confiable.

La estación meteorológica ubicada en el Aeropuerto Internacional de Cancún (CUN) desempeña un papel importante en cuanto la información sobre el clima, debido a que es, precisa y oportuna para la aerodinámica. Se encuentra situada en uno de los destinos más turísticos de México, en la Península de Yucatán.

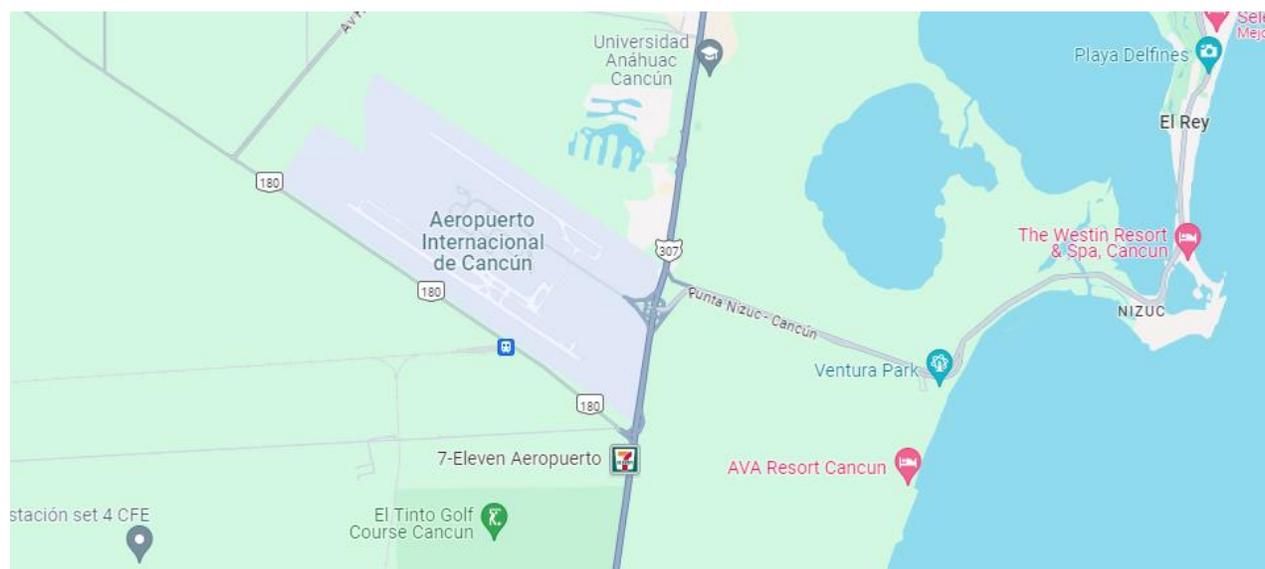


Figura 39. Localización del Aeropuerto de Cancún. Fuente: Google Maps.

El clima de viento en Cancún está influenciado por la ubicación costera de la Península de Yucatán. De acuerdo con el clima de este lugar, se presentan dos temporadas: La temporada seca (noviembre a abril) en los cuales los vientos provienen del este y noreste (vientos alisios), que consta de brisas frescas y moderadas, la velocidad del viento oscila entre 15 y 25 km/h, ayudan a mitigar el calor y mantienen la humedad en un nivel confortable. La otra temporada es la temporada de lluvias (mayo a octubre), en la que los vientos tienden

a ser más variables y fuertes, esto se debe principalmente a la influencia de los sistemas tropicales y tormentas. Estos vientos son susceptibles a cambiar de dirección y aumentar significativamente la velocidad, la velocidad del viento fácilmente llega a los 100 km/h, causando daños catastróficos en la región como lo fue el huracán Willma, tal como se aprecia en la *Figura 40*.



Figura 40. Huracán Willma que devastó a Cancún.

Las velocidades del viento se ajustan para representar mediciones a una altura de 10 metros sobre un terreno de categoría 2, es decir a campo abierto, similar al área del sitio de estudio, con un promedio de 3 segundos. En la *Figura 41* se presenta un histograma de las velocidades máximas anuales, elaborado a partir de los registros históricos y el proceso de ajuste. Con las velocidades del viento normalizadas, se llevó a cabo un análisis estadístico de valores extremos para determinar las velocidades de viento correspondientes a distintos periodos de retorno, empleando la teoría estadística de valores extremos.

En la *Tabla 1* se puede apreciar un resumen de las velocidades del viento pronosticadas con el modelo estadístico desarrollado para periodos de retorno de 10, 50 y 200 años, tal como se puede ver en el mapa de isotacas de la *Figura 42*.

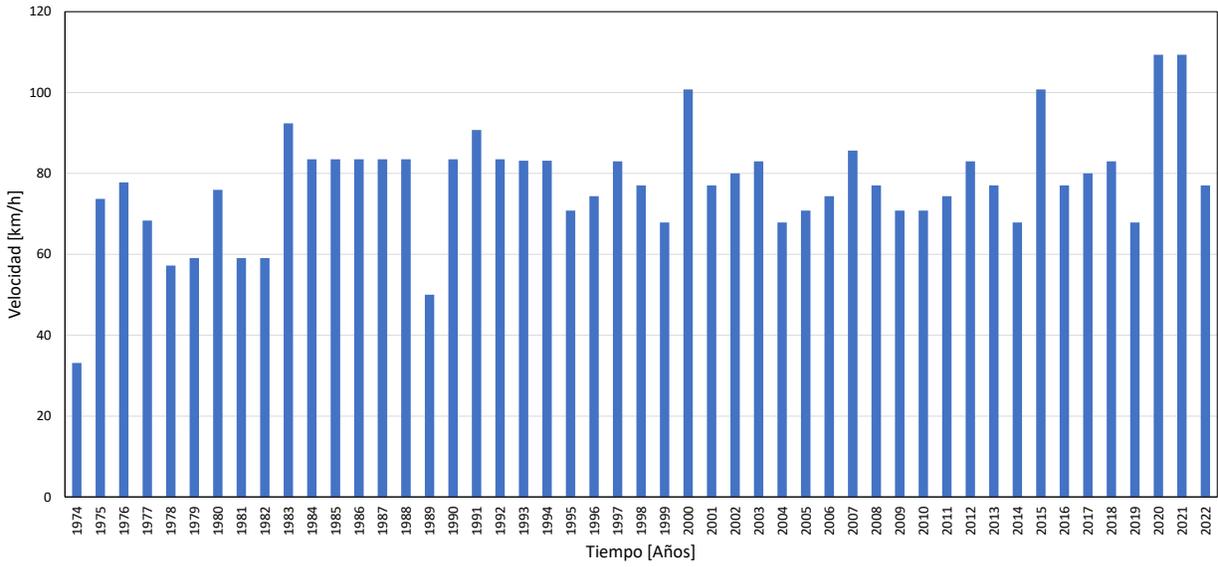


Figura 41. Histograma de velocidades máximas anuales.

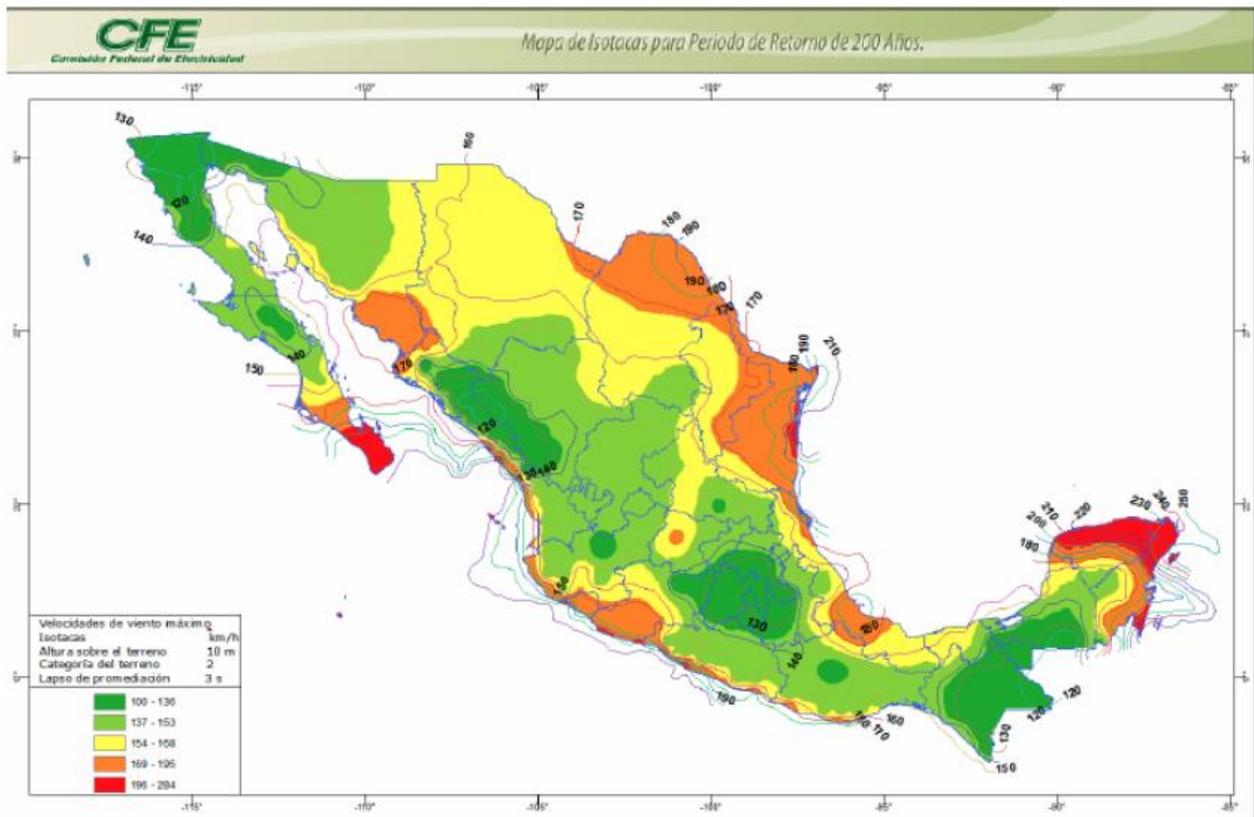


Figura 42. Mapa de isotacas para un Periodo de Retorno de 200 años (CFE, 2008).

Tabla 1. Velocidades de viento regional para diferentes periodos de retorno en km/h de acuerdo con el MOC-CFE-2020.

CIUDAD	TR - 10	TR - 50	TR - 200
CANCÚN, Q. ROO	132	196	241
COZUMEL, Q. ROO	135	199	246
PLAYA DEL CARMEN, Q. ROO	132	191	236

En la *Tabla 2* se puede apreciar que las velocidades del viento obtenidas mediante el modelo estadístico del IIUNAM son comparables a las indicadas en el MOC-CFE-2020. Esto se debe a que la estación de registro se encuentra ubicada en el mismo lugar de estudio y posiblemente se utilizó el mismo registro para elaborar el MOC-CFE-2020. Por lo tanto, dada la relevancia de la estructura, se sugiere emplear, tanto para fines de diseño como para el estudio en túnel de viento, una velocidad de referencia de 245 km/h, que equivale a 68 m/s, la cual corresponde a un periodo de retorno de 200 años.

Tabla 2. Velocidades de viento para diferentes periodos de retorno para el aeropuerto de Cancún.

Periodo de retorno [año]	Modelo IIUNAM Km/h [m/s]	MOC-CFE-2020 Km/h
10	182 [51]	131
50	216 [60]	200
200	244 [68]	245

En la *Figura 43* se observa la direccionalidad anual del viento, destacando las direcciones Sureste (SE) y Este (E). Sin embargo, para evaluar adecuadamente los efectos del viento sobre las estructuras, se aconseja llevar a cabo pruebas en túnel de viento considerando un rango completo de direcciones.

[MMUN] Cancún
 Rosa de vientos
 Límites de tiempo: 15 Mar 1999 12:00 AM – 12 May 2021 12:40 AM

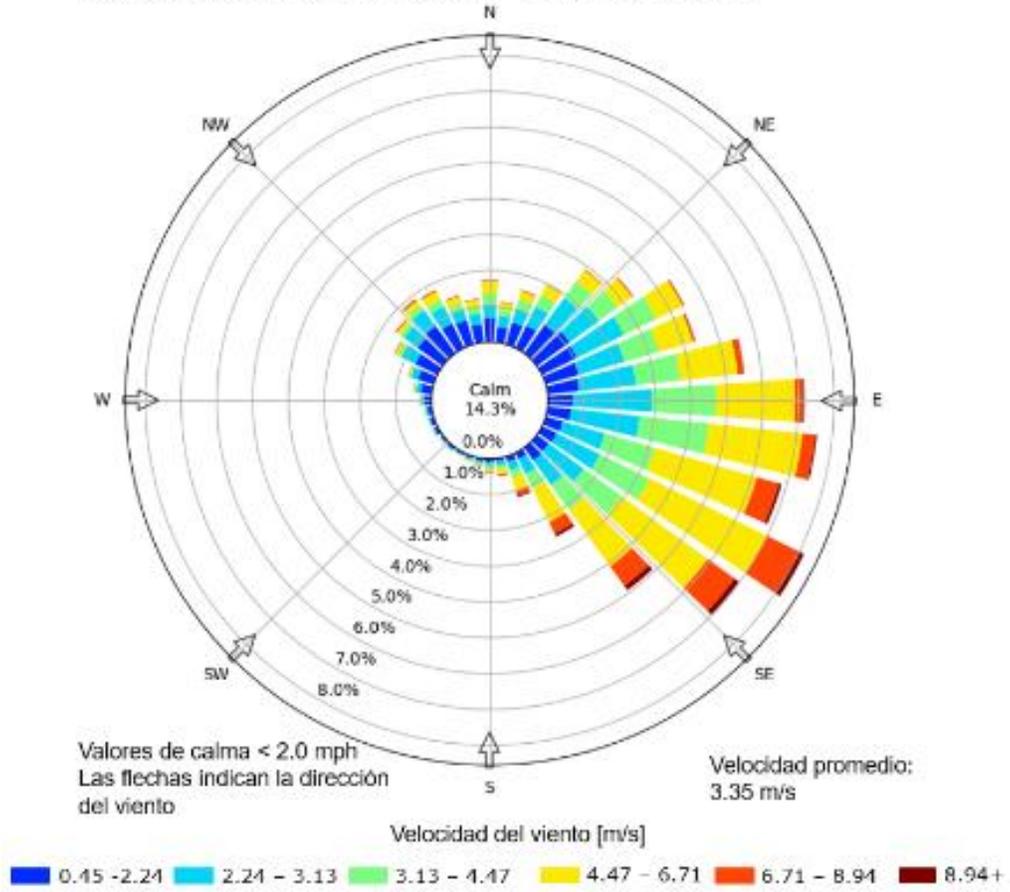


Figura 43. Rosas de viento anual para el sitio de estudio.

III. Modelo de sección del puente.

Como se mencionó anteriormente, un modelo de sección a escala es la representación transversal del tablero de un puente, se utiliza para analizar cómo se comporta esa sección en diferentes situaciones de flujo de viento.

Estas pruebas son útiles para calcular los coeficientes aerodinámicos de la sección del tablero de puente. Estos coeficientes incluyen el coeficiente de arrastre, que es la resistencia del aire sobre la superficie del puente; el coeficiente de levantamiento, que es la fuerza hacia arriba que actúan sobre el puente; y el momento de torsión, que es la tendencia del viento a girar la sección del puente.

Otro punto para destacar es que estos modelos se utilizan para estudiar los efectos de la inestabilidad que puede ser causada por el viento. Esto implica comprender cómo el viento afecta la estabilidad estructural del puente y cómo puede provocar movimientos no deseados o vibraciones. Los estudios han demostrado que el modelo de vibración más comúnmente excitado en estas secciones de puente es el modo vertical, esto significa que la sección tiende a vibrar principalmente en una dirección vertical cuando está expuesta al viento. Para la simulación de este caso en particular, el modelo de sección se suspende mediante resortes, esta suspensión tiende a que el modelo vibre libremente cuando se expone al flujo de aire simulado. Los resortes se calibran cuidadosamente para asegurar que el modelo a escala reproduzca con precisión los modos y frecuencias de vibración principales del tablero del puente real.

Para el estudio del modelo de sección del “Puente Ferroviario Atirantado Garra de Jaguar” el sistema de suspensión se implementa de tal forma que el modelo de sección a escala se encuentra asegurado mediante cuatro puntos, los cuales son resortes verticales, ubicados en las esquinas del tablero (*Figura 44* y *Figura 45*). Estos resortes verticales, permiten que el modelo se pueda mover verticalmente en respuesta a la fuerza ocasionada por el viento generado en el túnel de viento.

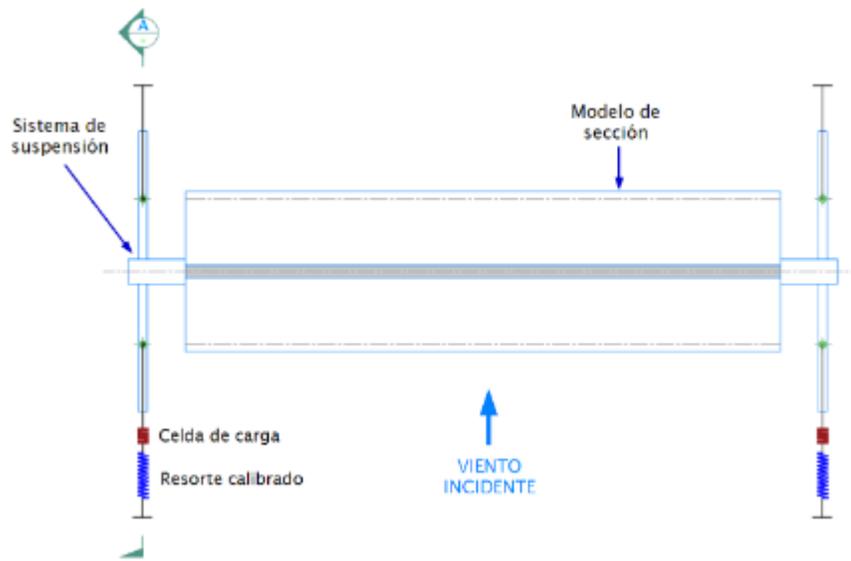


Figura 44. Representación del modelo de sección, vista en planta.

La elección de estos cuatro puntos y el uso de resortes verticales, permiten tener una distribución uniforme de las fuerzas de sujeción, lo que garantiza que el modelo esté equilibrado y se mueva de manera natural en todas las direcciones. Además, los resortes verticales permiten que el modelo responda específicamente a las fuerzas verticales, tal es el caso de las vibraciones inducidas por el viento.

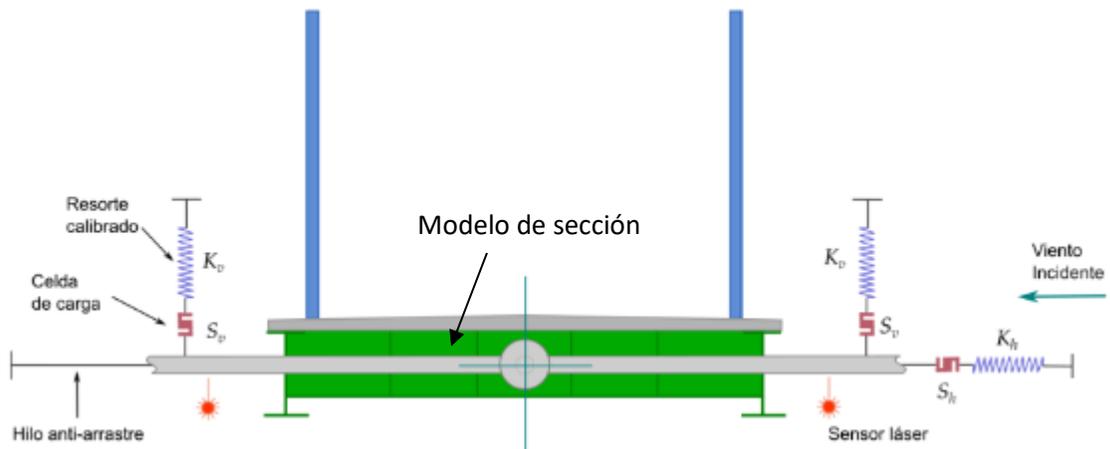


Figura 45. Puntos de sujeción del modelo y ubicación de sensores (celdas de carga y láser).

3.1 Parámetros de escala para el modelo de sección.

Los parámetros de escala son importantes en la simulación de un modelo de sección en túnel de viento para garantizar la proporcionalidad geométrica, reproducir fenómenos físicos precisamente, ser eficientes en los experimentos y facilitar la comparación con datos reales.

Para la determinación de la escala geométrica y de velocidad para la construcción del modelo de sección de la superestructura del “Puente Ferroviario Atirantado Garra de Jaguar”, según los criterios de las leyes de semejanza, la escala geométrica elegida fue de 1:20, lo que significa que las dimensiones del modelo son 20 veces más pequeñas que las del puente real. Además, se estableció una escala de velocidades de 1:4.47, lo que indica que las velocidades del viento en el túnel de viento se reducirán en una proporción de 4.47 veces en comparación con las velocidades del viento en condiciones reales. Estas escalas fueron seleccionadas específicamente para tener en cuenta las características del viento en la sección de pruebas del túnel de viento. Las dimensiones generales del modelo a escala fueron 140 cm. De longitud, 71 cm. De ancho y 15 cm. De peralte.

El proceso de cálculo y verificación de la masa, la geometría y las características finales del modelo de sección del puente, se realizó siguiendo las recomendaciones del ASCE No. 67 (1999) para pruebas en túneles de viento. Estas escalas se encuentran en la *Tabla 3*.

Tabla 3. Escalas de Froude para el modelo de sección.

Escala		Valor
<i>Escala de longitud</i>	$\lambda_L = 1/20 =$	0.05
<i>Escala de frecuencia</i>	$\lambda_\eta = \eta_{mL}/\eta_{pL} =$	4.47
<i>Escala de velocidad</i>	$\lambda_u = u_m/u_p =$	0.22
<i>Escala de tiempo</i>	$\lambda_t = \lambda_L/\lambda_u =$	0.22
<i>Escala de masa (por metro lineal)</i>	$\lambda_m = \lambda_L^2 =$	2.500E-03
<i>Momento de inercia de masa por unidad de longitud</i>	$\lambda_i = \lambda_m \lambda_L^2 =$	6.250E-06

Para ello, se utilizaron factores de escala, los que son importantes para garantizar que las propiedades físicas del modelo sean proporcionales a las del puente real. Además, se utilizaron sensores de distancia y pruebas de vibración libre para determinar las frecuencias de vibración del sistema. Los resultados de estas verificaciones se presentan en la *Tabla 4*, que muestra los parámetros finales del modelo de sección. Además, para asegurar que el flujo de aire en el túnel de viento sea bidimensional y evitar la formación de estelas de viento

no deseadas sobre el modelo, se colocan placas extremas en los extremos del modelo de sección. Estas placas actúan para condicionar el flujo de aire alrededor del modelo y garantizar que las mediciones sean precisas y representativas.

Tabla 4. Parámetros del modelo de sección.

Parámetro	Símbolo	Valor
Ancho del modelo	B	0.71m
Frecuencia para modo a flexión	n_z	4.0 Hz
Frecuencia para modo de torsión	n_α	6.24 Hz
Amortiguamiento a flexión	ζ_z	0.003
Amortiguamiento a torsión	ζ_α	-

Ya definidos los parámetros de escala para la fabricación del modelo de sección, se procedió a colocar en los extremos placas “end plates”, tal como se muestra en la *Figura 46*, que tiene como objetivo lo que se mencionó anteriormente. Las dimensiones de las placas extremas se determinaron a partir de las recomendaciones y resultados experimentales de la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2008).

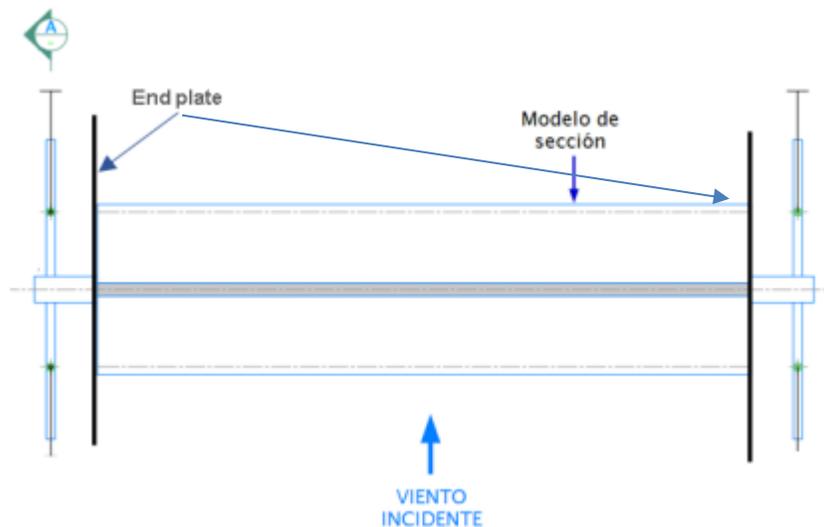


Figura 46. Vista en planta del modelo de sección con las End Plate.

Una vez instalado el modelo en el sistema de resortes, se procedió a verificar las frecuencias de vibración mediante ensayos de vibración libre. En las *Figura 47* y *Figura 48* se presenta el registro de vibración libre y el espectro de aceleraciones verticales en el dominio de las frecuencias, respectivamente.

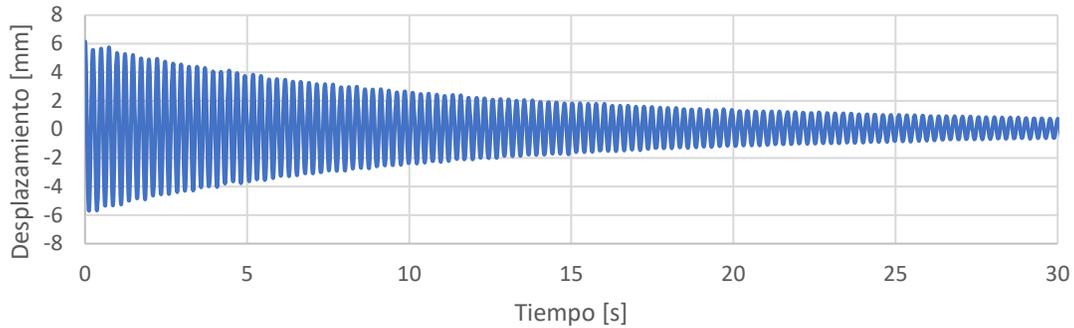


Figura 47. Registro de vibración libre del sistema Tablero-Resortes.

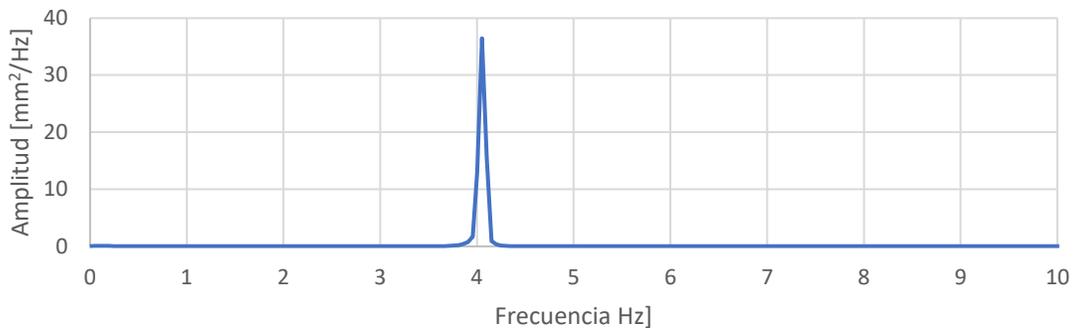


Figura 48. Espectro de aceleración vertical (vibración libre).

3.2 Fabricación del modelo.

El modelo de sección fue fabricado en un taller de corte especializado para asegurar una mayor precisión y calidad. Durante la construcción, se utilizaron materiales que permiten obtener un modelo rígido y que representan con exactitud la geometría de los elementos del tablero a la escala seleccionada. Con este propósito, se emplearon vigas tipo cajón y diafragmas internos de soporte elaborados con lámina de acero (*Figura 49*), las cuales fueron soldadas para unir las piezas del tablero, como se muestra en la *Figura 50*. Además, se aplicó silicón caliente en todos los bordes angulosos y uniones del modelo para evitar perturbaciones en el flujo de viento que pudiera afectar los resultados.



Figura 49. Diafragmas internos de soporte de lámina de acero (IIUNAM).



Figura 50. Modelo de sección del puente Garra de Jaguar (IIUNAM).

La primera parte del estudio se llevó a cabo durante la fase constructiva del puente, enfocándose exclusivamente en la sección del tablero, [Figura 51](#). Mientras que, en la etapa de servicio, se añadieron pantallas acústicas fabricadas con acrílico, y los postes de soporte de estas pantallas fueron manufacturados con piezas de aluminio. Estos postes fueron fijados en las partes laterales del tablero, como se observa en las Ilustración [Figura 52](#).



Figura 51. Tablero del puente Garra de Jaguar sin pantallas acústicas.



Figura 52. Tablero del puente Garra de Jaguar con pantallas acústicas.

3.3 Instrumentación.

La instrumentación electrónica se utiliza para registrar todas las variables necesarias en el estudio, incluyendo fuerzas, desplazamientos, aceleraciones y otras reacciones generadas en el modelo a escala del puente debido al flujo de viento incidente. Para este proyecto, se implementó una interfaz controlada por computadora que permite visualizar diversos datos de inclinación, distancia y fuerza registrados, con una frecuencia de muestreo de hasta 1 kHz.

Se emplearon diferentes módulos de National Instruments (NI), destacando el uso de un Compact RIO como administrador electrónico de los módulos de adquisición, alimentación y red inalámbrica. Para el control de estos dispositivos, se utilizó LabVIEW como lenguaje de programación. Esta configuración asegura la precisión y la eficiencia en la recopilación y el análisis de los datos obtenidos durante las pruebas.

3.3.1 Equipos de comunicación, registro y almacenamiento.

Compact RIO NI-9014:

La plataforma Compact RIO de National Instruments cuenta con una variedad de controladores embebidos, diseñados para cumplir con dos objetivos de procesamiento esenciales: (1) un procesador en tiempo real dedicado a la comunicación y al procesamiento de señales, y (2) una FPGA programable por el usuario, que permite la implementación de control de alta velocidad, temporización y disparo personalizados directamente en el hardware.

De manera general, el Compact RIO funciona como el administrador central de los módulos de instrumentación. Estos módulos son responsables de adquirir las señales de los sensores, facilitando su visualización y/o manipulación. Esta arquitectura permite un control preciso y eficiente de las señales, optimizando el análisis y la interpretación de los datos recogidos en diversas aplicaciones técnicas y científicas.



Figura 53. Plataforma Compact RIO NI-9014.

Fuente de poder:

Este dispositivo es una fuente de alimentación diseñada específicamente para los sistemas Compact RIO. Admite una entrada de 15 a 230 Vac en una fase y proporciona una salida de 24 a 28 Vdc a 5^a, con una potencia de salida de 120W. Funciona eficientemente en un rango de temperatura de -25 a 60°C. Además, cuenta con terminales de tornillo de abrazadera que

facilitan la conexión entre el Compact RIO y la fuente de alimentación, asegurando una conexión segura y confiable para el correcto funcionamiento de los dispositivos.



Figura 54. Fuente de poder.

Módulos de instrumentación para celda de carga:

Este módulo de entrada analógica está diseñado para cuartos, medios o puentes completos de Whatstone, con un rango de ± 25 mV. Puede muestrear hasta 50,000 datos por segundo en cada canal, ofreciendo una resolución de 24 bits. Gracias a este módulo, es posible obtener con alta precisión las señales de esfuerzo provenientes de las celdas de carga, permitiendo un análisis detallado y exacto de las mediciones de fuerza.

Módulo de adquisición analógica:

Este módulo de adquisición cuenta con 32 canales o 16 canales diferenciales, permitiendo una velocidad de muestreo de 250 Hz. Ofrece intervalos de medida programables de ± 200 mVdc, ± 1 mVdc, ± 5 mVdc y ± 10 mVdc, operando eficientemente en un rango de temperatura de -40 a 70°C . Su convertidor analógico-digital tiene una resolución de 16 bits, lo que garantiza una alta precisión en la captura y el procesamiento de datos analógicos.

3.3.2 Sensores.

Para capturar la respuesta del modelo, se emplean dos tipos diferentes de sensores: celdas de carga para medir fuerzas y sensores láser para medir desplazamientos. Estos sensores se colocan en diversas posiciones en el modelo, dependiendo del tipo de prueba a realizar. Además, pueden utilizarse simultáneamente o en diferentes combinaciones, según las necesidades del experimento. A continuación, se describen las características más importantes de estos sensores.

Celda de carga:

Una celda de carga es un transductor utilizado para convertir una fuerza en una señal eléctrica.



Figura 55. Celda de carga.

Sensor de distancia:

El sensor de distancia, también conocido como distanciómetro, es un instrumento electrónico de medición que calcula la distancia desde el dispositivo hasta el punto objetivo. En este estudio, se utiliza un sensor de distancia láser de la marca KEYENCE, con una sensibilidad en el rango de micrómetros, proporcionando la resolución necesaria para registrar con precisión los desplazamientos durante las pruebas.



Figura 56. Sensor de distancia.

Hilo Caliente:

La velocidad de referencia del viento aguas arriba se midió a la altura del modelo utilizando un anemómetro de hilo caliente.

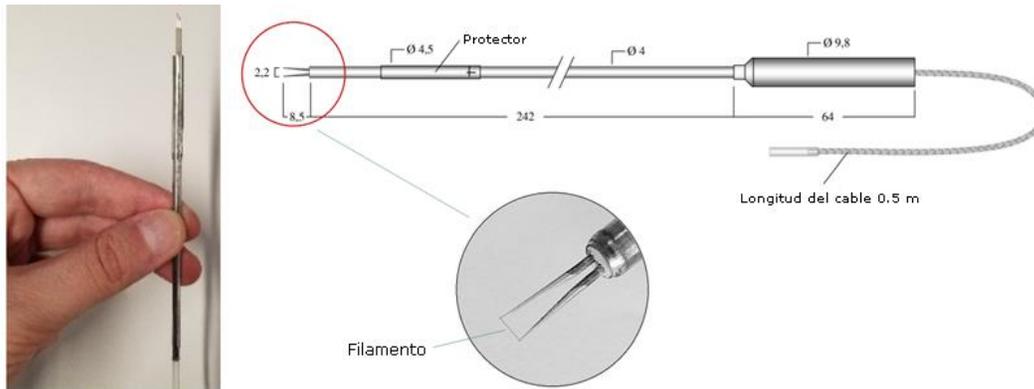


Figura 57. Sensor de hilo caliente.

3.4 Metodología para las pruebas.

La metodología utilizada en las pruebas realizadas, tienen dos objetivos principales:

- Determinar las velocidades críticas asociadas a posibles inestabilidades del tablero del puente.
- Conocer los coeficientes aerodinámicos de la sección del tablero.

La metodología llevada a cabo consiste en los siguientes puntos:

1. El modelo de sección se coloca en el túnel del viento con el ángulo de incidencia del viento deseado.
2. Se permite el movimiento del grado de libertad que se está estudiando, como el de arrastre, levantamiento o torsión. Si se está verificando la inestabilidad, los grados de flexión y torsión están libres simultáneamente para investigar la respuesta acoplada.
3. Se hace fluir el viento a través del modelo hasta alcanzar la velocidad de diseño.
4. Se registran las fuerzas y desplazamientos en secciones predefinidas del modelo.
5. Se calculan los coeficientes aerodinámicos estáticos y se estiman las velocidades críticas.

Estos pasos se repiten para diferentes ángulos de incidencia del viento, considerando estos ángulos y la velocidad del viento como parámetros de control.

Para el estudio de la sección del tablero del puente en el túnel de viento, se consideraron vientos con diferentes características de turbulencia: un viento con poca turbulencia, denominado “viento suave” (con una intensidad de turbulencia menor al 1%), para identificar posibles inestabilidades del modelo, y un viento con flujo turbulento (con una intensidad de turbulencia mayor al 5%), para representar de manera más realista las condiciones del sitio y observar el efecto de las ráfagas del viento sobre el puente (buffeting).

La generación de la turbulencia en las pruebas del túnel se realizó utilizando un generador pasivo diseñado específicamente para este propósito (Laws y Livesey, 1978).

3.4.1 Pruebas de estabilidad del tablero.

Para las pruebas de estabilidad a torsión, el modelo se asegura verticalmente con un cable de acero para permitir únicamente modos de torsión. En el caso de las pruebas de flexión, el modelo se restringe exclusivamente a este efecto. En ambas pruebas, se asegura horizontalmente el modelo para prevenir deslizamientos cuando está expuesto a las fuerzas de empuje o arrastre del viento.

Para el registro de desplazamiento durante las pruebas en el túnel de viento, el proceso llevado a cabo fue que a medida que se incrementa la velocidad del viento en pequeños intervalos, se registran los desplazamientos del modelo para identificar cualquier indicio de inestabilidad. Durante estas pruebas, se investigaron tres ángulos de incidencia diferentes: -6° , 0° y 6° . En este contexto, los ángulos negativos indican que el viento está descendiendo sobre el tablero del puente, mientras que los ángulos positivos indican que el viento está ascendiendo hacia el tablero del puente.

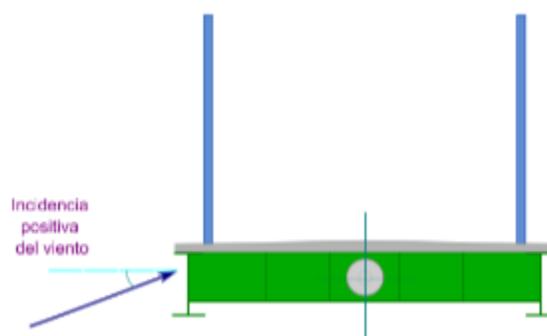


Figura 58. Ángulo de incidencia del viento en el modelo de sección del tablero del puente.

Para medir los desplazamientos durante las pruebas en el túnel de viento, se utilizan sensores tipo láser con el objetivo de garantizar que los movimientos del modelo no se vean afectados por la presencia de los propios sensores. Durante las pruebas, se registran todas las señales provenientes de estos sensores a una frecuencia de 100 Hz (100 mediciones por segundo) durante un periodo de 90 s. Posteriormente, se realiza un análisis estadístico de estos datos para obtener varios valores importantes, incluyendo los desplazamientos máximos, mínimos, la media y la desviación estándar.

El análisis estadístico proporciona una comprensión más completa de la variabilidad de los desplazamientos del modelo durante el periodo de prueba. Los valores máximos y mínimos ayudan a identificar los extremos del movimiento, mientras que la media y la desviación estándar (RMS) proporcionan información sobre la tendencia general y la dispersión de los datos. Este enfoque permite una evaluación detallada y precisa del comportamiento del modelo bajo las condiciones de prueba específicas.

3.4.2 Pruebas de coeficientes aerodinámicos medios.

Los coeficientes aerodinámicos medios de la sección del puente representan la relación entre las fuerzas aerodinámicas y otras variables como el área frontal del puente y la densidad del aire. Para medir estas fuerzas, se utilizan celdas de carga, que son dispositivos diseñados para registrar fuerzas aplicadas sobre ellas. Para nuestro caso, estas celdas de carga se emplean para medir las fuerzas que el viento ejerce sobre la sección del puente mientras se encuentra en el túnel de viento.

Las fuerzas que se registran son:

- Fuerza de arrastre (F_x): Esta es la fuerza que actúa en la dirección del flujo del viento y representa la resistencia que el viento ejerce sobre la sección del puente.
- Fuerza de sustentación (F_y): Esta es la fuerza perpendicular al flujo del viento y representa la capacidad del viento para levantar o sustentar la sección del puente.
- Momento de torsión (M_z): Este es un tipo de fuerza que actúa para girar la sección del puente alrededor de un punto específico. En este contexto, se refiere al momento causado por la fuerza del viento que actúa sobre la sección.

Mediante la medición de estas fuerzas con las celdas de carga, es posible calcular los coeficientes aerodinámicos medios de la sección del puente, lo que proporciona información valiosa para comprender cómo el viento interactúa con el tablero del puente y cómo se asegurar que la estructura sea segura y eficiente aerodinámicamente.

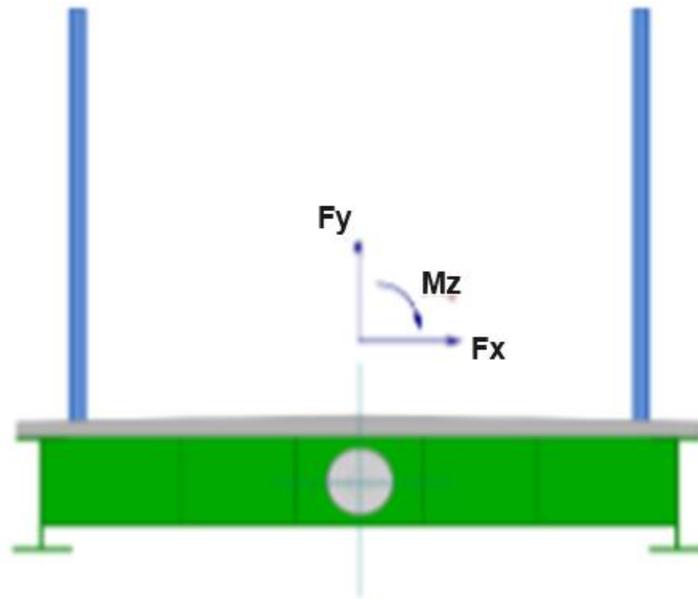


Figura 59. Dirección y sentido de las fuerzas aerodinámicas del tablero del puente.

Los coeficientes aerodinámicos estáticos se obtienen a partir de las fuerzas medidas con las celdas de carga (Fuerza de arrastre, Fuerza de levantamiento y Momento de torsión), estos coeficientes son parámetros importantes que describen la interacción entre el viento y la sección del puente.

- Coeficiente de arrastre (C_D): Este coeficiente indica la resistencia aerodinámica experimentada por la sección del puente en la dirección del flujo de aire.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho u^2 BL}$$

- Coeficiente de sustentación (C_L): Este coeficiente indica la fuerza vertical que actúa sobre la sección del puente perpendicular al flujo de aire.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho u^2 BL}$$

- Coeficiente de momento (C_M): Este coeficiente indica la tendencia de la sección del puente a girar alrededor de un punto específico debido a la fuerza del viento.

$$C_M = \frac{M}{\frac{1}{2}\rho u^2 B^2 L}$$

Donde:

$\frac{1}{2}\rho\overline{U^2}$ es la presión dinámica

B es el ancho del tablero del modelo (0.71 m), correspondiente a 14.2 m de escala real

L es la longitud del modelo igual a 1.40 m

Todos estos estudios se analizan a los ángulos de incidencia de -9° , -6° , -3° , -1.5° , 0° , 1.5° , 3° , 6° , 9° .

IV. Túnel de viento de capa límite atmosférica de la

UNAM.

El túnel cuenta con un circuito de retorno simple, secciones de alta y baja velocidad, dos mesas giratorias y el flujo de viento puede llegar a una velocidad máxima de 80 km/h. Permite realizar una gran diversidad de pruebas relacionadas a la ingeniería civil, arquitectura y meteorología, como la determinación de cargas del viento sobre la estructura, la simulación de ciclones y estudios de contaminación atmosférica.

Para llevar a cabo pruebas en el túnel de viento IIUNAM de manera precisa y confiable es esencial realizar un análisis estadístico del viento para comprender la distribución y las características de las velocidades del viento en la ubicación específica del estudio. Este análisis se basa en datos recopilados de estaciones meteorológicas cercanas al sitio en estudio, que registran información sobre la velocidad y la dirección del viento a lo largo del tiempo.

Para este caso en específico, se realizó un análisis estadístico del viento utilizando registros de una estación meteorológica ubicada en el aeropuerto de Cancún. Estos registros proporcionaron datos históricos sobre el comportamiento del viento en la región desde el año 1974. Utilizando esta información, se pudo realizar un análisis detallado para comprender las características del viento en la zona de estudio.

Los resultados de este análisis estadístico se compararon con las recomendaciones del Manual de Diseño de Obras Civiles de la Comisión Federal de Electricidad (MOC-CFE-2020) en el capítulo de Diseño por Viento. Esta comparación permitió evaluar la validez y la aplicabilidad de los datos obtenidos de la estación meteorológica para el diseño de estructuras y la realización de pruebas en túnel de viento.

Tabla 5. Velocidades de viento para diferentes periodos de retorno para el aeropuerto de Cancún.

Periodo de retorno [año]	Modelo IIUNAM km/h [m/s]	MOC-CFE-2020 [km/h]
10	182 [51]	131
50	216 [60]	200
200	244 [68]	245

En la *Tabla 5*, se observa que las velocidades del viento obtenidas a partir del análisis estadístico son consistentes con las recomendaciones del MOC-CFE-2020. Esto sugiere que los datos recopilados de las estaciones meteorológicas son representativos y pueden utilizarse con confianza para fines de diseño y análisis en el túnel de viento.

Dada la importancia de la estructura en estudio, se recomienda utilizar una velocidad de referencia de 245 km/h (68 m/s), que corresponde a un periodo de retorno de 200 años. Esta velocidad proporciona un margen de seguridad adecuado para garantizar la resistencia y estabilidad de la estructura frente a condiciones extremas de viento.

4.1 Prueba de viento “suave”.

El viento suave o viento a flujo constante, es aquel que no varía con el tiempo. Este tipo de pruebas se realiza en instalaciones especializadas que simulan las condiciones del flujo de aire alrededor del tablero del puente.

En el túnel de viento a flujo constante, el aire se mueve a una velocidad uniforme y controlada a través de un modelo de sección que simula el tablero del puente. Este flujo constante permite a través de pruebas obtener datos precisos sobre las fuerzas y momentos aerodinámicos que actúan sobre el tablero del puente. Los usos para este tipo de pruebas por lo general son:

- Evaluación del rendimiento aerodinámico
- Reducción de la resistencia del viento
- Mejora de la estabilidad
- Control de objetos en diferentes condiciones de flujo

Durante estas pruebas se utilizan herramientas que son útiles para medir las variables aerodinámicas, tal es el caso, de los sensores de presión.

De igual forma suelen utilizarse para validar modelos computacionales y mejorar diseños antes de la construcción de estos modelos.

4.2 Prueba de viento “Turbulento”.

Por otro lado, el viento turbulento se caracteriza por cambios rápidos y aleatorios en la velocidad y la dirección del viento, así como por la presencia de vórtices y remolinos en el

flujo de aire. Estos cambios turbulentos crean una dinámica compleja que puede ser desafiante de predecir y modelar con precisión.

En el contexto de las pruebas en túnel de viento, el viento turbulento presenta desafíos significativos. En un túnel de viento, donde se simulan condiciones de viento para evaluar el comportamiento aerodinámico de estructuras, el viento turbulento puede provocar fluctuaciones en el flujo de aire, lo que dificulta la generación de un flujo estable y uniforme alrededor del modelo en pruebas. Esta falta de consistencia en el flujo puede afectar la precisión y la reproducibilidad de las pruebas, así como la interpretación de los resultados obtenidos. Para que se presente el viento turbulento se diseñó una malla como la que se muestra en la *Figura 60*. Esta se encuentra ubicada a 3 m. Aguas arriba del modelo de sección. Con una intensidad de turbulencia del 5.6%.

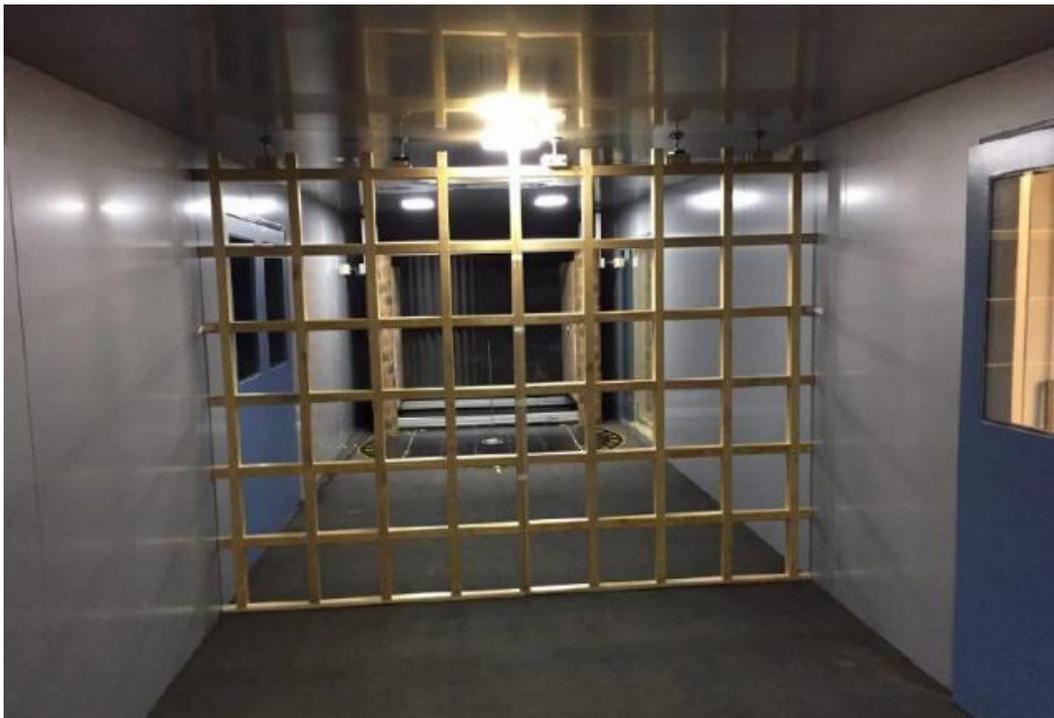


Figura 60. Generador pasivo de turbulencia.

V. Resultados.

En el presente capítulo se analiza la respuesta del puente ante el flujo de viento “suave” y turbulento. Se evaluaron dos configuraciones del puente:

- Fase de construcción (sin pantallas acústicas)
- Fase de servicio (con pantallas acústicas)

Inicialmente, se exponen los resultados de la evaluación de la estabilidad y las velocidades críticas del viento. Posteriormente, se detallan los coeficientes aerodinámicos estáticos para la sección transversal del puente.

Los resultados del análisis de estabilidad se presentan mediante gráficas que muestran el desplazamiento y la velocidad media del viento, ambas a escala completa. Se incluyen gráficas separadas para el desplazamiento vertical (modo de flexión) y el desplazamiento rotacional (modo de torsión). Además, se ilustran los coeficientes aerodinámicos en función del ángulo de incidencia del viento.

5.1 En fase de construcción (sin pantallas acústicas).

En fase constructiva, es decir, sin presencia de pantallas acústicas, en la *Figura 61* y *Figura 62* se ilustran las respuestas del puente en flexión y en torsión, respectivamente, bajo condiciones de viento a flujo “suave”. Por otro lado, la *Figura 63* y *Figura 64* presentan las respuestas del puente en flexión y torsión bajo condiciones del viento a flujo turbulento.

5.1.1 Viento suave.

En la *Figura 61*, se observa un desprendimiento de vórtices a velocidades del viento que oscila entre los 22 m/s, independientemente del ángulo de incidencia. Además, la misma gráfica muestra que, a pesar de este desprendimiento, no se presentan inestabilidades de flexión en ninguno de los ángulos considerados, incluso a velocidades altas del viento.

Por otro lado, no se observan inestabilidades en el modo de torsión. La *Figura 62* muestra que el incremento de los desplazamientos es mínimo y que la gráfica tiende a ser horizontal. Esto era previsible, dada la capacidad y rigidez a torsión del tablero observada en las frecuencias de vibración del modelo numérico.

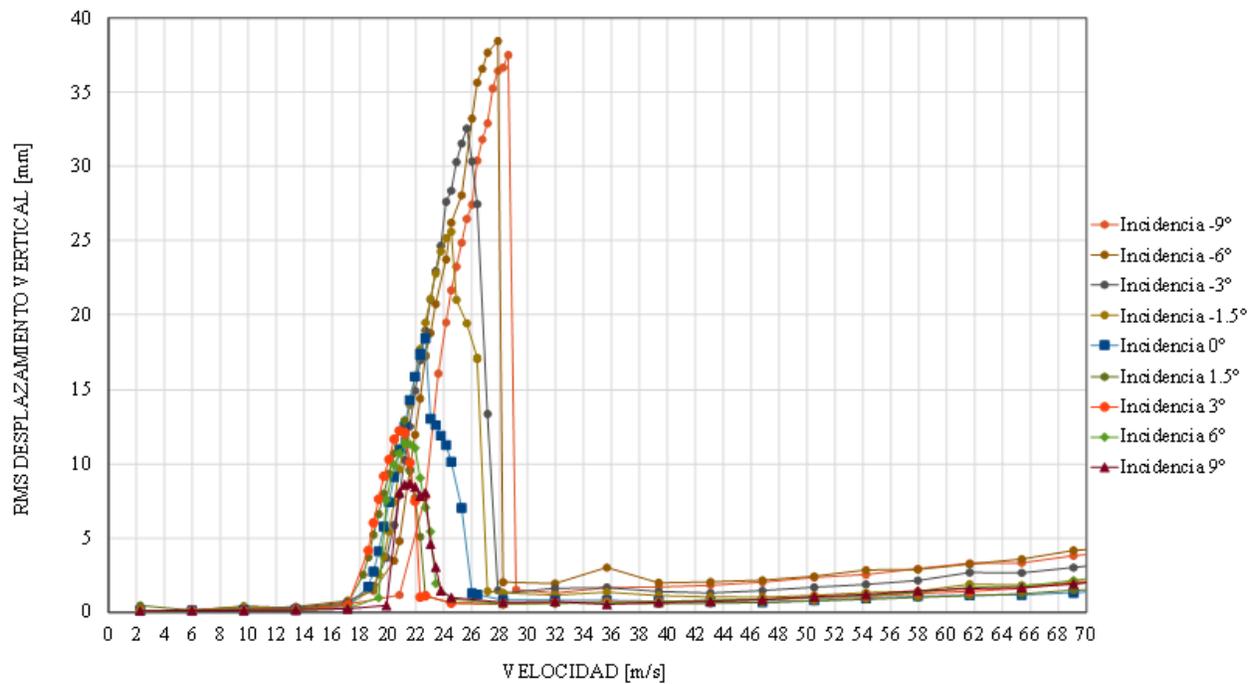


Figura 61. Gráfica de sección en fase constructiva, viento "suave", desplazamiento vertical a flexión.

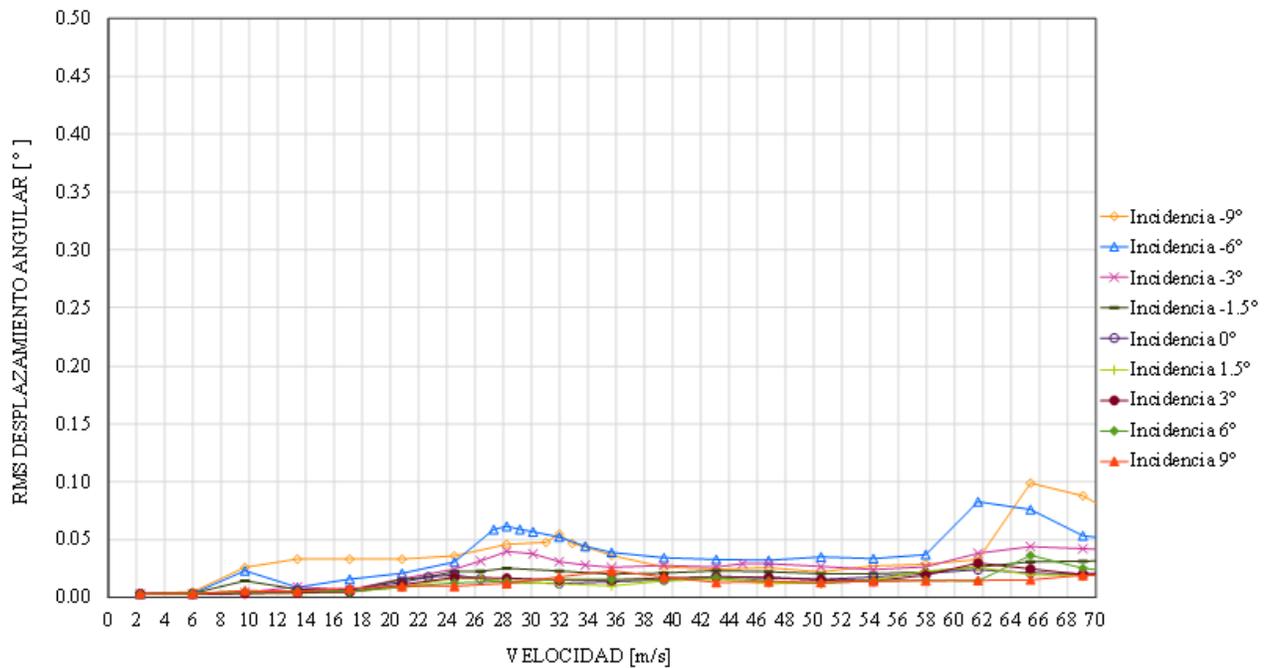


Figura 62. Gráfica de sección en fase constructiva, viento "suave", desplazamiento de torsión.

5.1.2 Viento turbulento.

En lo que respecta a la respuesta del modelo en condiciones de flujo turbulento, la *Figura 63* muestra que para los ángulos de incidencia negativos se produce el desprendimiento de vórtices, similar a lo observado en condiciones de viento suave. No se observan inestabilidades a velocidades altas del viento, incluso considerando condiciones de viento turbulento.

La respuesta a torsión del tablero en condiciones de flujo turbulento, como se observa en la *Figura 64*, es similar a la observada en caso de viento suave.

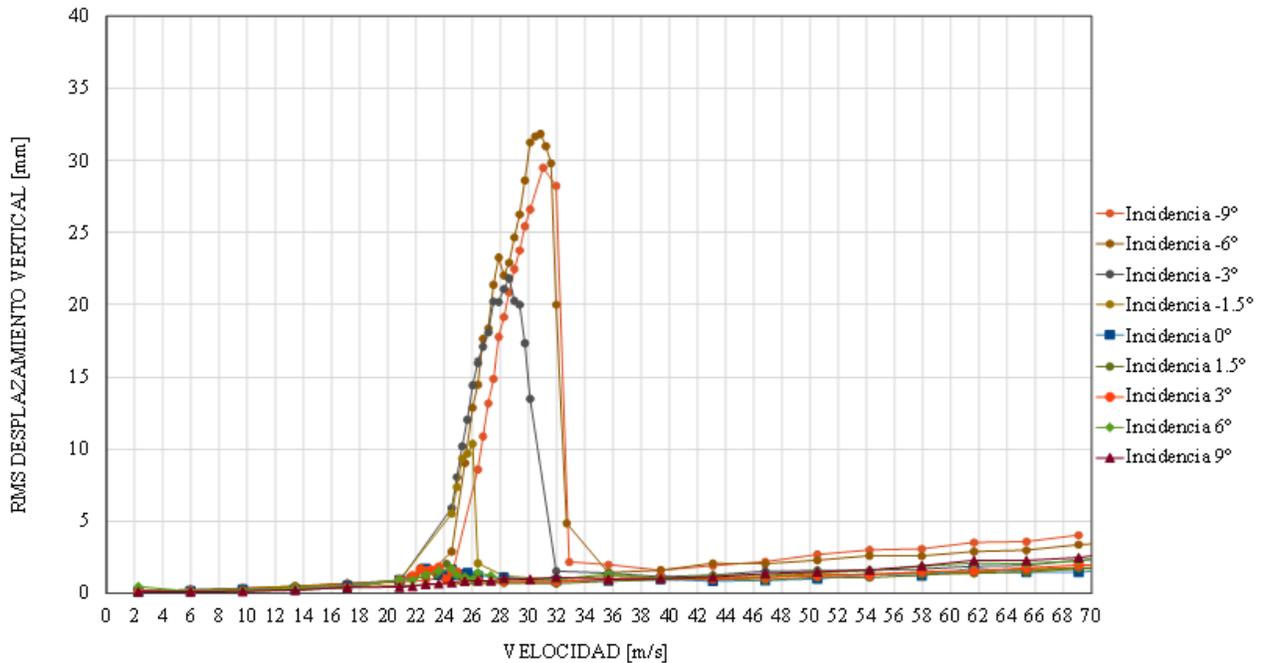


Figura 63. Gráfica de sección en fase constructiva, viento "turbulento", desplazamiento vertical de flexión.

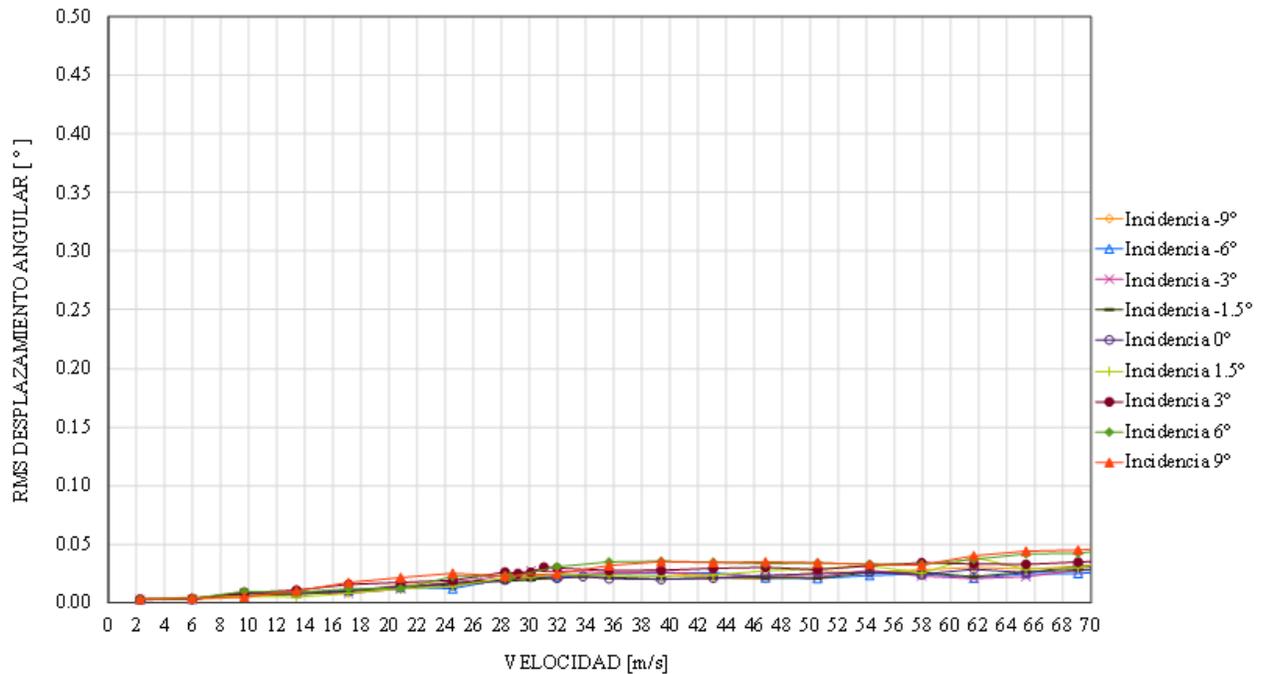


Figura 64. Gráfica de sección en fase constructiva, viento "turbulento", desplazamiento de torsión.

5.1.3 Coeficientes aerodinámicos medios.

Los coeficientes aerodinámicos medios de la sección del tablero, presentados en las *Figura 65*, *Figura 66* y *Figura 67* son fundamentales para evaluar las fuerzas generadas por el viento en el tablero del puente, ya sea en un modelo a escala o en la estructura real. Estos coeficientes incluyen las fuerzas de levantamiento, fuerzas de arrastre y fuerzas de torsión.

En particular, el coeficiente de sustentación, C_y , mostrado en la *Figura 66*, revela que cuando el viento incide horizontalmente sobre el tablero (a 0°), se registra el menor valor de este coeficiente. A medida que el ángulo de incidencia del viento varía, el coeficiente de sustentación aumenta debido a una mayor área del tablero expuesta al viento.

Además, los coeficientes medidos muestran cierta simetría en relación con el ángulo de 0° , lo que sugiere una respuesta aerodinámica equilibrada del tablero frente a cambios en la dirección del viento. Esta información es crucial para diseñar y verificar la resistencia y estabilidad del puente, asegurando que la estructura pueda soportar las diversas fuerzas impuestas por el viento bajo diferentes condiciones de incidencia.

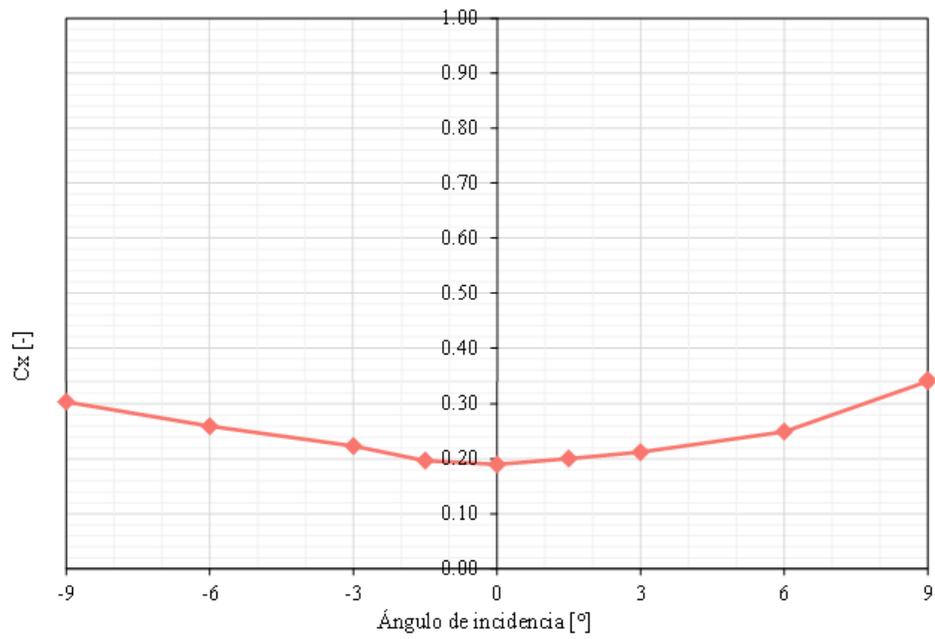


Figura 65. Gráfica del coeficiente aerodinámico de fuerza de Arrastre " C_x ".

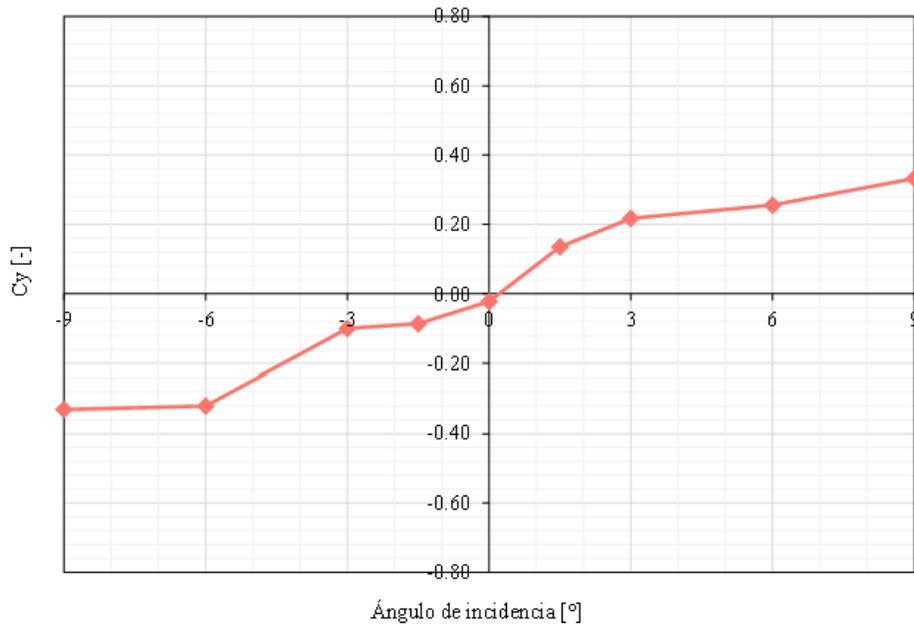


Figura 66. Gráfica del coeficiente aerodinámicos de fuerza de levantamiento " C_y ".

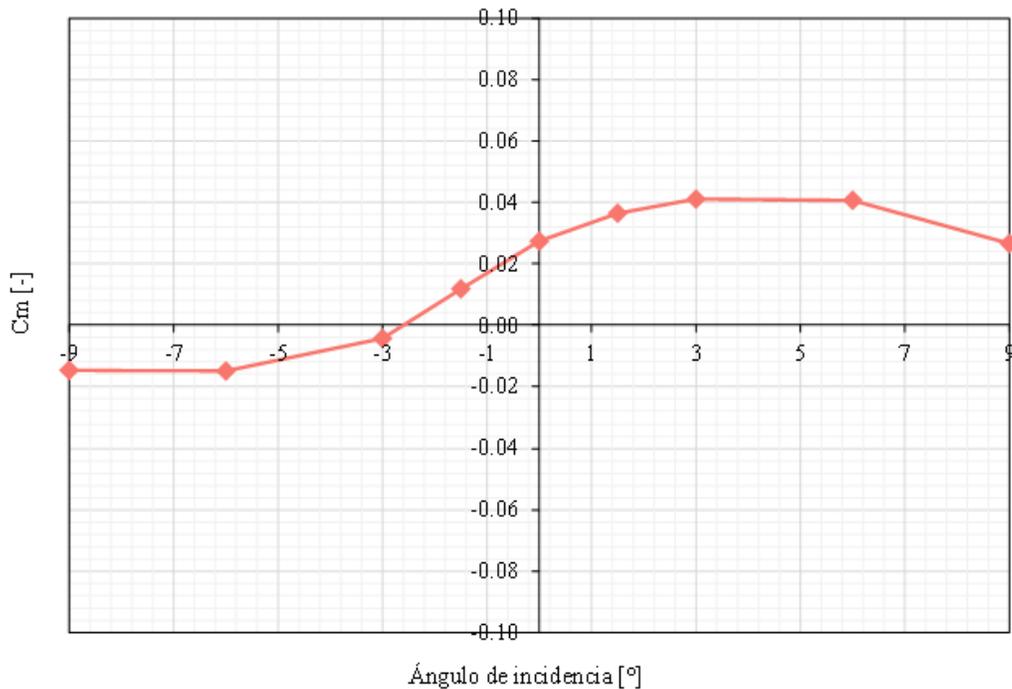


Figura 67. Gráfica del coeficiente aerodinámico de fuerza de torsión " C_m ".

5.2 En fase de servicio (con pantallas acústicas).

En la sección del tablero que incluye las pantallas acústicas, se observa el fenómeno de desprendimiento de vórtices a bajas velocidades, aproximadamente a velocidad de 21 m/s, tanto en condiciones de viento "suave" como viento "turbulento", como se muestran en la *Figura 68* y *Figura 69*, respectivamente. Estas gráficas indican que no se presentan inestabilidades a velocidades de viento altas. Así mismo, con base en la *Figura 70* y *Figura 71*, se concluye que la sección no presenta inestabilidades a torsión.

5.2.1 Viento suave.

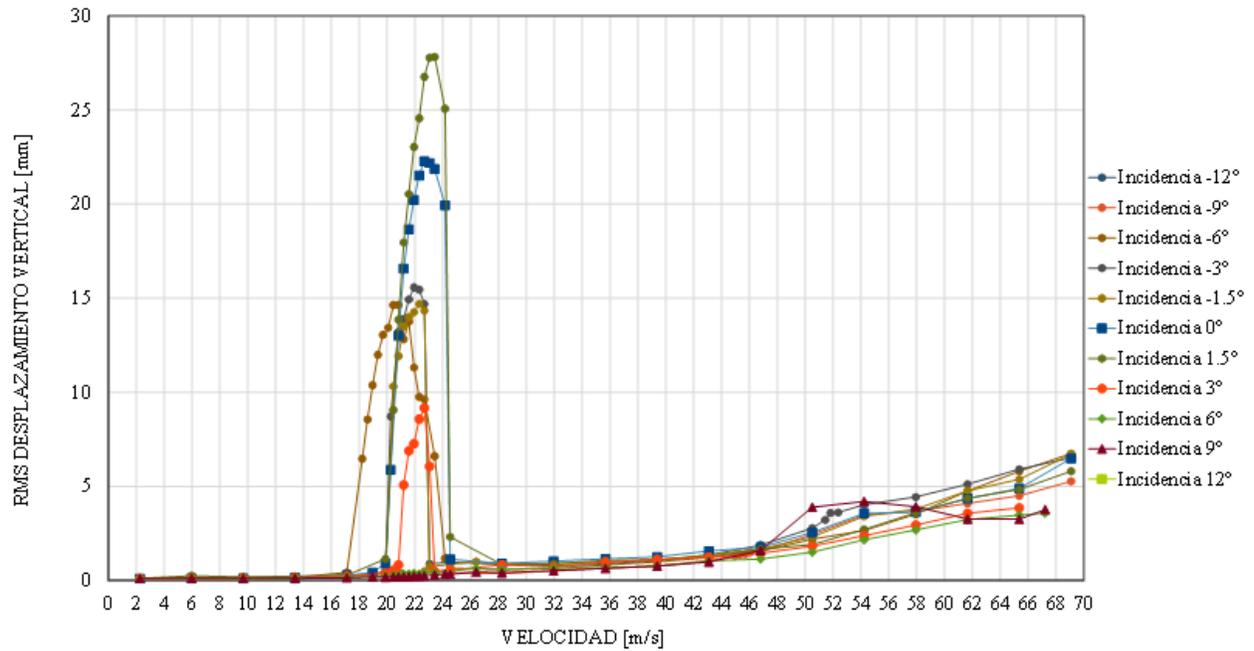


Figura 68. Gráfica de la sección en fase de servicio, viento "suave", desplazamiento vertical de flexión.

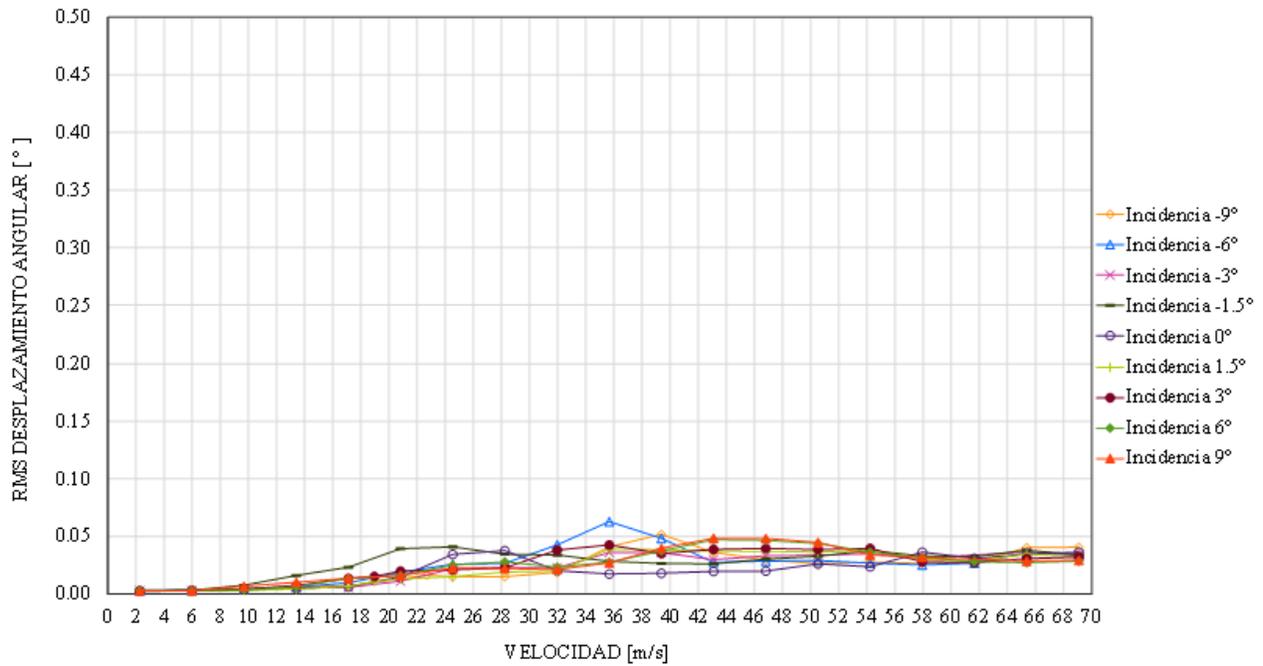


Figura 69. Gráfica de la sección en fase de servicio, viento "suave", desplazamiento de torsión.

5.2.2 Viento turbulento.

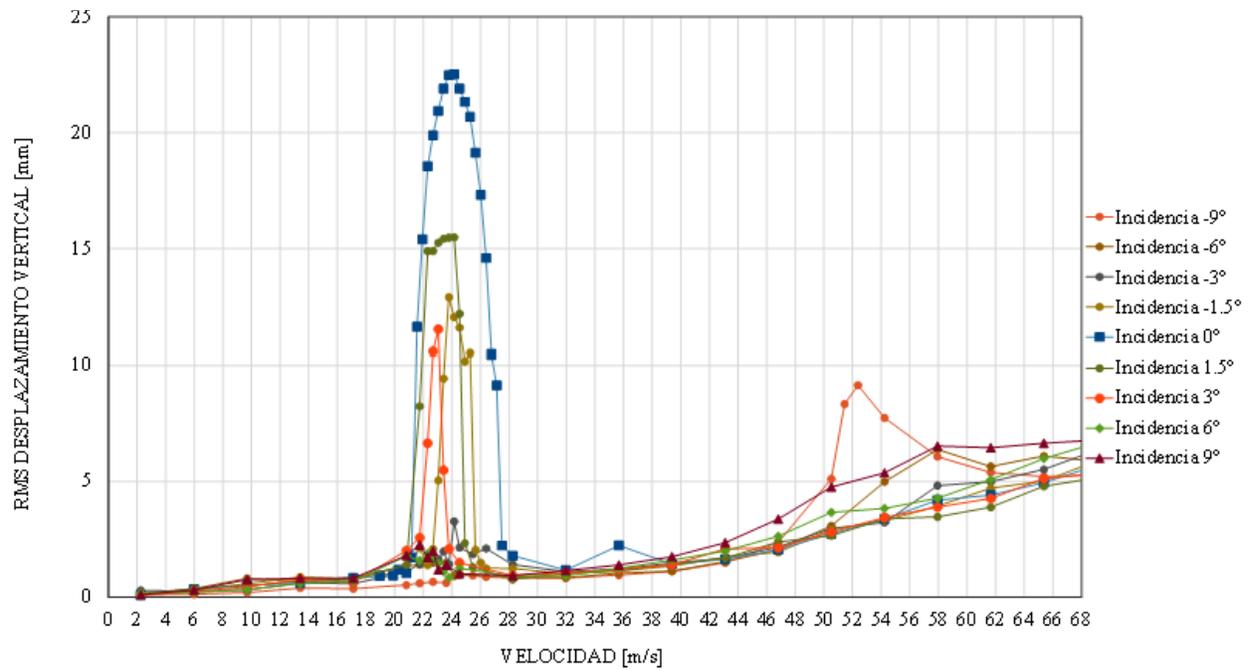


Figura 70. Gráfica de la sección en fase de servicio, viento "turbulento", desplazamiento vertical de flexión.

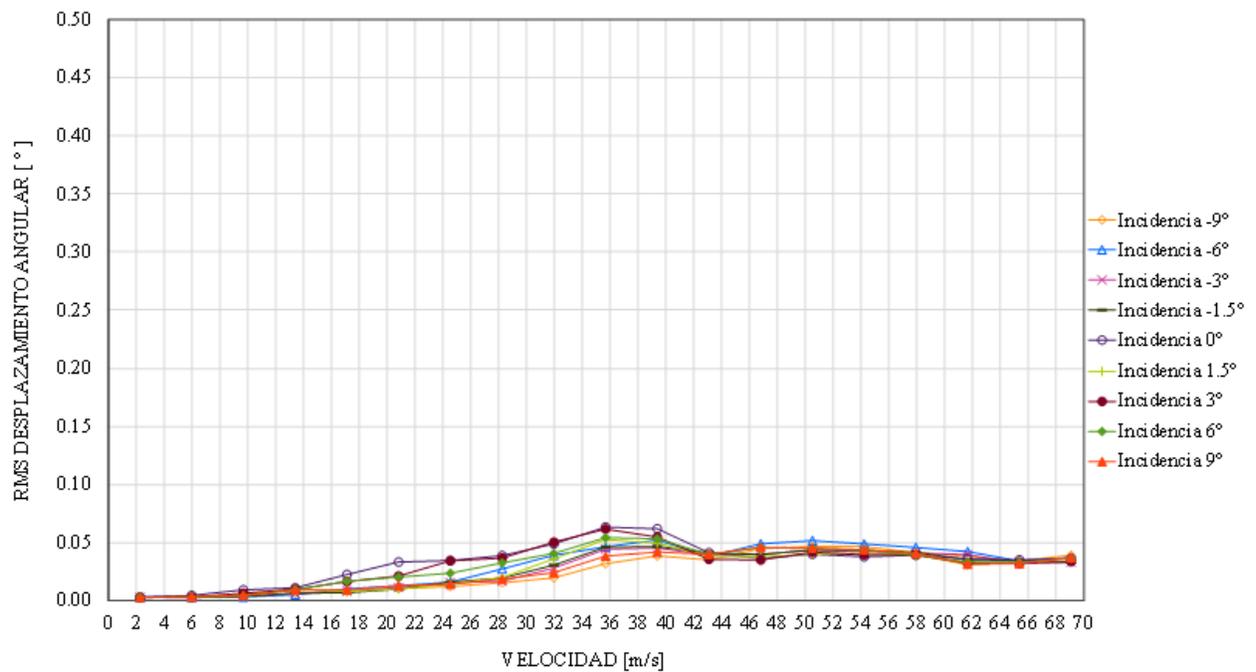


Figura 71. Gráfica de la sección en fase de servicio, viento "turbulento", desplazamiento de torsión.

5.2.3 Coeficientes aerodinámicos medios.

Los coeficientes aerodinámicos medios de la sección del tablero se presentan en la *Figura 72*, *Figura 73* y *Figura 74* y pueden utilizarse para verificar las fuerzas ejercidas por el viento en el tablero del puente, ya sea en un modelo real o en un modelo a escala. Estas fuerzas incluyen las fuerzas de arrastre, fuerzas de levantamiento y fuerzas de torsión. Se observa que la presencia de las pantallas acústicas incrementa el coeficiente de arrastre " C_x ", en todos los ángulos de incidencia del viento, como era de esperarse.

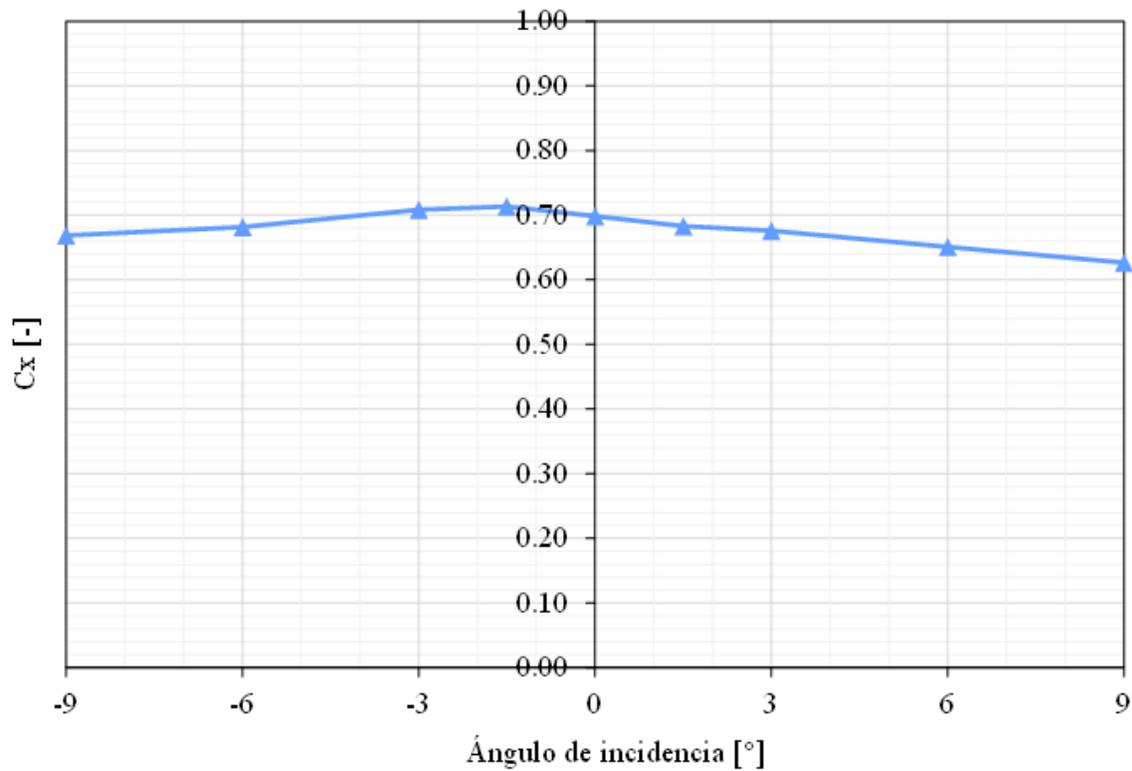


Figura 72. Gráfica de coeficientes aerodinámicos de fuerzas de arrastre " C_x ".

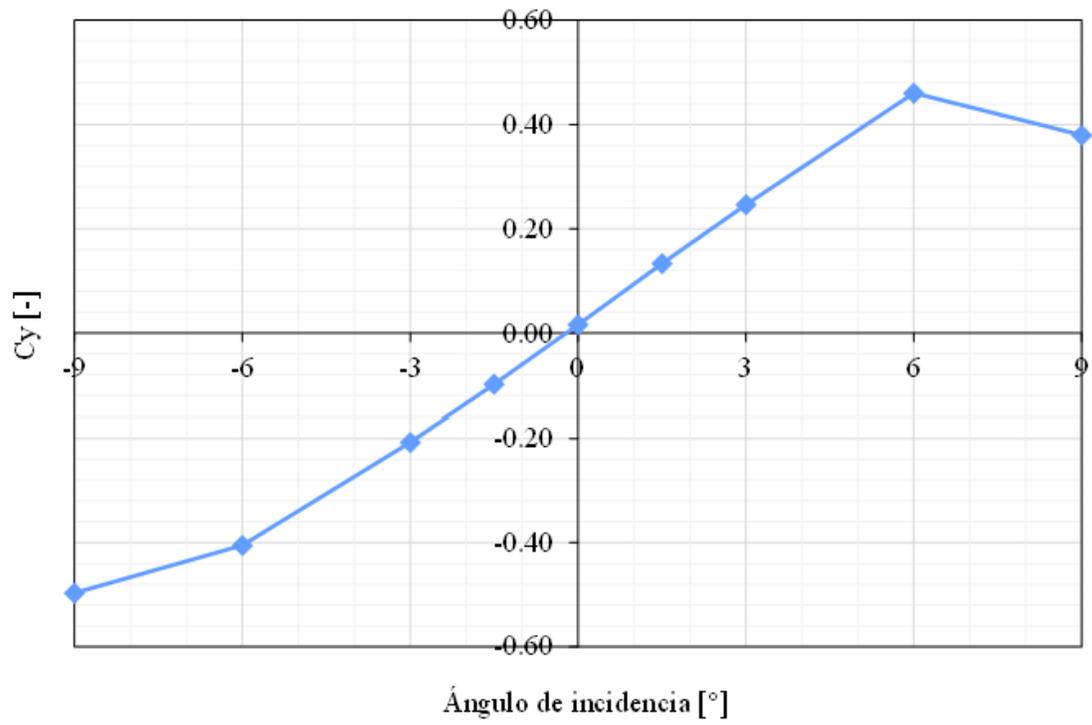


Figura 73. Gráfica de coeficientes aerodinámicos de fuerzas de levantamiento "Cy".

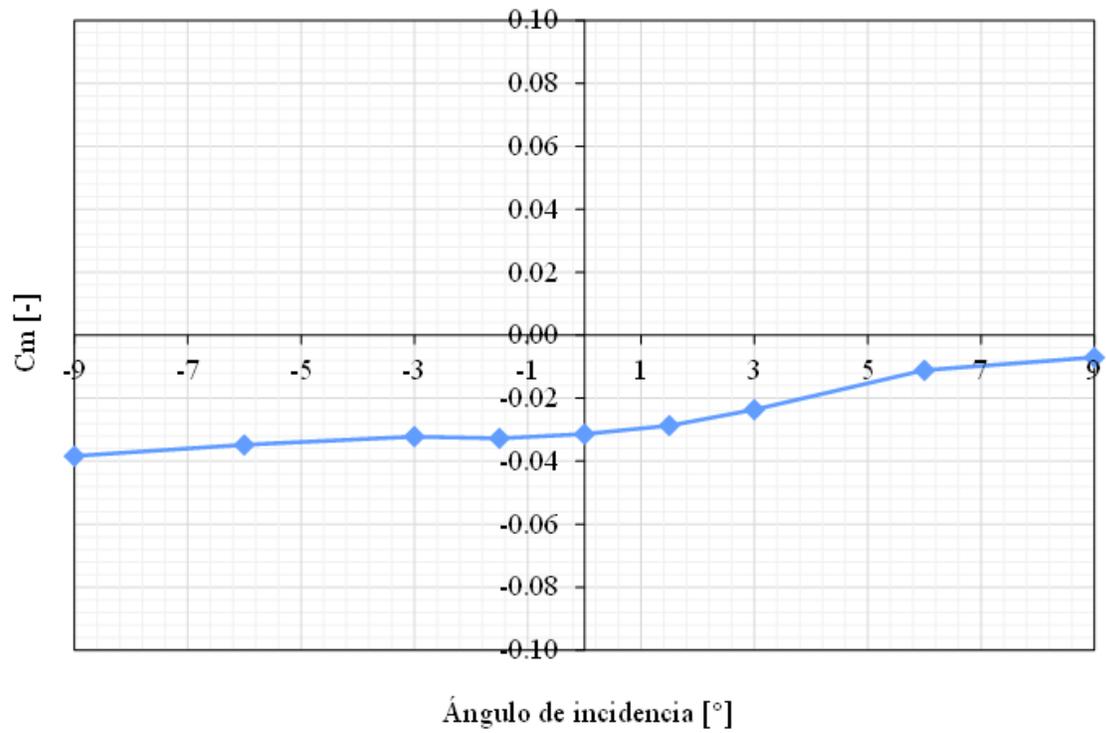


Figura 74. Gráfica de coeficientes aerodinámicos de fuerzas de torsión "Cm".

VI. Conclusiones.

Tal estudio realizado sobre el tablero del Puente Atirantado Ferroviario Garra de Jaguar revela que tanto en la fase constructiva, es decir, sin pantallas acústicas, como en fase de servicio, con pantallas acústicas de 4m en los extremos del tablero, no se observaron inestabilidades a altas velocidades del viento en diferentes ángulos de incidencia, ni a flexión ni a torsión, incluyendo sus efectos acoplados.

Sin embargo, debido a la forma poco aerodinámica del tablero, se identificó una susceptibilidad al desprendimiento de vórtices en el modo de flexión a velocidades bajas de viento, en 22 m/s, inferiores a la velocidad límite horaria del sitio. Las normas indican que el límite de susceptibilidad al desprendimiento de vórtices en modo de flexión para puentes es cuando el número de Strouhal (St) cae dentro de un rango específico que depende de las características del puente y el flujo de aire alrededor de la estructura. Generalmente, se considera que, si la frecuencia de desprendimiento de vórtice coincide con una de las frecuencias naturales del puente, existe un riesgo elevado de que se produzca una resonancia, lo que podría llevar a oscilaciones significativas.

Los resultados indican que, tanto en fase de construcción como de servicio, algunas amplitudes observadas están próximas a la amplitud admisible, especialmente bajo viento turbulento. En consecuencia, se concluye que los valores obtenidos se encuentran dentro de un rango aceptable según los criterios sugeridos, sin necesidad de modificar la sección del tablero o las pantallas propuestas inicialmente en el proyecto ejecutivo. No obstante, se recomienda realizar un análisis de fatiga del puente a largo plazo bajo condiciones de viento turbulento, para evaluar posibles efectos en la durabilidad de los componentes.

En caso de que se detecten incumplimientos con los requisitos de fatiga, se sugiere considerar modificaciones en la forma de las pantallas o la adición de deflectores o aeroestabilizadores para mejorar la aerodinámica del tablero y mitigar o eliminar el fenómeno de desprendimiento de vórtices alternos.

VII. Referencias.

- [1] Larsen, A. (1992). *Aerodynamics of Large Bridges*, Netherlands: A.A Belkama.
- [2] Blevins, R.D. (1990). *Flow-Induces Vibrations. 2. Ed. Malabar*, Florida: Krieger Publishing Company
- [3] Vasallo, B.A. (2009), *Análisis de vibración aeróelásticas en estructuras esbeltas sometidas a cargas de viento*, Tesis Doctoral, Universidad de Valladolid, pp. 35-45
- [4] AcademiaLab (2024). *Aeroelasticidad*. Recuperado el 13 de junio de 2024, del sitio web: <https://academia-lab.com/enciclopedia/aeroelasticidad/>
- [5] Rincón S. (2013). *Comportamiento aeroelástico de puentes atirantados, criterios de modelamiento y caso de aplicación*. Tesis Licenciatura, Universidad Industrial de Santander
- [6] Jurado J.A. (2011). *Bridge Aeroelasticity. Sensitivity Analysis and Optimal Design*. University of LaCoruña, Sapin
- [7] Jurado J.A., Sanchez R., Hernández S., Nieto F. (2014). *PCTUVI. Wind tunnel control software for aerodynamic and aeroelastic sectional model tests*. CWE 2014, 6 International Symposium on Computational Wind Engineering, Hamburg Germany 8-12 June.
- [8] Geo, Y., Xia, J., Zhao, L., Zhao, S., (2018). *Full Aeroelastic model Testing for Examining Wind-Induced Vibration of a 5,000m Spanned Suspensions Bridge*, China, Universidad de Shanghai.
- [9] Long P., (2003). Tacoma Narrows Bridge collapses on November 7, 1940. *HistoryLink*. [Tacoma Narrows Bridge collapses on November 7, 1940. - HistoryLink.org](http://www.historylink.org/Tacoma-Narrows-Bridge-collapses-on-November-7-1940)
- [10] Gonzalo Gómez Ingenieros. (s.f.). Puente de acero y tablero de concreto. Recuperado el 17 de junio de 2024, de <https://gonzalogomezingenieros.com/project.php/es?id=puente-de-acero>
- [11] Your Technology Web. (s.f.). Estructuras. Recuperado el 17 de junio de 2024, de <https://www.yourtechnologyweb.com/contenidos-2o-eso/estructuras/7/>
- [12] Gobierno de México. (2018, junio 14). *Los puentes de México, 1985-2014*. Biblioteca de Publicaciones Oficiales del Gobierno de la República. Recuperado el 17 de junio de 2024, de <https://www.gob.mx/publicaciones/articulos/los-puentes-de-mexico-1985-2014?idiom=es>

- [13] Yablonski S., (2021). *Tacoma Narrows Bridge collapsed 81 years ago*. Weather News, EE.UU., de [Tacoma Narrows Bridge collapsed 81 years ago | Fox Weather](#)
- [14] Fonatur., (2023) *Con el tren maya, el medio ambiente estará mucho mejor que antes en el sureste mexicano*: Javier May. Recuperado el 17 de junio de 2024, de <https://www.gob.mx/fonatur/prensa/con-el-tren-maya-el-medio-ambiente-estara-mucho-mejor-que-antes-en-el-sureste-mexicano-javier-may?idiom=es>
- [15] Romero L.E., (2014). *Revisión de los efectos del viento en un puente corto considerando diferentes reglamentos de diseño*. Universidad Nacional Autónoma de México
- [16] Blog de Ingeniería Civil Construcciones (2009, septiembre 2). *Partes de un puente*. Recuperado de <https://ingenieriacivil-construcciones.blogspot.com/2009/09/partes-de-un-puente.html>
- [17] Ingeniería por el Mundo. (2014, octubre 12). *Conceptos previos*. Recuperado de <https://ingenieriaporelmundo.blogspot.com/2014/10/conceptos-previos.html>
- [18] Warrick, J. (2012, Enero 28). *Mexico's Baluarte bridge is the highest in North America*. The Washington Post.
- [19] Instituto de Ingeniería (UNAM). *Laboratorio de Ingeniería de Viento*. Recuperado de <http://grupos.iingen.unam.mx/ingviento/es-mx/Laboratorio/Paginas/default.aspx>
- [20] Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2008)
- [21] Rodríguez Serquén, A. (2020). *Puentes con AASHTO – LRFD*. MSc
- [22] Rincón Barajas, S.A., & Martínez Rodríguez, C.A. (2013). *Comportamiento aeroelástico de puentes atirantados: Criterios de modelamiento y caso de aplicación* (Trabajo de Grado). Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil.
- [23] Hernández Ibáñez, S. (2022). *Diseño aeroelástico de puentes de gran vano: La lucha contra el viento*. Investigación aplicada a la Ingeniería, 3635, marzo-abril. Recuperado de <https://www.revistadeobraspublicas.com/articulos/disenio-aeroelastico-de-puentes-de-gran-vano-la-lucha-contra-el-viento/>
- [24] Barlow, J., et. Al. (1999). *Low – speed wind tunnel testing* (3a ed.) New York: John Wiley & Sons. Pp. 78 – 92.