

Influencia de la carga de viento en puentes. Caso de estudio tablero del Puente del Abra del Yumurí.

Influence of wind loading on bridges. Case Open Bridge board Yumurí study.

Ing. Carlo Fidel Taboada
Ingeniero civil
Departamento de Construcciones de la Facultad de Ingenierías de la
Universidad de Matanzas "Camilo Cienfuegos". Cuba
Telf: (45) 256782



Prof. MSc. Ing. Héctor Alfonso Pérez
Ingeniero Principal
Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería. EMPAI. Matanzas.
Cuba
Profesor Auxiliar de la Carrera de Ingeniería Civil de la UMCC. Cuba
Telf: (45)291802, Ext.255. Email: hector-alfonso@empai.co.cu

Recibido: 03-06-13

Aceptado:19-07-13

Resumen:

El proyecto de construcción de una Refinería de hidrocarburo en la periferia de la ciudad de Matanzas trae como consecuencia la redistribución del flujo vehicular ocasionado por su construcción y su posterior puesta en marcha a través de una solución vial que incluye la construcción de un puente en el Abra del Yumurí. Dado que el puente se encuentra situado a gran altura y en una zona próxima a la desembocadura del río, influyen sobre él cargas de viento considerables. Para dar solución a esta problemática se debe escoger un método eficaz y racional, al mismo tiempo. Para ello se analizan la NC 285 2003 "Carga de viento. Método de cálculo" (Norma vigente para el cálculo del viento en estructuras en Cuba) y la AASHTO (American Association of State highway and Transportation Officials) LRFD Bridge 2007, procedente de EEUU y con la cual se calculan muchos puentes en la actualidad en varios países a fin de aplicarlas al puente en cuestión y así, posteriormente, seleccionar el proceder óptimo entre estas dos propuestas.

Palabras clave: Carga de viento, Puentes, Tableros

Abstract:

The project of construction of a Hydrocarbon Refinery in the periphery of the city of Matanzas comes along with the redistribution of the vehicular flow caused by its construction and its later functioning through a vial solution that includes the construction of a bridge in the Abra del Yumurí. Since the bridge is located to great height and on the verge of the river's outlet it's influenced by considerable loads of wind. In order to solve this problem it should be chosen a method both rational and effective. Therefore, the NC 285 2003 "Load of wind. Calculation method" (effective Norm for calculation of the wind in structures in Cuba) and the AASHTO (American Association of State highway and Transportation Officials) LRFD Bridge 2007 (coming from USA and with which many bridges are calculated at the present time in several countries) are analyzed in order to be applied on the so called bridge and then, eventually, be able to select the better proceeding among these two proposals.

Keywords: Wind loads, Bridges, Boards

Introducción:

Como parte de las obras inducidas por el proyecto de la refinería en Matanzas se encuentra un conjunto de obras viales que serán de gran impacto a la vialidad matancera, puesto que van a brindar una solución para todo el cúmulo de vehículos pesados que está asociado a la construcción y prestación de servicio de la misma, una vez terminada, se produce un incremento significativo del flujo vehicular que atraviesa la ciudad y del riesgo de contaminación que puede producir las cargas de estos vehículos.

La no realización del cruce alternativo sobre el río Yumurí produce saturaciones en el tránsito de la ciudad, además que toda la circulación vehicular se realiza sobre el puente de la Concordia, lo cual significa un gran riesgo al ser este puente una obra con 125 años de explotación y un diseño para cargas inferiores a las que hoy soporta. La citada solución vial está basada en la posibilidad de sacar el tráfico pesado de la ciudad, creando, para ello, una red vial que bordea la ciudad y que salva el obstáculo del abra del Yumurí con un puente cuya luz será de 304m y estará a una altura con relación al río de 64m. Como es apreciable, a tal altura y por la cercanía al mar se producen efectos a causa de la carga de viento que tienen gran impacto sobre la seguridad de la estructura.

Los factores que influyen en la magnitud de esta carga son: la velocidad del viento y su variación con la altura, la magnitud de las ráfagas, las condiciones locales de la superficie del terreno circunvecino, la forma de la superficie expuesta al viento, la zona o región.

Cuba, por su ubicación geográfica se encuentra expuesta a cargas de viento significativas, además de ser vulnerable a la incidencia directa de huracanes y fenómenos meteorológicos que traen consigo

fuertes vientos. Esta carga ecológica tiene una influencia muy importante en las estructuras y al ser tan variable resulta dificultoso llevarla a planos numéricos. Para los puentes la carga de viento es fundamental puesto que muchas veces están situados en lugares de gran altura en los que la presión del viento alcanza valores considerables que ponen en peligro la estructura de no haber realizado un diseño cuidadoso, además de la exposición a los fenómenos de la naturaleza a la que están sometidos por su ubicación.

Desarrollo:

En la actualidad la construcción de puentes en Cuba está normada por la NC 733:2009, pero, en cuanto al viento, dicho documento remite a la norma NC 285 2003 "Carga de viento. Método de cálculo", la cual brinda información acerca de cómo trabajar esta carga en el caso de la estructura de puentes. Sin embargo, esta norma no tiene en cuenta algunos factores asociados al comportamiento de la carga en cuestión, ejemplo de ello es el efecto de levante que ocasiona el viento en las estructuras de puentes. Por otra parte, un alto número de puentes a nivel mundial se diseñan según la norma de la AASHTO (American Association of State highway and Transportation Officials) LRFD Bridge 2007. Esta norma procede de Estados Unidos, por tanto, es de suponer que describa un método distinto para el cálculo de la carga de viento con respecto a la NC 285. 2003. En el método propuesto por la AASHTO se tienen en cuenta determinados efectos que provoca el viento en la estructura que no están contenidos en la norma cubana.

Atendiendo a las características de la zona donde se ubica el Puente del Abra del río del Yumurí y considerando la frecuencia de los eventos meteorológicos extremos en los últimos años se hace necesario aplicar una metodología apropiada para el cálculo de las cargas de viento a que es sometido dicho puente, de manera que se garantice la seguridad de la estructura con un uso racional de los recursos para su construcción.

Marco teórico referencial de la investigación.

Se explica, primeramente, el efecto que tiene en las estructuras la influencia del viento, a fin de ir introduciendo el caso específico de la influencia de esta carga en los puentes. Posteriormente se analiza el proceder planteado por las normas cubanas NC 733. 2009 "Carreteras. Puentes y alcantarillas. Requisitos de diseño y método de cálculo", NC 285. 2003 "Cargas de Viento. Método de cálculo" y de la norma de origen norteamericano "AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2007".

Efecto del viento en las estructuras

Las edificaciones sometidas a la acción del viento están en constante riesgo de sufrir daños por diversos efectos relacionados con esta fuerza de la naturaleza. “Los vientos son movimientos horizontales de masas de aire debidos a diferencias de presión en las distintas zonas de la atmosfera y la rotación terrestre” (Meli Piralla, 1985, p.201). Generalmente estas estructuras son sometidas al análisis pertinente en la fase de proyecto en cuanto al efecto de la carga en cuestión, pero no por ello son ajenas al deterioro de sus elementos y en casos extremos al fallo súbito provocado por el colapso de un elemento de cierre, hecho este que permite la intrusión de una de las fuerzas menos predecible existente en nuestro universo.

En Cuba tienen lugar fenómenos atmosféricos excepcionales a los que están asociados velocidades de viento muy grandes llamados huracanes. Estos al ir penetrando en tierra van disminuyendo la velocidad de sus viento producto al rozamiento de las masas de aire en movimiento con la superficie del terreno, por tanto las obras que se encuentren expuestas al mar en zonas costeras o a gran altura son más vulnerable a estos fenómenos, ya que son las primeras en recibir los efectos de los fuertes vientos. Tal es el caso de algunos puentes de la ciudad de Matanzas.

A la hora de analizar el efecto del viento sobre las estructuras los estudios definen que, de acuerdo al comportamiento de la velocidad, interviene un componente estático y un componente dinámico. El primero es “aquella parte que puede considerarse actúa con velocidad media constante durante varios minutos” (Meli Piralla, 1985, p.202), el segundo es una oscilación aleatoria que tiene períodos del orden de algunos segundos y que puede denominarse efecto de ráfaga. La velocidad se encuentra en estrecha relación con la topografía de la zona, ya que para un terreno muy liso, como un campo abierto con muy poca vegetación, la velocidad del viento puede mantenerse alta, aún muy cerca de la superficie, puesto que se reduce la fricción de las masas de aire con algún cuerpo asociado a la topografía del terreno, sin embargo en ciudades de gran desarrollo donde abundan edificios altos la velocidad disminuye rápidamente.

Cuando el viento impacta una superficie normal a su dirección a una velocidad determinada, se ve obligado a rodear el objeto que provoca la obstrucción del flujo, por lo que genera presiones sobre dicha superficie provocando un empuje sobre esta cara llamada barlovento. Por su parte, la cara opuesta, llamada sotavento, se encuentra sometida a efectos de succión provocada por la separación de las estelas del flujo. Los dos fenómenos hacen que sobre el objeto actúe una fuerza de arrastre, ambos se muestra en la siguiente figura.

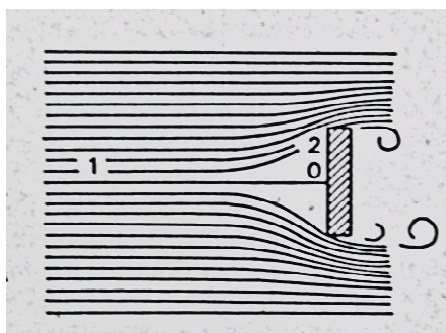


Figura 1.1 Comportamiento del flujo de viento ante un objeto. Fuente: Diseño Estructural, R. Meli Piralla

En estructuras donde el componente estático del viento tiene protagonismo (dígase en construcciones ligeras con grandes superficies expuestas al flujo) se puede resolver la situación con relativa facilidad. En cambio, las construcciones flexibles y las expuestas al fenómeno de generación de vórtices como es el caso de chimeneas, puentes atirantados y colgantes, las antenas y algunas torres, son difíciles de analizar ante el efecto del viento ya que en ellas prima el comportamiento dinámico. Un ejemplo clásico de un diseño deficiente ante el componente dinámico de la carga de viento es el caso del puente de Takoma Narrows, este falló por entrar en resonancia con vientos de apenas 65km/h e introducirse fenómenos de torsión en la estructura. A raíz de esta tragedia surge el término “galloping”, fenómeno descrito por la AASHTO como oscilación de alta amplitud asociada con los cables cargados con hielo o con elementos largos y flexibles de sección transversal aerodinámicamente asimétrica.

La concepción del diseño ante la carga de viento debe ser lograr una estructura donde todos sus componentes se sigan desempeñando de manera satisfactoria una vez esta carga haya alcanzado sus valores máximos. Para ello es necesario tener en cuenta fenómenos que pueden generarse en torno a la tipología de la edificación, como es el caso de las turbulencias que generan obstáculos que se interponen entre la corriente de viento y la superficie de la edificación, la aceleración de las cargas de viento producto de la existencia de lobby, pasillos exteriores, pasadizos, los esfuerzos asociados a la forma de la estructura, entre otros.

Cuando uno de los elementos de cierre falla y la edificación pierde su condición de impermeable entonces se desencadena una secuencia de destrucción que termina en el colapso de la estructura, esto se produce por las zonas exteriores de succiones y presiones en la cubierta y en las esquinas originados por las turbulencias que producen los cambios de direcciones en la incidencia del viento.

Entre los efectos que provoca la carga de viento sobre una estructura, independientemente de la tipología de la misma, están: deformaciones excesivas, pérdida de estabilidad, fatiga, rotura de elementos y otros. Las deformaciones excesivas son muy frecuentes en la vida práctica. Este fenómeno influye sobre los elementos no estructurales, que pueden ser afectados por el movimiento (terminaciones, paneles divisorios, etc.), que deberán estar aislados de la estructura por juntas especiales. También pueden

afectarse los ascensores por distorsiones en el sistema de movimiento. Las rotaciones de la estructura pueden causar problemas en antenas de radio y TV ubicadas en la azotea.

Los puentes son estructuras abiertas emplazadas, muchas ocasiones, en lugares donde las condiciones meteorológicas son hostiles. Como su naturaleza es precisamente salvar obstáculos y lograr el paso donde la propia naturaleza decidió no concederle al ser humano este favor, sus elementos están expuestos a las inclemencias de un entorno que casi siempre conspira para acortar su vida útil, de modo que es fundamental el análisis certero de todos los esfuerzos que estas estructuras debe soportar y en especial el provocado por la carga de viento. Para ello es necesario el estudio de documentos normativos existentes en la actualidad que correspondan a diferentes enfoques a fin de desarrollar un diseño óptimo con la ayuda de parámetros foráneos que pueden ser adoptados tras el análisis pertinente.

Enfoque de la Norma Cubana 733. 2009 Carreteras. Puentes y alcantarillas. Requisitos de diseño y método de cálculo.

Esta norma remite directamente a la anteriormente tratada. Aunque establece un grupo de regulaciones que son las siguientes:

- La carga característica total a considerar en los cálculos se obtendrá de acuerdo a lo indicado en la norma 285.
- Para el caso de los puentes se considerarán dos casos para el cálculo de la carga de viento:

Caso 1: Incidencia del viento sobre un puente cuando por sobre este no está pasando ningún vehículo.

Caso 2: Incidencia del viento sobre un puente cuando por sobre este pasan vehículos.

- La componente dinámica del viento debe ser considerada en estructuras cuyos períodos de oscilaciones propias sean mayores o igual a 15s como pueden ser las pilas en forma de pórticos, con pilas en altura cuyas esbelteces sean mayores que 1,5.
- La comprobación de resonancia se deberá realizar en puentes cuyos períodos de oscilaciones propias, debido a su tipología así lo exijan.
- En el caso del cálculo de la carga de viento para el proyecto típico el valor del coeficiente de sitio C_s se tomará igual a 1, al igual que para el cálculo de las cimentaciones en general, independientemente de ser proyecto típico o no.

Enfoque de la Norma Cubana 285.2003 Carga de viento. Método de cálculo.

Este documento normativo fue elaborado a partir de estudios profundos realizados en el 2001 ante la afectación que produjo el paso del huracán Michelle en la región sur-central de la provincia de Matanzas y la parte norte-occidental de la provincia de Villa Clara y teniendo en cuenta los documentos anteriores

que regían el cálculo de la carga de viento en Cuba. El fenómeno meteorológico antes mencionado atravesó los territorios referidos con vientos sostenidos de 210km/h que lo ubicaron en la cuarta categoría de la escala Saffir-Simpson, lo que provocó que dejara tras de sí una estela de desastres estructurales significativos, hecho que demostró la urgencia de la actualización de la norma vigente.

El antecedente directo de la norma 285 del 2003 es la NC 53-41 de 1990. Pero los inicios de la norma cubana de vientos se remontan a la década de los 70 en Normas y Reglamentos de la Construcción (NYRCO) cuya versión inicial para el viento fue la NYRCO 11-035 del año 1973. Esta norma recogió lo mejor de los elementos de las normas DIN alemanas, estudios realizados para la construcción por la ESSO, de refinerías en el área del Caribe y de normas de la antigua Checoslovaquia, Polacas, Inglesas y de la extinta URSS. En 1978, nace la primera norma cubana (NC) para el cálculo de la carga de viento: la NC 053-041. Posteriormente fueron surgiendo otras NC que suplían las deficiencias de la anterior actualizando los coeficientes existentes y originando otros que en conjunto explicaban el comportamiento del viento ante las estructuras en el entorno ambiental cubano de acuerdo a los conocimientos y a las herramientas tecnológicas existentes en la época (Blanco Heredia, y Llanes Burón, 2011, p. 3).

La NC 285 establece en sus comienzos que toda edificación no soterrada debe ser proyectada para resistir los efectos provocados por el viento (NC 285, p. 1).

Dirección del viento.

Salvo condiciones excepcionales, el viento actúa horizontalmente y en cualquier dirección. Se prestará mayor atención al efecto del viento en las direcciones principales de la estructura, aunque no se deja de analizar todas las direcciones donde este influye. En otras estructuras se investigará también el impacto en la dirección de las diagonales, tal es el caso de las estructuras especialmente expuestas al viento como los faros, torres y otras.

Carga unitaria total.

Las cargas unitarias características totales por unidad de área (q) a considerar en los cálculos se determinan por la fórmula:

$$q = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_f \quad (1.1)$$

q_{10} : presión básica del viento, (KN/m²)

C_t : coeficiente de recurrencia

C_s : coeficiente de topografía o sitio

C_h : coeficiente de altura

C_r : coeficiente de ráfaga

C_{ra} : coeficiente de reducción

C_f : coeficiente de forma

Presión básica del viento (q_{10}).

Se establece que cuando se tengan observaciones directas de las velocidades básicas del viento, se podrán calcular las presiones básicas características en una superficie normal a su dirección, mediante la fórmula:

$$q_{10} = \frac{V_{10}}{1,6 \times 10^3} \quad (1.2)$$

- q_{10} = presión básica característica del viento correspondiente a velocidades del aire en terrenos llanos y abiertos a una altura de 10 m sobre el terreno, (KN/m²).
- V_{10} = velocidad característica del viento para un período básico de recurrencia y a una altura de 10m sobre el terreno, (m/s).
- 1,6 = factor empírico.

A continuación se muestra la división en tres zonas que hace la norma cubana del territorio cubano y la correspondencia de una presión básica característica para cada una de estas áreas. Esto responde a estudios relacionados con las condiciones meteorológicas manifestadas en un período de recurrencia de 50 años.

Presiones básicas por provincias o regiones

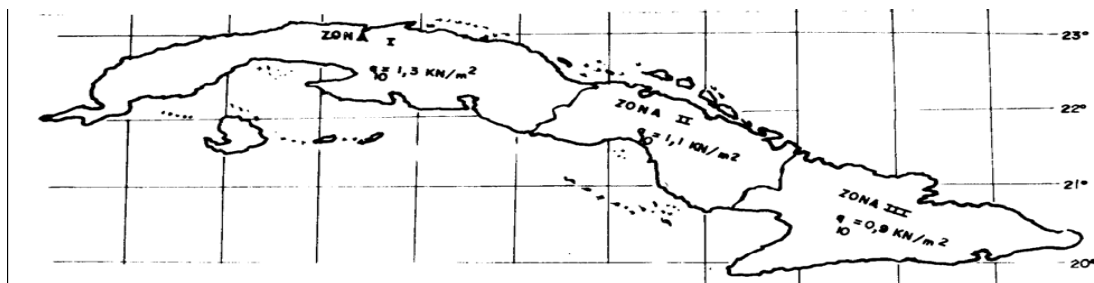


Figura 1.2 Zonas en que está dividido el país en función de la presión básica. Fuente: NC 285. 2003.

• **Zona I** - Que comprende las provincias: Pinar del Río, La Habana, Ciudad de la Habana, Isla de la Juventud, Matanzas, Villa Clara y Cienfuegos.

$$q = 1,3 \text{ KN/m}^2$$

• **Zona II** - Que comprende las provincias de Sancti Spiritus, Ciego de Ávila y Camagüey.

$$q = 1,1 \text{ KN/m}^2$$

- **Zona III** - Que comprende las provincias de Las Tunas, Holguín, Granma, Santiago de Cuba y Guantánamo.

$$q = 0,9 \text{ KN/m}^2$$

Coefficiente de forma para los puentes.

El coeficiente de forma es precisamente uno de los factores más importantes que intervienen en el cálculo de la presión del viento en el enfoque de la norma cubana, ya que expresa de forma numérica el efecto del viento ante la variabilidad geométrica de la superficie donde incide. La norma establece varios tipos de estructuras donde se define este coeficiente a partir de la silueta de la propia edificación.

Para el caso de los puentes se explica a continuación un primer caso en el que el viento incide sobre el tablero sin la existencia de vehículo alguno sobre el puente y un segundo donde el viento actúa en conjunto con vehículo. Es importante agregar que para lograr un análisis correcto de la estructura en cuanto a este coeficiente es necesario el estudio de cada elemento de la misma por separado para asignarle el coeficiente de forma correspondiente.

Incidencia del viento sobre un puente cuando por sobre este no está pasando ningún vehículo.

En la figura 1.3 se muestran los esfuerzos que se originan producto a la influencia del viento cuando este impacta horizontalmente la estructura.

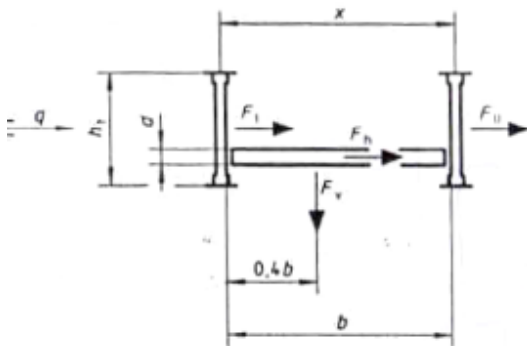


Figura 1.3 Esfuerzos sobre el tablero de un puente en ausencia de vehículo. Fuente: NC 285. 2003.

L_B = longitud del puente

b = ancho de la estructura

d = ancho de la losa

k_{red} , $C_{n,\infty}$, $\sum a_1$, N = se explican más adelante.

Fuerza sobre la viga del lado que sopla el viento (barlovento):

$$F_I = (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_{n,\infty}) \cdot k_{red} \cdot \sum a_1 \quad (1.3)$$

Fuerza sobre la viga del lado de sotavento:

$$F_{II} = (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_{n,\infty}) \cdot k_{red}^N \cdot \sum a_1 \quad (1.5)$$

Fuerza horizontal sobre la losa del puente:

$$F_h = 1,0 \cdot (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra}) \cdot d \cdot l_b \quad (1.5)$$

Fuerza vertical sobre la losa del puente:

$$F_v = 0,6 \cdot (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra}) \cdot b \cdot l_b \quad (1.6)$$

Incidencia del viento sobre un puente cuando por sobre este pasan vehículos.

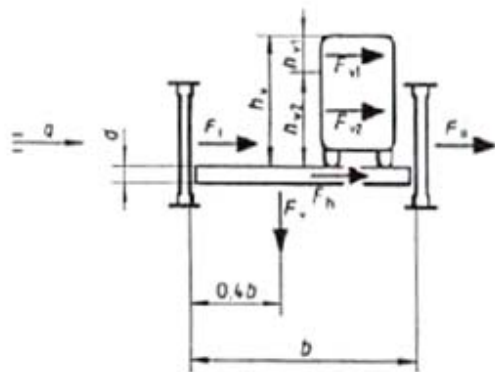


Figura 1.4 Esfuerzos sobre el tablero de un puente en presencia de vehículo. Fuente: NC 285. 2003.

l_v = longitud del vehículo.

h_{v1} = altura del vehículo sobre el nivel de la armadura.

h_{v2} = altura de la armadura sobre el nivel de la losa del puente.

$$A_1 = h_{v1} \cdot l_v$$

$$A_2 = h_{v2} \cdot l_v$$

Fuerza sobre la viga del lado que sopla el viento (barlovento):

$$F_I = (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_{n,\infty}) \cdot k_{red} \cdot \sum a_1 \quad (1.7)$$

Fuerza sobre la viga del lado de sotavento:

$$F_{II} = (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_{n,\infty}) \cdot k_{red}^N \cdot \sum a_1 \quad (1.8)$$

Fuerza horizontal sobre la losa del puente:

$$F_h = 1,2 \cdot (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra}) \cdot d \cdot l_b \quad (1.9)$$

Fuerza vertical sobre la losa del puente:

$$F_v = 0,8 \cdot (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra}) \cdot b \cdot l_b \quad (1.10)$$

Cargas de transporte:

$$F_{v1} = (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_n) \cdot A_1 \quad (1.11a)$$

$$F_{v2} = (2/3 q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_n) \cdot A_1 \quad (1.11b)$$

Tabla 1.1 Coeficientes C_n y h_v en función del tipo de tráfico. Fuente: NC 285. 2003

Tipo de tráfico del puente	h_v (m)	C_n
Ferrovionario	3,8	1,5
Automotor (carretera)	3	1,2
Peatonal	1,7	1

Factor de reducción (k_{red}) para elementos de esbeltez finita (en general, se usa la longitud completa del elemento no la longitud del panel).

Tabla 1.2 Factor de reducción k_{red} en función de l/h_a . Fuente: NC 285. 2003

l/h_a	5	10	20	35	50	100	∞
k_{red}	0,6	0,65	0,75	0,85	0,90	0,95	1,0

En la figura 1.5 se muestra como se determinan los factores l y h_a . El primero es la longitud del elemento que se está analizando y el segundo el ancho de la superficie expuesta al flujo de viento.

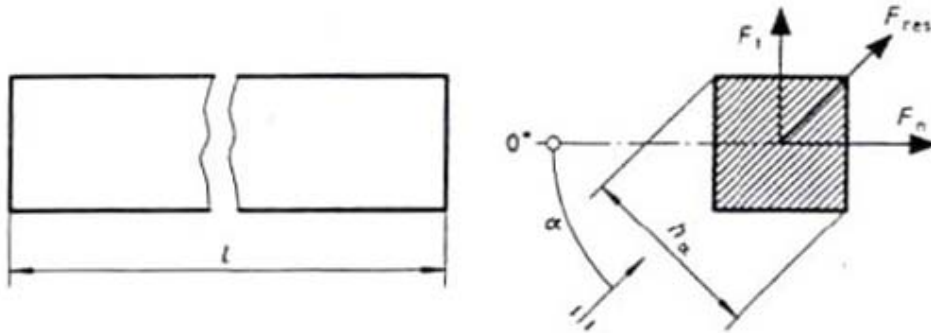


Figura 1.5 Determinación de los coeficientes l y h_a para el cálculo de k_{red} . Fuente: NC 285. 2003

En el caso de existir varias cerchas paralelas (o vigas), la primera se calcula como se muestra a continuación, pero a partir de la segunda y todas las demás se usará el coeficiente de forma afectado por el coeficiente de reducción N , el cual se determina en función de $\Sigma a_i/A$ y b/h .

Coeficiente de forma para la primera cercha (para el caso de estudio, viga)

El coeficiente de forma para una cercha plana (o viga) se determina por la fórmula:

$$C_f = \frac{\sum C_{fi} \times a_i}{A} \quad (1.12)$$

Donde:

$\Sigma a_i/A$: coeficiente de llenado de la cercha. Si es una viga de alma llena $\Sigma a_i / A=1$.

a_i : área de proyección del elemento de la cercha sobre su plano (m^2).

C_{fi} : coeficiente de forma del elemento de la cercha.

A : Área bruta de la cercha, calculada según perímetro exterior, $A = L \times h$ (m^2).

El coeficiente C_{fi} se determina mediante la tabla 11 de la NC que se muestra a continuación y la selección del k_{red} correspondiente al elemento que se analiza. La norma establece que el viento incide sobre el elemento de forma normal a la superficie expuesta y de forma tangencial, de ahí que plantee dos fórmulas para el cálculo de la fuerza, la aplicación de las mismas está sujeta a ambas componentes:

1- Componente normal de la fuerza del viento:

$$F = (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_{n,\infty}) \cdot k_{red} \cdot A \quad (1.13)$$

2- Componente tangencial de la fuerza del viento:

$$F = (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_{t,\infty}) \cdot k_{red} \cdot A \quad (1.14)$$

Los coeficientes $C_{n,\infty}$ y $C_{t,\infty}$ se extraen de la figura 1.6 de acuerdo al ángulo de incidencia del viento y la geometría de la sección transversal del elemento.

α	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$
0°	+1,9	+0,95	+1,8	+1,8	+1,75	+0,1	+1,6	0	+2,0	0	+2,05	0
45°	+1,8	+0,8	+2,1	+1,8	+0,85	+0,85	+1,5	-0,1	+1,2	+0,9	+1,85	+0,6
90°	+2,0	+1,7	-1,9	-1,0	-0,1	+1,75	-0,95	+0,7	-1,6	+2,15	0	+0,6
135°	-1,8	-0,1	-2,0	+0,3	-0,75	+0,75	-0,5	+1,05	-1,1	+2,4	-1,6	+0,4
180°	-2,0	+0,1	-1,4	-1,4	-1,75	-0,1	-1,5	0	-1,7	$\pm 2,1$	-1,8	0
α	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$	$C_{n,\infty}$	$C_{t,\infty}$
0°	+1,4	0	+2,05	0	+1,6	0	+2	0	+2,1	0	+2	0
45°	+1,2	+1,6	+1,95	+0,6	+1,5	+1,5	+1,8	+0,1	+1,4	+0,7	+1,55	+1,55
90°	0	+2,2	$\pm 0,5$	+0,9	0	+1,9	0	+0,1	0	+0,75	0	+2

Figura 1.6 Determinación de los coeficientes $C_{n,\infty}$ y $C_{t,\infty}$ correspondientes al cálculo de la componente normal y tangencial, respectivamente, de la fuerza provocada por el viento. Fuente: NC 285. 2003

Coefficiente de forma para la segunda cercha o viga

El coeficiente N será utilizado para afectar el coeficiente de forma definido para la primera cercha (viga) a fin de obtener una presión menor en la segunda viga. Mediante la tabla que se muestra se realiza su selección.

Tabla 1.3 Elección del coeficiente N en función del coeficiente de llenado, la separación entre las cerchas (b) y la altura de estas (h). Fuente: NC 285. 2003

	Coeficiente N					
	$\Sigma a_i / A$					
b/h	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6 y más
1/2	0,93	0,75	0,56	0,38	0,19	0
1	0,99	0,81	0,65	0,48	0,32	0,15
2	1	0,87	0,73	0,59	0,44	0,30
4	1	0,90	0,78	0,65	0,52	0,40
6	1	0,93	0,83	0,72	0,61	0,50

Enfoque de la AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2007.

En Estados Unidos la primera norma nacional ampliamente reconocida para el diseño y la construcción de puentes fue publicada en 1931 por la American Association of State Highway Officials (AASHTO), organismo antecesor de AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). Con el advenimiento del automóvil y la creación de departamentos de vialidad en todos los estados norteamericanos a finales del siglo pasado, el diseño, la construcción y el mantenimiento de la mayor parte de los puentes estadounidenses pasó a ser responsabilidad de estos departamentos y, más específicamente, del ingeniero de puentes en jefe de cada departamento. Por lo tanto, era natural que estos ingenieros, actuando conjuntamente en el Subcomité de Puentes y Estructuras, se convirtieran en autores y custodios de la primera norma sobre puentes.

Hoy en día en el ámbito del diseño de puentes en Estados Unidos y en gran parte del mundo donde rigen las normativas norteamericanas, los ingenieros pueden optar entre dos normas para guiarse en sus diseños, las tradicionales *AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges* y el documento alternativo *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* junto con su norma complementaria *AASHTO LRFD Bridge Construction Specifications* (AASHTO, 1998, p.12).

Presión horizontal del viento sobre las estructuras.

La norma establece que las presiones especificadas son provocadas por una velocidad básica del viento (V_B) de 160 km/h.

La carga de viento está uniformemente distribuida sobre el área expuesta al viento. El área expuesta será la sumatoria de las áreas de todos los componentes, incluyendo el sistema de piso y las barandas, vistas en elevación y perpendiculares a la dirección de viento supuesta. Esta dirección se deberá variar para determinar las solicitaciones extremas en la estructura o en sus componentes. En el análisis se pueden despreciar las superficies que no contribuyen a la solicitud extrema considerada. Para puentes o elementos de puentes a más de 10.000 mm sobre el nivel del terreno o del agua, la velocidad de viento de diseño, V_{DZ} , se deberá ajustar de la siguiente manera:

$$V_{DZ} = 2,5V_0 \left(\frac{V_{10}}{V_B} \right) \ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) \quad (1.15)$$

V_{DZ} = velocidad de viento de diseño a la altura de diseño, Z (km/h).

V_{10} = velocidad del viento a 10.000 mm sobre el nivel del terreno o sobre el nivel de agua de diseño (km/h).

V_B = velocidad básica del viento igual a 160 km/h a una altura de 10.000 mm, con la cual se obtienen las presiones de diseño.

Z = altura de la estructura en la cual se están calculando las cargas de viento, medida desde la superficie del terreno o del nivel del agua, > 10.000 mm.

V_0 = velocidad friccional, característica meteorológica del viento tomada como se especifica en la Tabla 1 para diferentes características de la superficie contra el viento (km/h).

Z_0 = longitud de fricción del "fetch" o campo de viento aguas arriba, una característica meteorológica del viento.

Tabla 1.4 Valores de velocidad friccional (V_0) y de longitud de fricción del "fetch" o campo de viento aguas arriba. Fuente: AASHTO. 2007

Condición	Terreno Abierto	Área Suburbana	Área Urbana
V_0 (km/h)	13,2	17,6	19,3
Z_0 (mm)	70	1000	2500

V_{10} se puede establecer a partir de:

- Cartas de Velocidad Básica del Viento disponibles en ASCE 7-2005.
- Relevamientos de los vientos en el sitio de emplazamiento
- En ausencia de un criterio más adecuado, la hipótesis de que $V_{10} = V_B = 160$ km/h.

A continuación se muestran las definiciones que hace la norma de los términos Terreno Abierto, Área suburbana y Área Urbana tomadas de ASCE 7-93, documento norteamericano que establece el comportamiento del viento sobre las estructuras según investigaciones realizadas y sobre el cual se apoya la AASHTO para establecer sus regulaciones con relación es este carga impuesta por la naturaleza:

- Terreno abierto – Terreno abierto con obstrucciones dispersas de altura generalmente menor que 10.000 mm. Esta categoría incluye los terrenos llanos abiertos y las praderas.
- Área suburbana – Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosas obstrucciones poco separadas del tamaño de una vivienda unifamiliar o mayores. El uso de esta categoría se limitará a aquellas áreas en las cuales la característica representativa predomina en una distancia de al menos 500.000 mm en la dirección contra el viento.
- Área urbana – Centro de grandes ciudades donde al menos 50 por ciento de las construcciones tienen una altura superior a 21.000 mm. El uso de esta categoría se limitará a aquellas áreas en las cuales la característica representativa predomina en una distancia de al menos 800.000 mm en la dirección contra el viento. Se deberán tomar en cuenta los posibles efectos túnel de las

presiones de viento incrementadas que se podrían originar si el puente o la estructura están ubicados próximos a estructuras adyacentes.

En la figura 1.7 se muestra un fragmento del gráfico extraído del ASCE 7-05 que muestra la isolínea de velocidad básica (V_{10}) más cercana a Cuba $V_{10} = 150\text{mph} = 240\text{km/h}$. Existen también los llamados Mapas de Vientos del Caribe que contienen curvas similares a las presentadas en la figura para toda la zona geográfica que comprende el caribe. No se tomaron en cuenta estos valores de velocidad porque el mencionado documento no está reconocido por el ASCE-7, de modo que carece de validez para esta investigación.

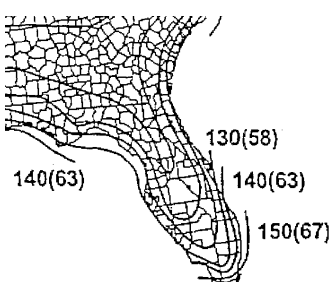


Figura 1.7 Curvas de velocidad básica indicadas por el ASCE 7. Fuente: ASCE 7 2005.

El ASCE 7 define también algunas regiones especiales donde la experiencia práctica ha demostrado que el viento alcanza valores de velocidad básica más elevados que los reflejados en las curvas. Este es el caso de Puerto Rico, donde la velocidad básica es de 145 mph.

Presión del Viento sobre las Estructuras.

Luego de asumir que la dirección del viento es horizontal, la AASHTO define una ecuación para el cálculo de la presión sobre las estructuras en ausencia de datos más precisos que permitan un análisis minucioso del caso de estudio.

$$P_D = P_B \cdot \left(\frac{V_D}{V_B}\right)^2 \quad (1.16)$$

En esta fórmula la presión está en función de la velocidad básica del viento y de la velocidad de diseño. La presión básica P_B para una velocidad $V_B = 160 \text{ km/h}$ está definida por los componentes de la superestructura y la carga a barlovento y sotavento como se muestra en la siguiente tabla extraída de la norma AASHTO.

Tabla 1.5 Valores de presión básica P_B . Fuente: AASHTO. 2003

Componentes de la superestructura	Carga a Barlovento	Carga a Sotavento
Reticulados, Columnas y Arcos	0,0024	0,0012
Vigas	0,0024	NA
Grandes superficies planas	0,0019	NA

Se establece que la carga de viento total no se deberá tomar menor que 4,4 N/mm en el plano de un cordón a barlovento ni 2,2 N/mm en el plano de un cordón a sotavento de un componente reticulado o en arco, ni se deberá tomar menor que 4,4 N/mm en componentes de vigas o vigas cajón. “Las presiones especificadas se deberían seleccionar de manera de producir la mayor carga de viento neta sobre la estructura” (AASHTO. 2007).

Asimismo se define la presión básica P_B para una velocidad $V_B = 160$ km/h en función del ángulo de ataque del viento hacia la estructura.

Tabla 1.6 Valores de presión básica P_B en función del ángulo de impacto. Fuente: AASHTO. 2007

Ángulo de oblicuidad del viento	Reticulados, Columnas y Arcos		Vigas	
	Carga lateral	Carga longitudinal	Carga lateral	Carga longitudinal
Grados	MPa	MPa	MPa	MPa
0	0,0036	0,000	0,0024	0,000
15	0,0034	0,0006	0,0021	0,0003
30	0,0031	0,0013	0,0020	0,0006
45	0,0023	0,0020	0,0016	0,0008
60	0,0011	0,0024	0,0008	0,0009

Fuerzas aplicadas directamente a la subestructura

Para calcular las fuerzas transversales y longitudinales que afectan directamente a la subestructura se debe partir de una presión básica del viento supuesta de 0,0019 MPa. Para direcciones del viento oblicuas respecto a la estructura, esta fuerza se deberá resolver en componentes perpendiculares a las

elevaciones posterior y frontal de la subestructura. La componente perpendicular a la elevación posterior deberá actuar sobre el área de subestructura expuesta tal como se la ve en la elevación posterior, mientras que la componente perpendicular a la elevación frontal deberá actuar sobre las áreas expuestas y se deberá aplicar simultáneamente con las cargas de viento de la superestructura.

Presión del viento sobre los vehículos.

La presión del viento de diseño se deberá aplicar tanto a la estructura como a los vehículos. “La presión del viento sobre los vehículos se debe representar como una fuerza interrumpible y móvil de 1,46 N/mm actuando normal a la calzada y a 1800 mm sobre la misma, y se deberá transmitir a la estructura” (AASHTO. 2007). Estos valores tienen en cuenta las características del vehículo de diseño para carreteras que establece la propia AASHTO. Si el viento sobre los vehículos no se considera normal a la estructura, las componentes de fuerza normal y paralela aplicadas a la sobrecarga viva se toman considerando el ángulo de oblicuidad con respecto a la normal a la superficie. Así lo muestra la siguiente tabla.

Tabla 1.7 Valores de presión sobre el vehículo en función del ángulo de impacto. Fuente: AASHTO. 2007

Angulo de oblicuidad	Componente normal	Componente paralela
Grados	N/mm	N/mm
0	1,46	0,00
15	1,28	0,18
30	1,20	0,35
45	0,96	0,47
60	0,50	0,55

Presión vertical del viento.

A menos que se determine que el puente en cuestión no es sensible al viento, se deberá considerar una fuerza de viento vertical ascendente de $9,6 \times 10^{-4}$ MPa por el ancho del tablero, incluyendo los parapetos y aceras, como una carga lineal longitudinal. Esta fuerza se deberá aplicar sólo para los estados límites que no involucran viento actuando sobre la sobrecarga, y sólo cuando la dirección del viento se toma perpendicular al eje longitudinal del puente. Dicha fuerza lineal se deberá aplicar en el punto correspondiente a un cuarto del ancho del tablero horizontal especificada. Esta carga puede ser determinante cuando se investiga el vuelco del puente.

Control de Respuestas Dinámicas.

Los puentes y sus componentes estructurales, incluidos los cables, se deberán diseñar de manera de estar libres de daños por fatiga provocados por oscilaciones. Los estudios para lograr este fin pueden realizarse utilizando la modelación matemática de multifísica o por modelos a escala con túnel de viento.

Túnel de Viento

El túnel de viento es una herramienta creada con el fin de modelar el comportamiento de un cuerpo ante la incidencia del viento sobre él. Resulta de gran eficacia porque se reproducen a escala las condiciones naturales a las que va estar sometido dicho objeto. Su funcionamiento consiste en que el objeto o modelo, permanece estacionario mientras se propulsa el paso de aire o gas alrededor de él.

El aire es soplado o aspirado a través de un conducto equipado con rejillas estabilizadoras al comienzo para garantizar que el flujo se comporte de manera laminar, o con obstáculos u otros objetos si se desea que se comporte de forma turbulenta. Los modelos se montan para su estudio en un equipo llamado balanza a la cual están adosados los sensores que brindan la información necesaria para calcular los coeficientes de sustentación y resistencia, necesarios para conocer si es factible o no emplear el modelo en la vida real.

Aplicación al caso de estudio del puente del Abra del Yumurí.

Se realiza el cálculo de la carga unitaria total siguiendo el procedimiento indicado por la NC y por la ASHTOO a fin de exponer los diagramas de presiones resultantes de ambos enfoques. Para ello se definen los coeficientes que intervienen en el análisis dispuesto por ambas normas y se explican las consideraciones asumidas para este propósito.

Cálculo de la presión ejercida por el viento sobre el tablero según la Norma Cubana 285: 2003.

Para el cálculo de la carga de viento la norma cubana establece la siguiente fórmula:

$$q = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_f \quad (2.1)$$

En esta ecuación q es la carga unitaria total y esta expresada en KN/m^2 . El factor q_{10} es la presión básica del viento imperante en la zona donde se ubica la obra. Los demás factores son (en el orden en que aparecen): coeficiente de recurrencia, coeficiente de topografía o sitio, coeficiente de altura, coeficiente de ráfaga, coeficiente de reducción y coeficiente de forma.

Determinación de los coeficientes q_{10} , C_t , C_s .

Presión básica (q_{10})

La provincia de Matanzas se encuentra ubicada en la zona 1 definida por la norma NC 285.2003, por lo que le corresponde una presión básica de $1,3\text{KN/m}^3$.

Coeficiente de recurrencia (C_t)

Este coeficiente se encarga de ajustar los valores que ofrece la norma de presión básica, ya que estos fueron determinados a partir de un período de recurrencia de 50 años, es decir, que existe la probabilidad de que se incremente la velocidad de diseño al menos una vez cada 50 años ((Meli Piralla, 1985, p.207). Para obras de significativa importancia como el caso de estudio, se escoge un período de recurrencia de 100 años, lo que, según la NC en la tabla 1 de la página 2, arroja un valor del C_t de 1,15.

Coefficiente de sitio (C_s)

Se considera que la estructura está ubicada en un "sitio expuesto" por estar en un valle estrecho de frente al mar sin obstáculos que se interpongan. Por tanto se toma un coeficiente de sitio de 1,10.

Categoría del terreno

El terreno donde se ubica la obra se considera **Tipo A** puesto que es un terreno abierto con obstáculos y edificaciones que no superan los 10 m, además de estar situado a menos de 500 metros de la línea de mar.

Coefficiente de altura C_h .

El coeficiente de altura es un factor que introduce en el análisis la altura real que posee la edificación. Para la determinación del mismo, teniéndose una altura de 65m se debe interpolar como lo indica la norma.

Tabla 2.1 Fragmento extraído de la tabla 4 de la página 5 de la NC 285. 2003

Altura (m)	Tipo de terreno		
	A	B	C
De 0 a 5	0,80	0,48	0,19
60	1,77	1,43	0,98
70	1,86	1,53	1,08

El valor se encuentra entre 70m y 60m, por lo tanto, una vez hecha la interpolación y de acuerdo a la categoría de Terreno A, $C_h = 1,815$

Incremento de la velocidad del viento encima de colinas y acantilados

La NC plantea que en colinas y acantilados se produce un incremento de la velocidad del viento, lo que hace necesario ajustar el valor del coeficiente de altura obtenido anteriormente correspondiente a un terreno tipo A y a una altura de 65m multiplicándolo por un factor $(1 + \Delta S_z)^2$ donde ΔS es el incremento de la velocidad normativa del viento.

$$C_{hmod} = C_h \left[1 + \Delta S_{zmax} \left(1 - \frac{|x|}{k_{red} L_H} \right) e^{-\left(\frac{a \times z}{L_H} \right)} \right]^2 \quad (2.2)$$

C_h : coeficiente de altura para un terreno llano (categoría A) dado por la tabla que aparecen en el epígrafe 2.1.2.

$\Delta S_{z_{max}}$: factor relativo de incremento de la velocidad en la cresta cerca de la superficie. Se debe señalar que el factor relativo de incremento de la velocidad afecta principalmente a la velocidad normativa del viento y no a sus efectos de turbulencia.

a: coeficiente de decaimiento del incremento de la velocidad del viento con la altura.

x: distancia (corriente arriba o abajo del viento) medida desde la cresta hasta la fachada del edificio u obra en metros.

Z: altura sobre el nivel del terreno local en metros.

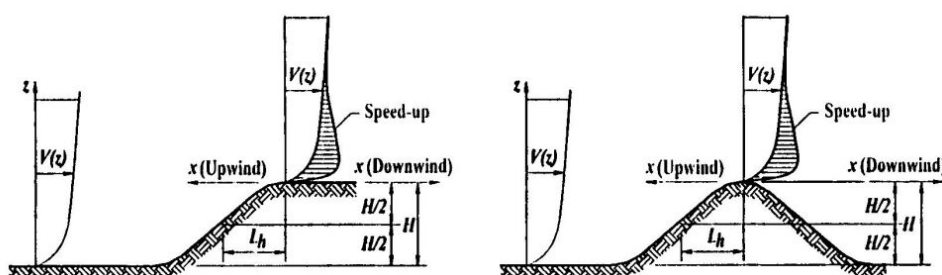


Figura 2.1 Elementos que intervienen en la fórmula 2.2. Fuente: NC 285

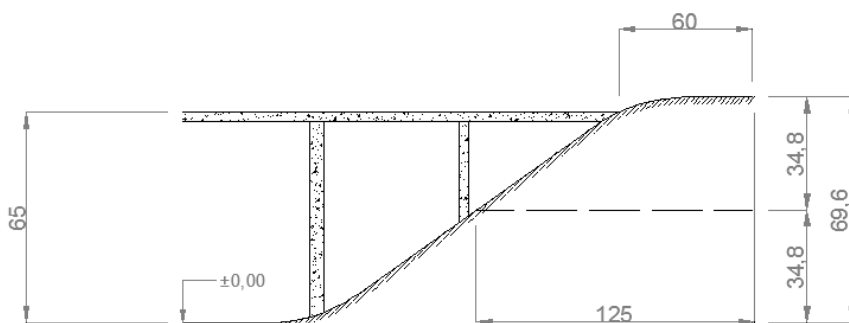


Figura 2.2 Incremento de velocidad aplicado al caso de estudio. Fuente: Elaborado por el autor.

Los factores $\Delta S_{z_{max}}$, a, k_{red} dependen de las formas de las colinas y taludes. Como la obra está ubicada en un acantilado el valor de $\Delta S_{z_{max}}$ es de $1,8 \frac{H}{L_H}$, el de a es 2,5 y k_{red} es 1,5, este último está definido también por el hecho de que en el puente en cuestión la distancia x, cuyo valor es 60m, es positiva (Ver figura 2.2). En el caso del factor $\Delta S_{z_{max}}$, H es la altura de la colina y L_H es la mitad del ancho de la colina (Ver Anexo I).

Determinación del factor $\Delta S_{z_{max}}$

$$\Delta S_{z_{max}} = 1,8 \frac{H}{L_H}$$

$$H = 69,60\text{m}$$

$$\Delta S_{z_{max}} = 1,8 \times \frac{69,6}{125} = 1,0022$$

$$L_H = 125\text{m}$$

$$\Delta S_{z_{max}} = 1,0022$$

La altura Z es de 65m (altura del tablero con respecto a la superficie).

Una vez obtenido el valor numérico de todos los factores que intervienen en la fórmula de incremento de la velocidad del viento encima de colinas y acantilados, se procede a calcular el coeficiente de altura modificado:

$$C_{hmod} = C_h \left[1 + \Delta S_{zmax} \left(1 - \frac{|x|}{k_{red} L_H} \right) e^{-\left(\frac{axz}{L_H}\right)} \right]^2$$

$$C_{hmod} = 1,815 \left[1 + 1,0022 \left(1 - \frac{60}{1,5 \times 125} \right) e^{-\left(\frac{2,5 \times 65}{125}\right)} \right]^2$$

$$C_{hmod} = 2.544$$

Se puede observar que el coeficiente obtenido anteriormente aumenta en un 40% respecto al obtenido mediante la tabla 2.1. Esto indica la importancia que tiene la ubicación de la obra para el análisis de la carga de viento. En este caso, por estar en un acantilado, el incremento de la velocidad de los vientos provoca que aumente la presión a la que estarán sometidos los elementos.

Coefficiente de ráfaga (C_r).

El coeficiente de ráfaga es un factor que expresa numéricamente la naturaleza fluctuante de los vientos. Depende del tipo de terreno y de la altura con respecto al terreno del elemento que se esté evaluando. Su determinación se hace mediante la tabla siguiente:

Tabla 2.2 Fragmento extraído de la tabla 6 de la página 7 de la NC 285. 2003

Altura (m)	Tipos de terreno		
	A	B	C
□ 10	1,22	1,46	1,90
60	1,08	1,17	1,30
70	1,07	1,15	1,27

Para un terreno tipo A y una altura de 65m se hace preciso interpolar. Una vez realizada la interpolación se obtiene como resultado que el coeficiente de ráfaga es 1,075.

Se observa como el valor de este coeficiente está bien próximo a la unidad, lo que significa que sería irrelevante para el cálculo de la presión. Esto corresponde al comportamiento que presenta el viento a la altura que se está analizando. A esta altura el viento se más estable y la probabilidad de que ocurra una ráfaga cuya velocidad se encuentre muy por encima de la velocidad promedio de los vientos es baja.

Coeficiente de reducción (C_{ra}).

Este coeficiente depende del área de la superficie que se encuentra expuesta al flujo de viento y de la altura del elemento con respecto al terreno, en este caso las aguas del río Yumurí. Su función es ajustar el valor numérico de la presión sobre el elemento de acuerdo a la superficie que este presenta expuesta y a la altura que se encuentra el mismo. Esto hace que el análisis se acerque más a las condiciones reales específicas que le son particulares a cada proyecto y evita la sobreestimación de los efectos reales en la estructura. El proceder para llegar al valor de este coeficiente se explica mediante el siguiente gráfico de la NC:

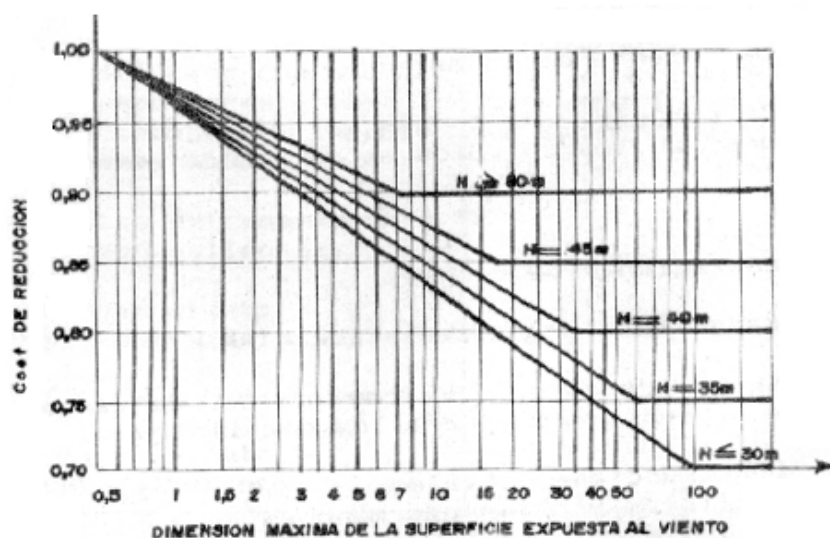


Figura 2.3 Determinación del coeficiente de reducción. Fuente: NC 285. 2003

Se entra en el gráfico con la mayor dimensión de la superficie expuesta en el eje de las abscisas y se busca la línea que está definida por la altura en la que se encuentra el elemento, luego se selecciona el valor correspondiente en las ordenadas. Se aprecia que mientras menor es la altura mayor será la reducción a aplicar en la fórmula, (téngase en cuenta que en la misma todos los factores se encuentran multiplicando), esto coincide con el hecho de que mientras menor es la altura menor será la probabilidad de que se produzca una ráfaga cuya velocidad sea lo suficientemente grande para provocar algún daño a la edificación.

En este caso se tienen dos elementos a los cuales asignarles su coeficiente de reducción correspondiente:

- 1- Vigas
- 2- Tablero

Determinación del C_{ra} de las vigas

Este coeficiente se encuentra estrechamente relacionado con la dirección que tiene el viento y el ángulo con que impacta la superficie, ya que esto define cual será la propia superficie expuesta. En el caso de las vigas tendremos que las dos exteriores son las que se encuentran en contacto directo con el viento cuando este incide de forma normal a la superficie lateral del alma, por lo que ambas tendrán el mismo valor de presión. El efecto provocado por la incidencia de los vientos de abajo hacia arriba, es decir, por la superficie inferior de las alas, se desprecia en lo concerniente al análisis individual del elemento viga, ya que la superficie expuesta no es significativa, lo que implica que este elemento no sufrirá afectación alguna, sin embargo los esfuerzos producidos por este efecto se transfieren de la viga al tablero, de modo que será tratado en el caso del tablero y se trabajará con el área total de la superficie del mismo.

Con una longitud de 45m y una altura de 62 metros se tiene que el coeficiente de reducción correspondiente a las vigas es de 0.9, esto significa que se reduce en un 10% la presión.

Determinación del C_{ra} del tablero

En este caso tenemos más de una situación en que el viento se manifiesta de forma diferente (cuando incide horizontalmente o verticalmente) pero en cualquier caso el coeficiente de reducción será el mismo ya que la mayor dimensión siempre será 297m que es largo del tablero.

Con una longitud de 297 y una altura de 64m se tiene que el coeficiente reductor correspondiente al tablero es de 0.9. Igual al anterior, de lo cual podemos concluir que a esta altura el incremento de la longitud expuesta no tiene influencia en este coeficiente.

Coeficiente de forma (C_f).

Para realizar un análisis correcto es preciso la definición del coeficiente de forma para cada elemento que compone la estructura, de modo que cada elemento tendrá su coeficiente de forma que varía de acuerdo a las características particulares de cada uno.

Determinación del coeficiente de forma para las Vigas.

A continuación se procede al estudio de las vigas bajo el tablero, para ello se expone una breve descripción de dicho elemento extraída de la memoria descriptiva del proyecto.

- Las vigas serán metálicas conformadas mediante soldadura de placas de acero estructural con las propiedades exigidas por el proyecto. Para la determinación de su peralte (h_v) se emplearon los siguientes dos criterios en dependencia de la luz ($L=45$ m) recomendados por diferentes manuales de diseño de este tipo de puente:
 - $h_v \geq 0.033 L$, obteniendo un valor $L = 1.485$ m.
 - $h_v \geq L / 25$, obteniendo un valor $L = 1.800$ m.

Después de varios cálculos preliminares y analizar los valores empleados en otros puentes similares se decidió adoptar un peralto $h_v = 1.600$ m.

Diseño del alma

El espesor del alma es el parámetro principal para desprestigiar el pandeo flexional del alma al diseñar secciones compuestas en flexión positiva. El espesor del alma es fundamental en su rigidización transversal, determinando el espaciamiento de los rigidizadores, lo cual es uno de los aspectos que incrementan apreciablemente los costos y los esfuerzos de fabricación en obra. Por esta razón se seleccionó, en consecuencia con la bibliografía consultada, una relación entre peralto (h_v) y el espesor del alma (t_w) de $1/80$, es decir: $t_w = h_v/80$. De este modo se tiene que: $t_w = 1600/80\text{mm} = 20\text{mm}$.

Diseño de las alas

El diseño de las alas consiste en determinar su ancho (b_f) y su espesor (t_w). El ancho preliminar se estimó dentro del rango establecido por la relación empírica entre el valor del peralto de la viga y su ancho: $b_f = \text{rango}(h_v/3, 0, h_v/4)$, es decir, valores comprendido entre 533 mm y 400 mm. Se adoptó un valor de 500 mm.

El espesor del ala preliminar se estimó dentro del rango establecido por la relación empírica entre el valor del ancho del ala y su espesor: $t_f = \text{rango}(b_{vf}/16, 0, b_f/24)$, es decir, valores comprendido entre 31 mm y 20 mm. Preliminarmente se adoptó un valor de 20 mm. Finalmente se adoptó un valor de 22 mm.

La NC plantea que en el caso de existir varias cerchas o vigas colocadas de forma paralela el coeficiente de forma de estas, comenzando por la segunda, es afectado por un coeficiente reductor, de manera que la primera viga expuesta al viento va a tener un coeficiente mayor a las demás y este va ir disminuyendo por cada viga, así la última tendrá el menor coeficiente. En el caso de estudio las dos extremas tendrán el mismo valor máximo de presión y las dos restantes tendrán un mismo valor pero menor al antes mencionado, ya que no se encuentran directamente expuestas.

Determinación del coeficiente de forma para la primera viga.

Para la primera viga el coeficiente de forma se calcula de esta manera:

$$C_f = \frac{\sum C_{fi} \cdot a_i}{A} \quad (2.3)$$

Dónde:

$\sum a_i / A$: coeficiente de llenado de la cercha.

a_i : área de proyección del elemento de la cercha sobre su plano (m^2).

C_{fi} : coeficiente de forma del elemento de la cercha.

A: Área bruta de la cercha, calculada según perímetro exterior, $A = L \times h$ (m²).

Como el elemento en cuestión es una viga que no posee ningún vano el coeficiente de llenado de la cercha es 1, ($\sum a_i / A = 1$). Así, se tiene que:

$$C_f = C_{fl} \quad (2.4)$$

Para calcular C_{fl} se procede de la siguiente forma:

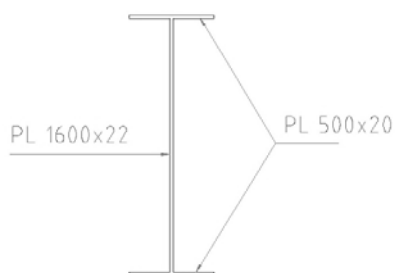


Figura 2.4 Perfil metálico utilizado en el proyecto. Fuente: Elaboración propia

En la tabla 11 de la NC 285 se seleccionó el perfil que muestra la figura 2.5, por ser el que describe con mayor exactitud las características de la sección de las vigas que ocupa este análisis.

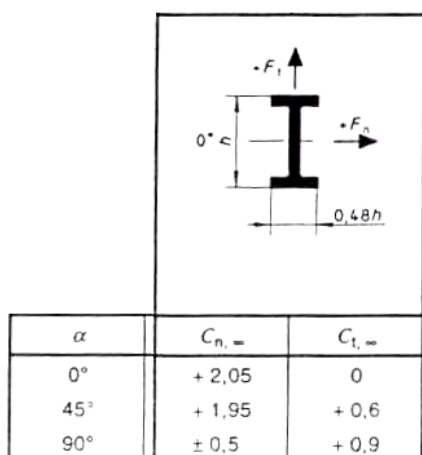


Figura 2.5 Perfil que se corresponde con las vigas del caso de estudio. Fuente: NC 285

La norma establece que, al impactar la superficie expuesta, la fuerza provocada por el viento es la resultante de dos componentes, una normal a dicha superficie y otra tangencial, de modo que define un coeficiente de forma correspondiente para cada caso. Estos coeficientes son $C_{n,\infty}$ (coeficiente de forma para la componente normal) y $C_{t,\infty}$ (coeficiente de forma para la componente tangencial).

Se obtiene C_f como sigue:

$$C_f = C_{fl}$$

$$C_{fl} = C_{n,\infty}$$

$$C_{n,\infty} = 2.05$$

El coeficiente de forma para esta viga es $C_f = 2.05$

Determinación del coeficiente de forma para la segunda viga.

Para calcular el coeficiente de forma de las dos vigas restantes basta con multiplicar el coeficiente de forma de la primera por el factor reductor N que se extrae de la tabla 1.3 teniendo como datos de partida el coeficiente de llenado $\Sigma a_i/A$ (en el caso de estudio este tiene un valor de 1 porque se trata de una viga de alma llena), la distancia que se encuentra una viga de otra ($b = 3.3\text{m}$) y la altura de las vigas ($h = 1.6\text{m}$).

$$b/h = 3.3\text{m}/1.6\text{m} = 2.0625$$

Se obtiene un coeficiente de $N = 0.3$

Calculando el coeficiente de forma correspondiente se obtiene:

$$C_{n,\infty} = 2.05 \times 0.3$$

$$C_{n,\infty} = 0.615$$

Determinación del coeficiente de forma para la losa de tablero.

Para definir el coeficiente correspondiente a la losa se tienen tres casos:

- 1- Viento lateral cuya fuerza incide sobre la superficie en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el tablero exista vehículo.
- 2- Viento lateral cuya fuerza incide sobre la superficie en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie en presencia de vehículo sobre el tablero.
- 3- Viento cuya fuerza incide verticalmente sobre la superficie inferior del tablero en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el tablero exista vehículo. Este caso implica que se produzca un efecto de levante sobre el tablero.

Se expone a continuación una breve descripción de la losa de tablero del puente.

Está conformada de hormigón armado y presenta las siguientes dimensiones:

- El espesor de la losa es de 30cm.

- El ancho es de 12.3m
- El largo es de 297m

Viento lateral cuya fuerza incide sobre la superficie expuesta en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el puente exista vehículo.

Para una mayor comprensión de la situación descrita anteriormente, la norma expone el gráfico donde muestra las fuerzas que intervienen sobre el tablero de un puente de viga y losa.

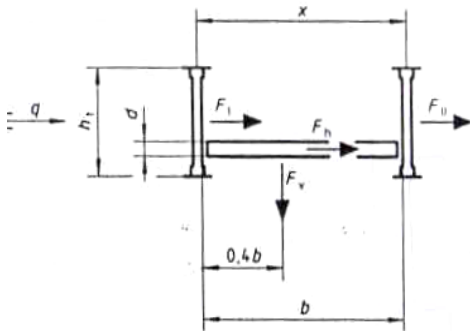


Figura 2.1 Tablero bajo la influencia de la carga de viento sin vehículo sobre el mismo. Fuente: NC 285

Las fuerzas que intervienen son:

F_I : Fuerza sobre la viga de barlovento.

F_{II} : Fuerza sobre la viga sotavento.

F_h : Fuerza horizontal sobre la losa del puente.

F_v : Fuerza vertical sobre la losa del puente.

F_I y F_{II} , ya fueron tratadas en el estudio realizado anteriormente a cada una de las vigas del tablero, por lo que se analizan solo las fuerzas que afectan directamente a la losa. Como el objeto final es llegar a un valor de presión ejercida por el viento, no se tendrán en cuenta en las fórmulas el área del elemento ($F = P \times A$).

Para el cálculo de la presión horizontal y vertical la norma propone dos fórmulas donde el coeficiente de forma es 1 para la presión horizontal y 0,6 para la presión vertical:

$$q_h = 1,0 \cdot (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra}) \quad (2.5)$$

$$q_v = 0,6 \cdot (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra}) \quad (2.6)$$

Viento lateral cuya fuerza incide sobre la superficie en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie en presencia de vehículo sobre el puente.

A continuación se muestra un gráfico extraído de la norma que describe esta situación con mayor claridad:

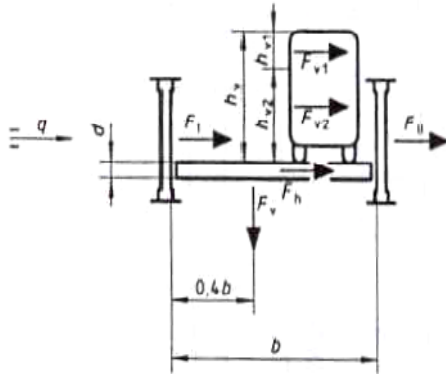


Figura 2.1 Tablero bajo la influencia de la carga de viento sin vehículo sobre el mismo. Fuente: NC 285

En este caso se tienen las fuerzas tratadas con anterioridad más dos fuerzas asociadas al vehículo (F_{v1} y F_{v2}) que la norma define como cargas de transporte.

Aquí las fueras F_1 y F_2 tienen el mismo tratamiento descrito anteriormente, no siendo así para F_h y F_v las cuales se encuentran afectadas por la presencia del vehículo.

La NC define un coeficiente de forma particular para el elemento de acuerdo a la situación, obsérvese que va a ocurrir un incremento del coeficiente de forma producto a la presencia de vehículo sobre el puente. El cálculo de las fuerzas que tienen efecto en la estructura se determinan mediante las fórmulas que se exponen a continuación. Para el cálculo de la presión se sigue el mismo proceder descrito en el caso anterior.

Presión horizontal:

$$q_h = 1,2 \cdot (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra}) \quad (2.7)$$

Presión vertical:

$$q_v = 0,8 \cdot (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra}) \quad (2.8)$$

Cargas de transporte:

Presión por encima de los parapetos (q_{v1})

$$q_{v1} = q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_n \quad (2.9a)$$

Presión por debajo del nivel de las barandas (q_{v2})

$$q_{v2} = \frac{2}{3} \cdot (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_n) \quad (2.9b)$$

Se desprecia la altura de baranda por ser muy pequeña, por lo solo se calcula q_{v1}

Esta presión q_{v1} se aplica en el área del vehículo de diseño (se seleccionó el camión de la norma NC 733:2009 por ser el que mayor área presenta ante la influencia del viento) definida por 15m de largo y $h_v = 3m$ tomado de la tabla de la página 47 de la NC 285 2003. Las presiones q_v y q_h se aplicarán en toda el área de tablero.

El coeficiente que interviene en el cálculo de esta presión depende del tipo de tráfico para el cual es construido el puente.

Viento cuya fuerza incide sobre la superficie inferior del tablero en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el tablero exista vehículo.

Es necesario determinar el coeficiente de forma del elemento teniendo en cuenta el ángulo de incidencia de la fuerza y la superficie expuesta del elemento. Por lo tanto se entra a la tabla 11 de la NC 285 y se escoge la siguiente sección:

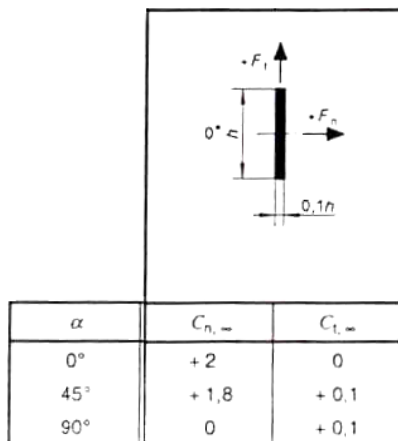


Figura 2.5 Perfil que se corresponde con la losa del tablero del caso de estudio. Fuente: NC 285

Como el elemento que se analiza se encuentra ubicado de forma horizontal con respecto al de la figura, la fuerza que se debe tomar es la que el gráfico define como normal () ya que se está estudiando cuando el viento incide verticalmente sobre la superficie inferior de mayor área del elemento formando un ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie. Aplicando la fórmula 2.4 y con un coeficiente de se tiene:

Cálculo de la presión del viento sobre los elementos del tablero.

Presión en las vigas.

Presión en las vigas situadas en los extremos.

Mediante las dos fórmulas propuestas en la NC se puede calcular la presión que provoca el viento en el elemento.

Componente normal de la fuerza del viento:

$$q = (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_{n,\infty}) \cdot k_{red} \quad (2.10)$$

Componente tangencial de la fuerza del viento:

$$q = (q_{10} \cdot C_t \cdot C_s \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_{ra} \cdot C_{t,\infty}) \cdot k_{red} \quad (2.11)$$

El coeficiente k_{red} se obtiene de la norma con la longitud total (L) del elemento y la longitud de la superficie expuesta al flujo de viento (h).

$$L = 45\text{m}$$

$$h_a = 1.6\text{m}$$

$$L/h_a = 45\text{m}/1.6\text{m} = 28.125$$

Entrando en la tabla de la norma e interpolando se tiene un $k_{red} = 0,804$.

En el caso que ocupa este estudio solo se analiza el viento cuando incide de forma perpendicular a la superficie, de modo que forma un ángulo de 0^0 con respecto a la normal de dicha superficie, esto implica que, como muestra la figura 2.5, no va a tener una componente tangencial. Entonces sustituyendo en la fórmula 2.10

$$q = (1.3 \cdot 1.15 \cdot 1.10 \cdot 2.2544 \cdot 1.075 \cdot 0.9 \cdot 2.05) \cdot 0.804$$

La presión que el viento ejerce sobre la primera viga que encuentra a su paso es de $q = 6.67\text{KN}/\text{m}^2$, por lo tanto ambas vigas situadas en los extremos del tablero van a tener este valor de presión.

Presión en las vigas interiores

Se calcula la presión ejercida sobre la segunda viga utilizando la ecuación 2.10:

$$q = (1.3 \cdot 1.15 \cdot 1.10 \cdot 2.2544 \cdot 1.075 \cdot 0.9 \cdot 0.615) \cdot 0.804$$

La presión del viento sobre la segunda viga es de $q = 1.773\text{KN}/\text{m}^2$, por lo que las dos vigas interiores bajo el tablero tendrán este valor de presión.

Presión en la losa de tablero.

Presión provocada por el viento cuando incide lateralmente sobre la superficie expuesta en ángulo de 0^0 con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el puente exista vehículo.

Sustituyendo en las fórmulas 2.5 y 2.6 se obtienen las presiones horizontales y verticales respectivamente

Presión horizontal:

$$q_h = 1,3 \cdot 1,15 \cdot 1,10 \cdot 2,544 \cdot 1,075 \cdot 0,9$$

$$q_h = 4,04 \text{KN/m}^2$$

Presión vertical:

$$q_v = 0,6 \cdot 1,3 \cdot 1,15 \cdot 1,10 \cdot 2,544 \cdot 1,075 \cdot 0,9$$

$$q_v = 2,42 \text{KN/m}^2$$

Presión provocada por el viento cuando incide lateralmente sobre la superficie expuesta en ángulo de 0^0 con respecto a la normal de dicha superficie con la presencia de vehículo sobre el puente.

Mediante las fórmulas 2.7, 2.8 y 2.9b se calculan las presiones horizontales, verticales y de transporte, respectivamente.

Presión horizontal:

$$q_h = 1,2 \cdot (1,3 \cdot 1,15 \cdot 1,10 \cdot 2,544 \cdot 1,075 \cdot 0,9)$$

$$q_h = 4,85 \text{KN/m}^2$$

Presión vertical:

$$q_v = 0,8 \cdot (1,3 \cdot 1,15 \cdot 1,10 \cdot 2,544 \cdot 1,075 \cdot 0,9)$$

$$q_v = 3,23 \text{KN/m}^2$$

Carga de transporte:

Con tráfico automotor (carretera) se tiene que $C_n = 1,2$.

$$q_{v1} = 1,3 \cdot 1,15 \cdot 1,10 \cdot 2,544 \cdot 1,075 \cdot 1,2$$

$$q_{v1} = 5,4 \text{KN/m}^2$$

Viento cuya fuerza incide sobre la superficie inferior del tablero en ángulo de 0^0 con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el tablero exista vehículo.

Para aplicar la fórmula 2.10 correspondiente a este caso se hace necesario la obtención del coeficiente k_{red} , este se obtiene de la norma con la longitud total (L) del elemento y la longitud de la superficie expuesta al flujo de viento (h).

$$L = 297\text{m}$$

$$h_a = 12,3\text{m}$$

$$L/h_a = 297\text{m}/12,3\text{m} = 24,14$$

Entrando en la tabla de la norma e interpolando se tiene un $k_{red} = 0,777$.

Con un $C_f = 2$ Se calcula la presión:

$$q = (1.3 \cdot 1.15 \cdot 1.10 \cdot 2.544 \cdot 1.075 \cdot 0.9 \cdot 2) \cdot 0,777$$

$$q = 6,29 \text{ KN/m}^2$$

2.1.7 Esquema de presión sobre la sección del tablero del puente.

Presión provocada por el viento cuando incide lateralmente sobre la superficie expuesta en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el puente exista vehículo.

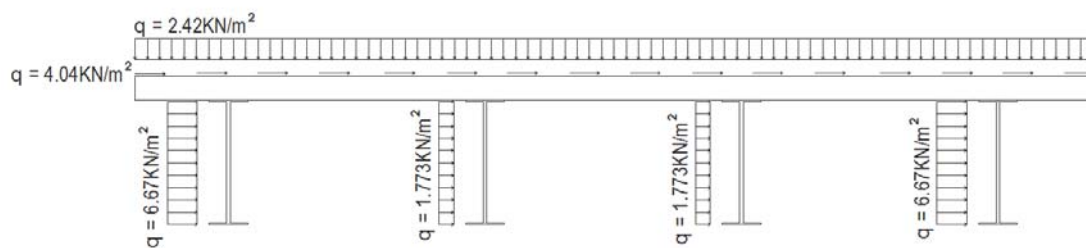


Figura 2.6 Esquema de presiones en ausencia de vehículo. Fuente: Elaborado por el autor

Presión provocada por el viento cuando incide lateralmente sobre la superficie expuesta en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie con la presencia de vehículo sobre el puente.

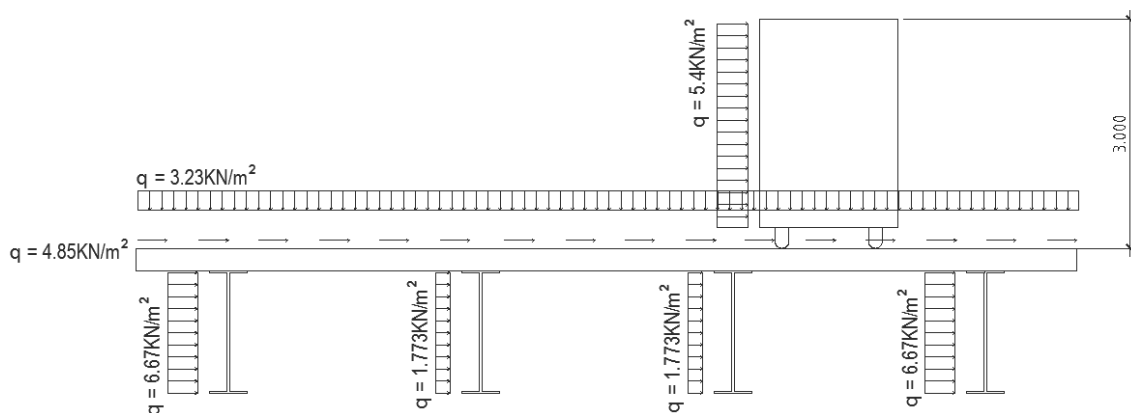
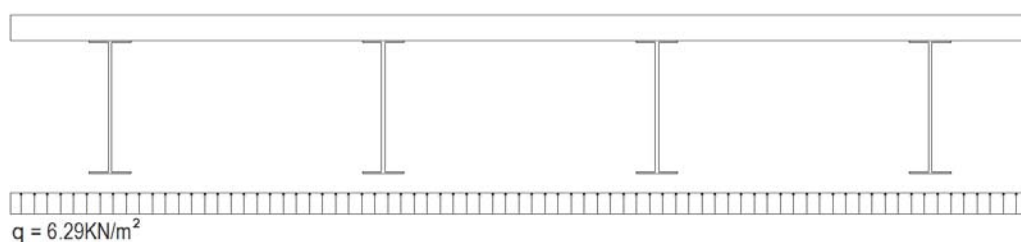


Figura 2.7 Esquema de presiones en presencia de vehículo. Fuente: Elaborado por el autor

Viento cuya fuerza incide sobre la superficie inferior del tablero en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el tablero exista vehículo.

Figura 2.8 Esquema de presiones actuando verticalmente sobre la superficie inferior de la losa. Fuente: Elaborado por el autor



Cálculo de la presión ejercida sobre el tablero según la norma AASTHO LRFD *Bridge Design Specifications 2007*.

Cálculo de la velocidad de diseño.

La norma plantea la siguiente fórmula para el cálculo de la velocidad de diseño:

$$V_{DZ} = 2,5 \cdot V_0 \cdot \left(\frac{V_{10}}{V_B}\right) \cdot \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \quad (2.12)$$

El coeficiente V_0 es la velocidad friccional. Este elemento meteorológico característico del viento se determina en función del tipo de terreno donde esté emplazada la obra. Estas categorías para caracterizar el terreno se encuentran definidas en el epígrafe 1.4.1 del capítulo 1. En el caso de estudio se asume un terreno abierto, luego $V_0 = 13,2 \text{ km/h}$.

La altura Z_0 se define de la misma forma que se determinó V_0 anteriormente. $Z_0 = 70 \text{ mm}$.

Para determinar el coeficiente V_{10} se utilizan las isolíneas del gráfico 6-1 disponible en el ASCE 7 2005 que definen la velocidad del viento a una altura de 10m sobre el terreno. Para el caso específico de Cuba no hay ninguna curva que describa la velocidad básica a utilizar, ya que los estudios realizados para la construcción de este gráfico solo abarcan los territorios estadounidenses. Es por ello que se escoge para realizar el análisis la curva más cercana a nuestro país cuya trayectoria abarca el territorio de la Florida. Esta curva indica un valor para $V_{10} = 150 \text{ mph} = 241,35 \text{ km/h}$. La figura 1.7 del capítulo 1 ilustra de manera gráfica lo antes expuesto.

La velocidad básica V_B es de 160 km/h , la misma se establece a una altura de 10.000 mm , parámetro con el cual la norma obtiene el resto de los coeficientes estandarizados.

La altura Z es la altura que presenta el puente con respecto a las aguas del río cuyo valor es 65000 mm .

Una vez definidos todos los términos que intervienen en la ecuación 2.12 se tiene que:

$$V_{DZ} = 2,5 \cdot 13,2\text{km/h} \cdot \left(\frac{241,35\text{km/h}}{160\text{km/h}}\right) \cdot \ln\left(\frac{65000\text{mm}}{70\text{mm}}\right)$$

$$V_{DZ} = 340\text{km/h}$$

La velocidad de diseño a una altura de 65m es de 340km/h. Se puede observar que es un valor alto en comparación con la velocidad de los vientos máximos sostenidos que afectan la zona. Esto sucede porque la velocidad $V_{DZ} = 340\text{km/h}$ toma en cuenta también las rachas que se pueden producir.

Cálculo de presiones sobre la estructura.

El cálculo de las presiones se realiza mediante la siguiente fórmula:

$$P_D = P_B \cdot \left(\frac{V_{DZ}}{V_B}\right)^2 \quad (2.13)$$

La presión básica depende de los elementos que conforman la estructura, en el caso de estudio se tiene un puente cuyo tablero está compuesto por viga y losa, por lo que se selecciona en la tabla 1.5 del capítulo 1 el componente viga. Luego se tiene una P_B de 0,0024 a barlovento.

$$P_D = 0,0024 \cdot \left(\frac{340\text{km/h}}{160\text{km/h}}\right)^2$$

$$P_D = 0,01084\text{MPa} = 10,84\text{KN/m}^2$$

Presiones sobre la superestructura

Para determinar la presión de diseño sobre la superestructura es preciso conocer la presión básica, para ello se tiene en cuenta el ángulo de impacto del viento sobre la superficie expuesta del elemento que se esté analizando y su valor se mide a partir de un eje normal a la superficie expuesta. Es por eso que en la tabla 1.6 del capítulo 1 se plantean cargas laterales y longitudinales en función del ángulo de impacto que no son más que las componentes de la fuerza provocada por el viento (resultante). Se tiene entonces que para vigas, con un ángulo de incidencia de 0° el valor de la presión básica es de $0,0024\text{MPa} = 2,4\text{KN/m}^2$. Luego la presión de diseño es de $10,84\text{KN/m}^2$.

Presión del viento sobre los vehículos

Para determinar la presión del viento sobre la estructura con la existencia de vehículo la norma establece que esta se debe representar como una fuerza interrumpible y móvil de 1,46 N/mm actuando normal a la calzada y a 1800 mm sobre la misma, y se deberá transmitir a la estructura. En caso de que el viento no sea perpendicular a los vehículos se dispone de la tabla 1.7 mostrada en el capítulo 1 que establece

valores de fuerza en función del ángulo de impacto del viento. Con un ángulo de oblicuidad de 0° se tiene una fuerza de $1,46\text{N/mm} = 1,46\text{KN/m}$.

Presión vertical del viento.

Esta presión es fundamental en el análisis de la carga de viento ya que describe el efecto de levante que puede producir esta fuerza en puentes que se encuentran a gran altura. Para determinar el valor de la misma se sitúa una fuerza de $9,6 \times 10^{-4}\text{MPa}$ por el ancho del tablero, incluyendo los parapetos y aceras, como una carga lineal longitudinal ($0,96\text{KN/m}^2 \cdot 12,3\text{m} = 11,808\text{KN/m}$). Esta carga adquiere su valor más desfavorable para la estructura cuando por encima del tablero no hay ninguna carga en sentido contrario a la tratada que contrarreste su efecto. La norma plantea que dicha carga debe ser aplicada en la sección transversal del tablero a $\frac{1}{4}$ de la longitud de esta. Teniendo un ancho del tablero de $12,3\text{m}$, el punto de aplicación de esta carga es $12,3\text{m} \cdot \frac{1}{4} = 3,075\text{m}$.

A continuación se muestran los esquemas de las presiones de acuerdo a los casos presentados.

Diagramas de presiones correspondientes a las situaciones antes descritas.

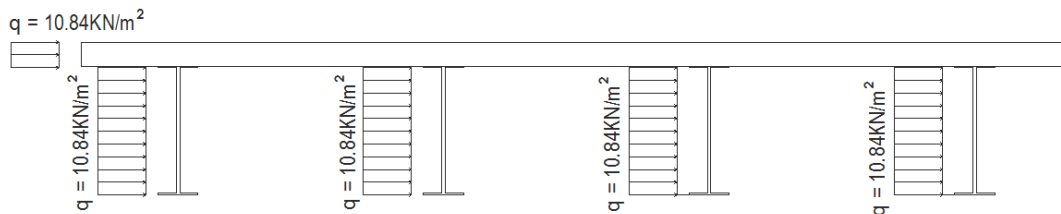


Figura 2.9 Esquema de presiones en ausencia de vehículo según AASHTO. Fuente: Elaborado por el autor

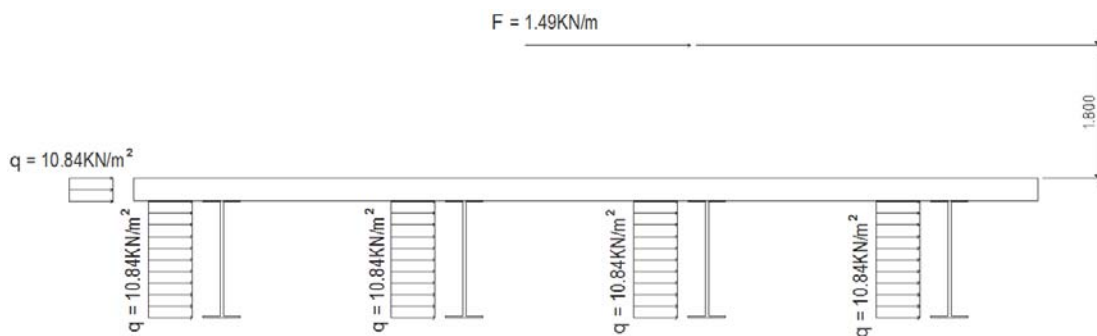


Figura 2.10 Esquema de presiones en presencia de vehículo según AASHTO. Fuente: Elaborado por el autor.

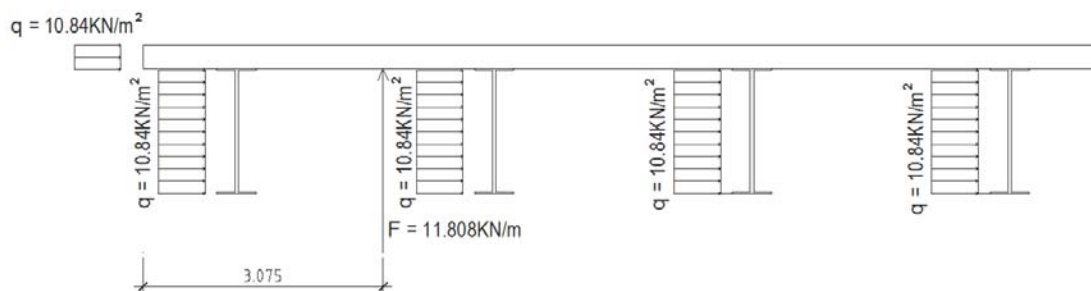


Figura 2.11 Esquema de presiones actuando verticalmente sobre la superficie inferior de la losa según AASHTO. Fuente: Elaborado por el autor

Análisis de los resultados.

Se trata en un primer momento las consideraciones que se tuvieron para realizar el modelo del puente bajo la influencia de las cargas de viento calculadas en el capítulo 2 utilizando la herramienta informática SAP 2000. Posteriormente se explican los gráficos de momento obtenidos siguiendo el proceder de las normas NC 285 y AASHTO y se comparan los resultados a fin de explicar las particularidades de ambos documentos normativos.

Modelación del puente con las cargas calculadas en el Capítulo 2.

El puente se modeló haciendo uso de la eficaz herramienta que brinda la informática para estos casos, donde, por la complejidad de la estructura, realizar el modelo "a mano" sería en extremo engorroso. Para este caso se utilizó el programa SAP 2000 versión 14.1.0 siguiendo el método de los elementos finitos.

Modelación geométrica del puente

Se ha simulado la sección transversal propuesta en el proyecto de conjunto con la interacción entre la estructura de acero y la losa de hormigón. La siguiente figura muestra una vista del modelo obtenido:



Figura 3.1 Vista general del modelo. Fuente: Elaborado por el autor

La sección transversal que se representada en el modelo es la siguiente:

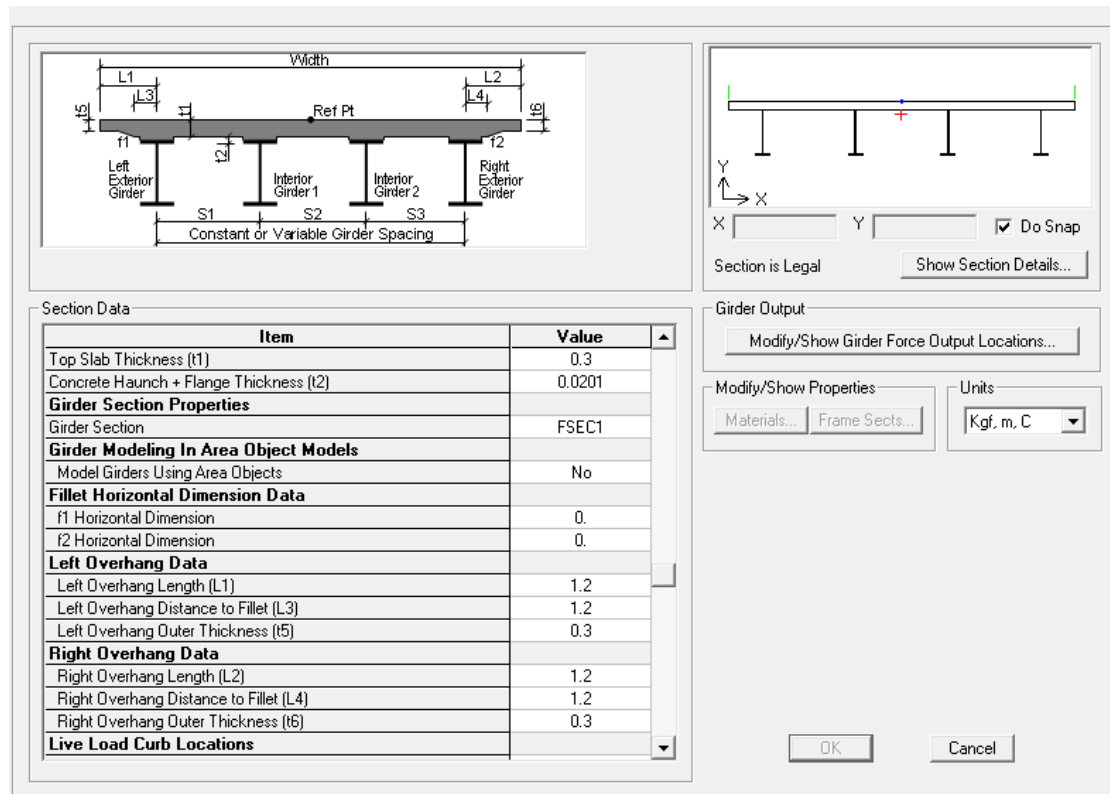


Figura 3.2 Sección transversal definida para el modelo en el SAP 2000. Fuente: Elaborado por el autor

Esto coincide con la geometría del puente definida en las ideas conceptuales del proyecto plasmadas en la memoria descriptiva.

Modelación de materiales

En cuanto a la modelación de los materiales se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- El hormigón utilizado fue de 30MPa
- El acero utilizado fue acero de A992 según ASTM con tensión de fluencia de 50ksi lo que equivale a 350MPa

Solicitaciones según NC

Viento lateral cuya fuerza incide sobre la superficie expuesta en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el puente exista vehículo.

Momento provocado por las fuerzas horizontales

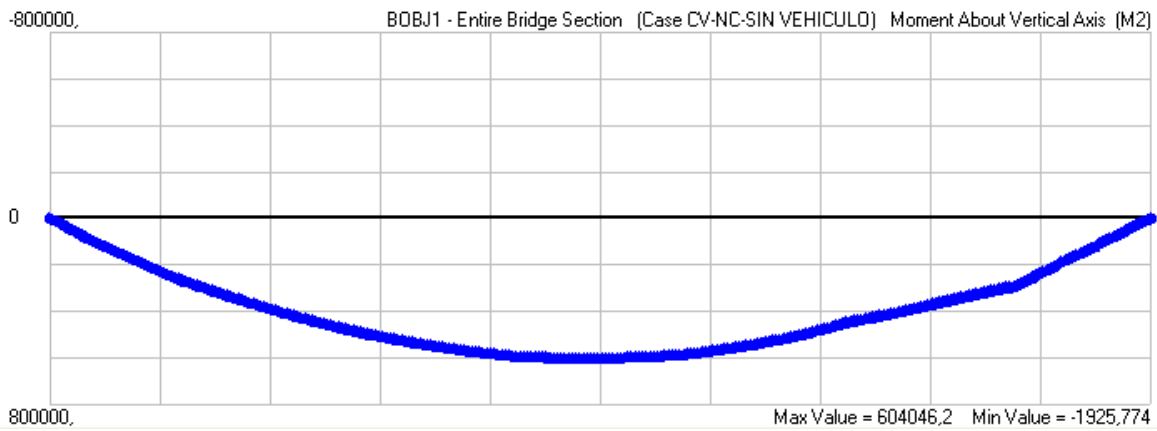


Figura 3.3 Momento alrededor del eje vertical del puente. Fuente: Elaborado por el autor

Momento provocado por las fuerzas verticales

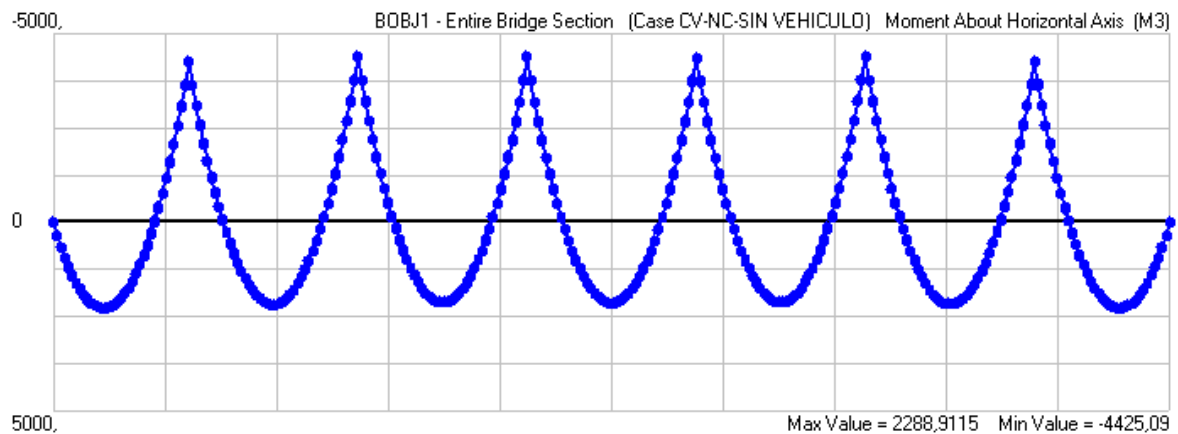


Figura 3.4 Momento alrededor del eje horizontal del puente. Fuente: Elaborado por el autor

Viento lateral cuya fuerza incide sobre la superficie en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie en presencia de vehículo sobre el puente.

Momento provocado por las fuerzas horizontales

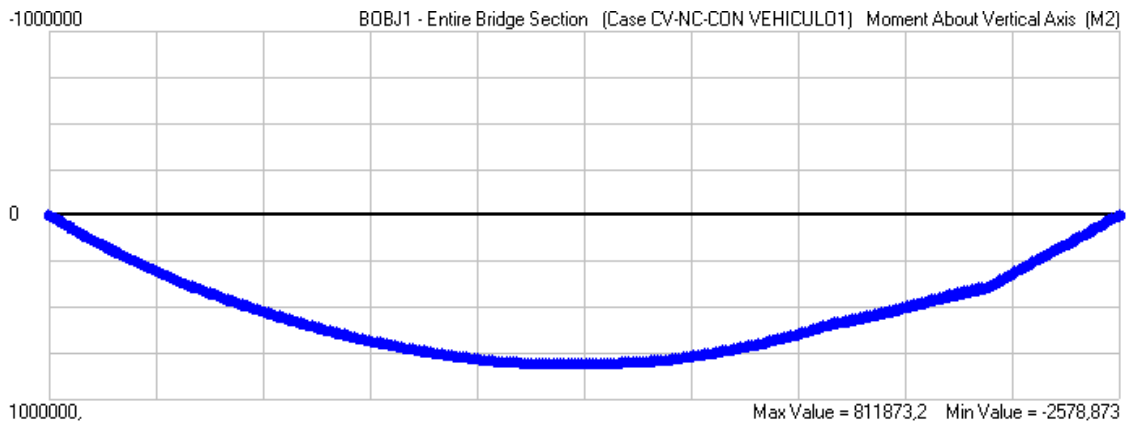
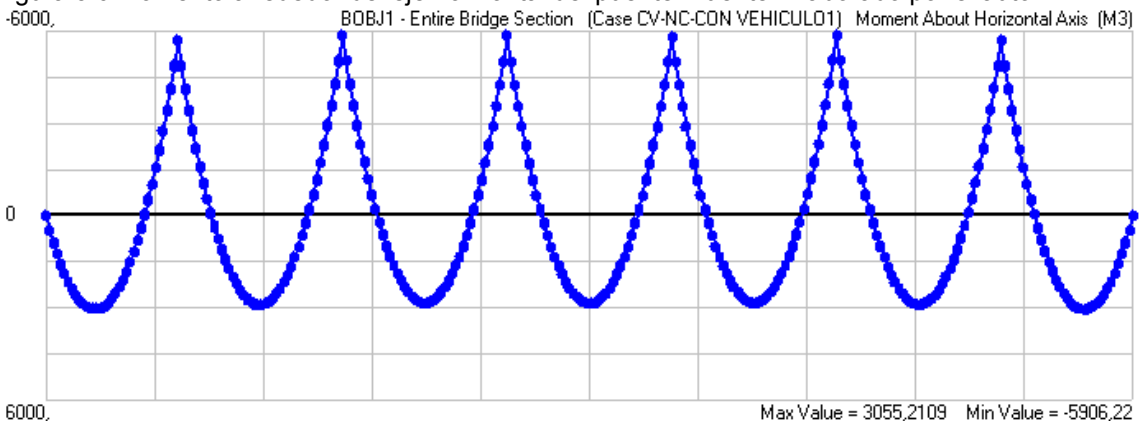


Figura 3.5 Momento alrededor del eje vertical del puente. Fuente: Elaborado por el autor

Momento provocado por las fuerzas verticales

Figura 3.6 Momento alrededor del eje horizontal del puente. Fuente: Elaborado por el autor



Viento cuya fuerza incide sobre la superficie inferior del tablero en ángulo de 0° con respecto a la normal de dicha superficie sin que sobre el tablero exista vehículo.

Momento provocado por las fuerzas verticales

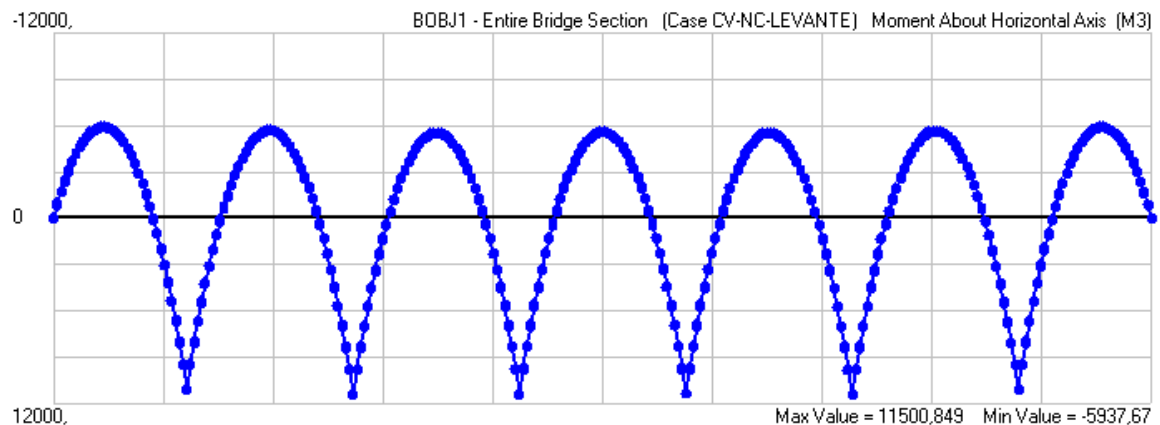


Figura 3.7 Momento alrededor del eje horizontal del puente. Elaborado por el autor

Deformación del tablero



Figura 3.8 Deformación del tablero. Fuente: Elaborado por el autor

La deformación sufrida por el tablero de acuerdo al procedimiento de la NC correspondiente a este caso es uniforme a lo largo del mismo ya que el efecto que se produce es de levante. A diferencia de la norma AAHSTO, en la NC no se consideran efectos de torsión.

Momentos originados por fuerzas horizontales

En los gráficos mostrados, obtenidos a partir del procedimiento descrito por la norma cubana, se observa que los valores máximos de momento positivo provocados por las fuerzas horizontales para los tres casos están definidos dentro del intervalo de 811873,2KN-m a 604046,2KN-m. El valor máximo de momento negativo está comprendido entre 2578,873KN-m y 1925,873. Los momentos negativos provocados por las presiones horizontales son casi nulos en valor en comparación con los positivos y en los gráficos se aprecia como estos existen solo en los extremos de la estructura. Asimismo se muestra como los momentos positivos en general tienen mayor valor ya que las presiones que los originan son considerables y además influyen sobre el área que abarca la losa de tablero cuyas dimensiones describen una superficie extensa. Sin embargo, ante momentos de esta envergadura, la estructura no presenta dificultades ya que la losa, en su ancho (que para este caso trabaja como peralte efectivo igual a 12.3m) es capaz de asumir estos esfuerzos y transmitirlos a la cimentación a través de los estribos, además los perfiles metálicos garantizan el funcionamiento de la misma bajo las condiciones presentadas.

El mayor valor de momento se produce cuando sobre el puente está circulando vehículo. Esto se debe a que se produce un incremento en la presión horizontal producto a la distribución de la presión que influye sobre el vehículo en la superficie de la losa del tablero. Cuando la presión del viento incide de

forma vertical sobre la superficie inferior del tablero, la norma no tiene en cuenta presiones horizontales como se muestra en el esquema de presiones correspondientes a este caso en la figura 2.8, por lo tanto para este caso no hay momento producto a fuerzas horizontales.

Momentos originados por fuerzas verticales

Ante los esfuerzos provocados por las presiones verticales, los gráficos obtenidos muestran como los valores de momento son menores en comparación con los provocados por las presiones horizontales. Esto se debe a que en el plano vertical están las pilas; elementos que aportan gran estabilidad a la estructura ante las presiones verticales. Los máximos positivos van de 11500,849 KN-m a 2288,9115 KN-m correspondiendo el mayor valor al caso donde solo existe sobre la estructura presión vertical, cuya incidencia sobre la superficie inferior del tablero provoca un efecto de levante sobre el mismo.

Los momentos máximos negativos están comprendidos entre 5937,67 KN-m y 4425,09 KN-m. Los mayores valores, tanto positivos como negativos, corresponden al caso que muestra la incidencia de la presión vertical sobre la superficie inferior del tablero.

Solicitaciones según AASHTO

Viento que incide sobre el puente en ausencia de vehículo Momento provocado por las fuerzas horizontales

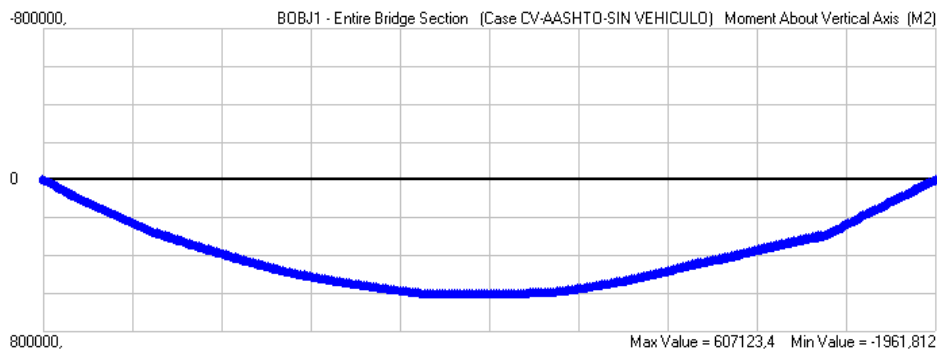


Figura 3.9 Momento alrededor del eje vertical del puente. Elaborado por el autor

Momento provocado por las fuerzas verticales

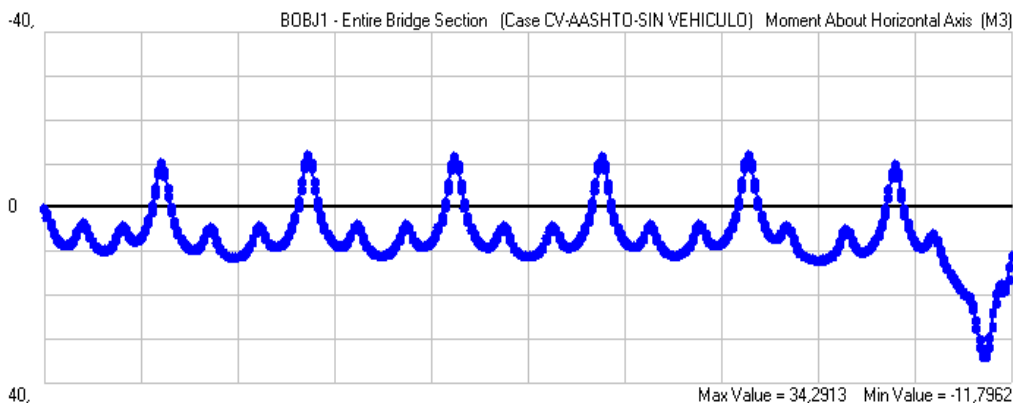


Figura 3.10 Momento alrededor del eje horizontal del puente. Fuente: SAP 2000

Viento que incide sobre la superestructura en presencia de vehículo.

Momento provocado por las fuerzas horizontales

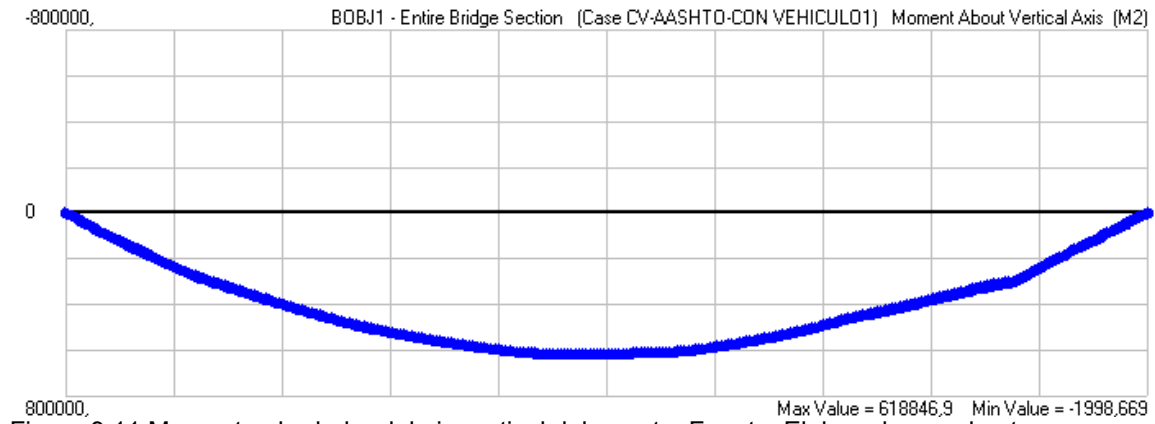


Figura 3.11 Momento alrededor del eje vertical del puente. Fuente: Elaborado por el autor

Momento provocado por las fuerzas verticales

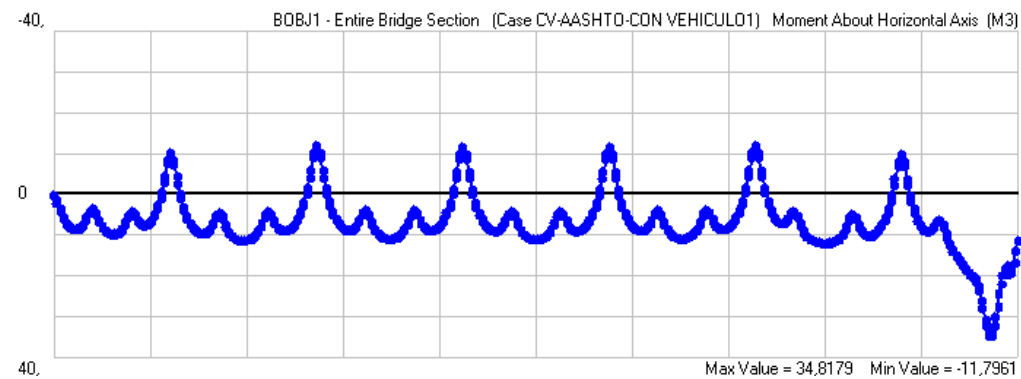
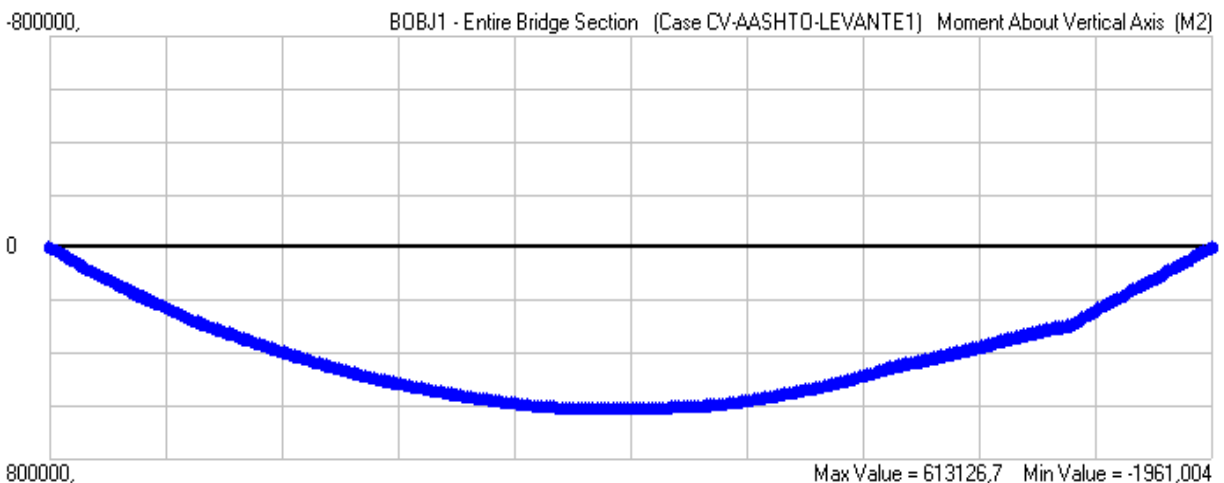


Figura 3.12 Momento alrededor del eje horizontal del puente. Fuente: Elaborado por el autor

Presión vertical del viento actuando en la superficie inferior del tablero.

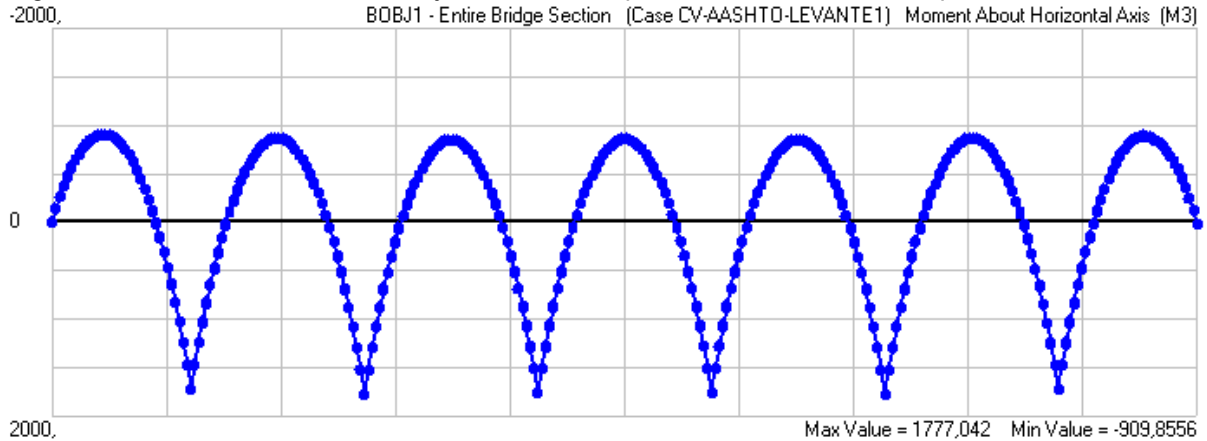
Momento provocado por las fuerzas horizontales

Figura 3.13 Momento alrededor del eje vertical del puente. Fuente: Elaborado por el autor



Momento provocado por las fuerzas verticales

Figura 3.14 Momento alrededor del eje horizontal del puente. Fuente: Elaborado por el autor



Deformación del tablero

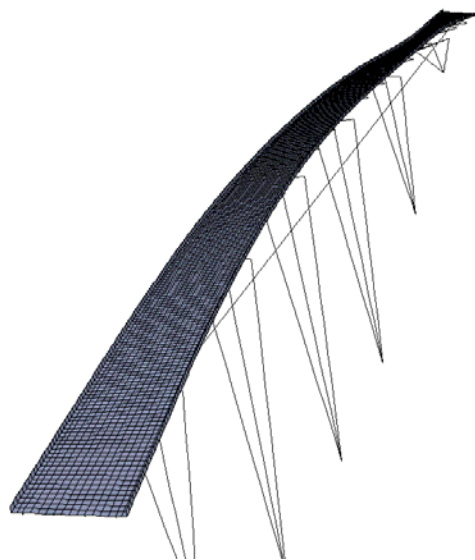


Figura 3.15 Deformación del tablero. Fuente: Elaborado por el autor

Se observa como las presiones que inciden verticalmente sobre la superficie inferior del tablero tienden a torcer el mismo, esto está dado por la excentricidad que presenta la carga con respecto al eje longitudinal del tablero, este hecho muestra los diferentes enfoques de la AASHTO y la NC ante una misma situación

Momentos provocados por fuerzas horizontales

Los valores máximos de momento positivo extraídos de los gráficos están comprendidos entre 618846,93 KN-m y 607123,4 KN-m correspondiendo el valor máximo a la situación donde el puente está bajo la influencia del viento junto al vehículo de diseño propuesto por la AASHTO, y el valor mínimo corresponde a cuando no existe vehículo circulando sobre la estructura. Los momentos negativos están presentes solo en los extremos y van de un valor máximo de 1998,669 KN-m correspondiente al caso que incluye vehículo, hasta un mínimo de 1961,004 KN-m correspondiente a la acción de levante provocado por las presiones verticales cuyo efecto más desfavorable se manifiesta concentradas en $\frac{1}{4}$ de la luz de la sección transversal a fin de provocar efectos de torsión en la estructura como se ve en la figura 3.15, además de las presiones horizontales presentes en los tres casos que se analizaron de acuerdo al proceder de la norma AASHTO. Se observa como para el caso donde hay presencia de vehículo el valor de momento arrojado por la norma cubana es mayor que el de la AASHTO, esto se debe a que la distribución de las presiones horizontales que inciden sobre el vehículo, en la losa del tablero tienen un efecto más desfavorable siguiendo el proceder de la NC, ya que en la misma se asignan valores de presión sobre el vehículo superiores a los estipulados en la AASHTO para esta misma situación, que, sumados con la presión rasante sobre la superficie de la losa, resuelve en valores de presión horizontal altos que provocan un momento superior en valor al obtenido mediante el procedimiento indicado por la AASHTO.

Momentos provocados por fuerzas verticales

En los gráficos originados por las presiones verticales se observa como los valores de momento calculados según el proceder de la AASHTO son ínfimos en comparación con la NC. Este hecho coincide con el análisis realizado para llegar a los gráficos de presiones mostrados en las figuras 2.9, 2.10 y 2.11, los que ilustran como la norma AASHTO no incorpora presiones verticales actuando sobre la superficie superior del tablero, de modo que los gráficos de momento expuestos en las figuras 3.10 y 3.12 son provocados por algunas pérdida de estabilidad que sufre la losa ocasionadas por las presiones horizontales, efecto que se produce debido a que el centroide de las cargas de viento no coincide con el baricentro plástico de la sección transversal del puente, provocando torsiones parásitas que redundan en las flexiones que refleja el modelo. Sin embargo, para el caso donde se tiene un valor máximo de momento mayor que los referidos anteriormente, provocados por la manera en que la norma dispone el cálculo de las presiones verticales actuando en la superficie inferior del tablero. El valor máximo de momento positivo provocado por las fuerzas verticales está comprendido 1777,042KN-m y 34,291KN-m. El primer valor corresponde a la situación donde, además de las presiones horizontales, se considera la carga concentrada en $\frac{1}{4}$ de la luz de la sección transversal y ubicada a lo largo de toda la longitud del puente incidiendo sobre la superficie inferior del tablero y provocando efectos de torsión en la estructura, la figura 3.15 muestra este fenómeno. El segundo valor corresponde al caso donde no se considera vehículo sobre el puente.

El máximo momento negativo tiene un valor de 909,8556KN-m correspondiendo al caso donde se analiza la presión vertical sobre la superficie inferior del tablero (levante), y el menor de 11,961KN-m correspondiente a los casos donde se explican el proceder ante la ausencia y presencia de vehículo sobre el puente, respectivamente.

Envoltentes de momento

Envoltentes según NC

Presiones Horizontales

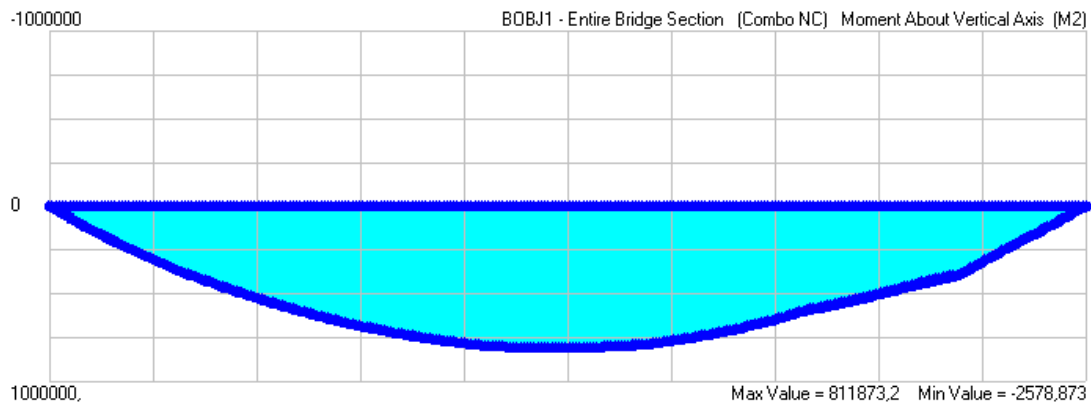


Figura 3.16 Envoltente generada por los momentos alrededor del eje vertical. Fuente: Elaborado por el autor

Presiones Verticales

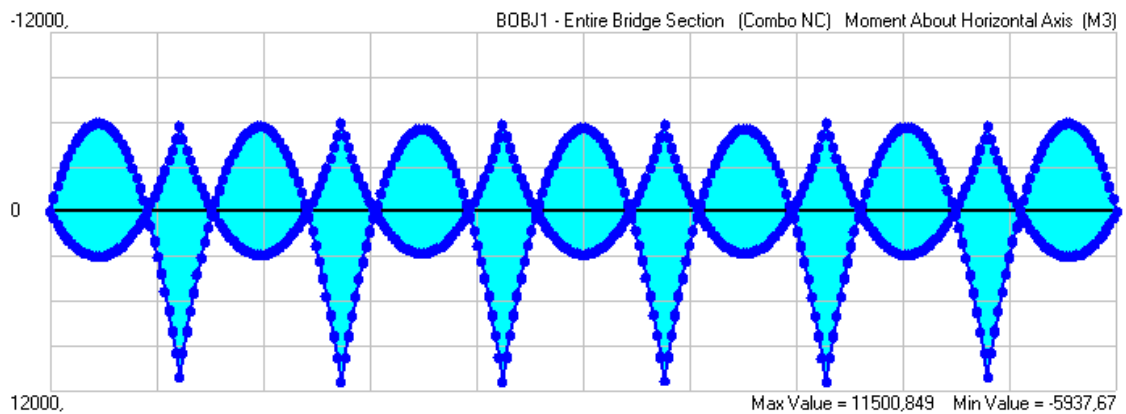


Figura 3.17 Envoltente generada por los momentos alrededor del eje horizontal. Fuente: Elaborado por el autor

Envoltentes según AASTO

Presiones Horizontales

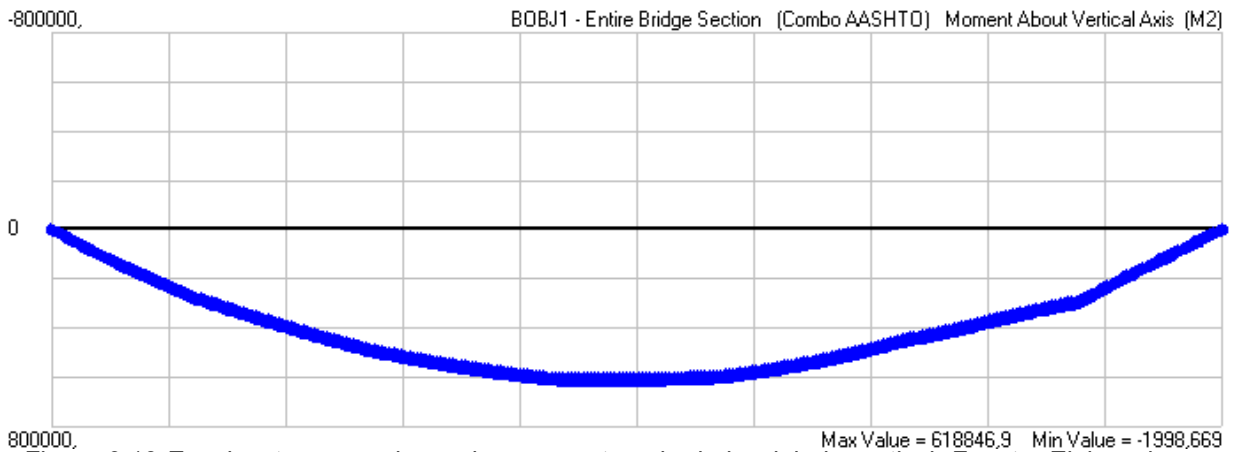


Figura 3.18 Envolvente generada por los momentos alrededor del eje vertical. Fuente: Elaborado por el autor

Presiones Verticales

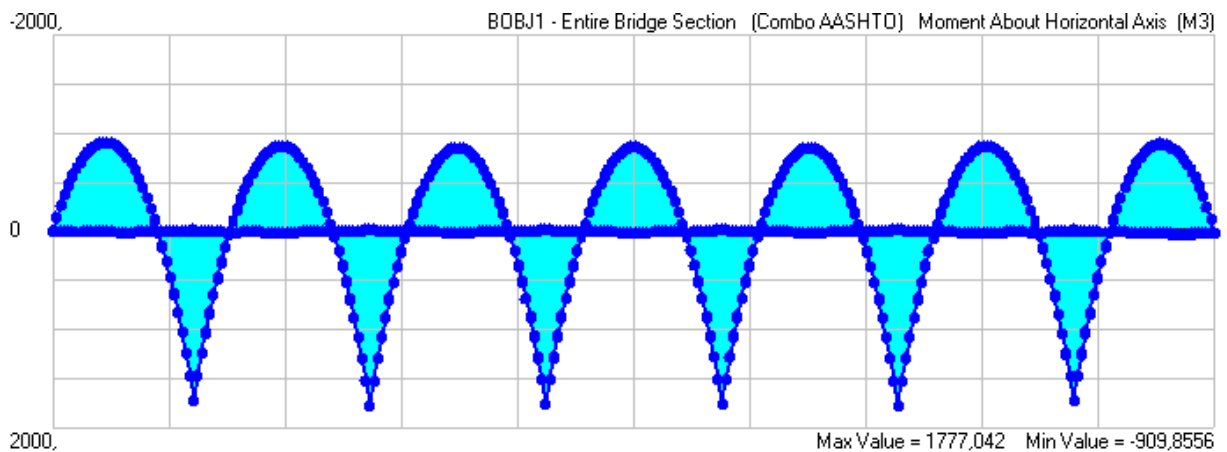


Figura 3.19 Envolvente generada por los momentos alrededor del eje horizontal. Fuente: Elaborado por el autor

Envolvente de momentos originados por presiones horizontales

En las figuras 3.16 y 3.18 se observan las envolventes de los momentos generados por presiones horizontales según NC y AASHTO, respectivamente. Ambos gráficos arrojan un valor máximo de momento positivo originado por la situación que incluye vehículo sobre el puente, lo que demuestra que para ambos enfoques la influencia del vehículo junto a la carga de viento provoca una combinación de carga pésima. El valor de momento máximo en este caso varía de acuerdo a las particularidades de cada procedimiento y a las presiones sobre los vehículos definidas por la NC y la AASHTO.

La envolvente generada siguiendo el proceder de la NC muestra un valor de momento positivo máximo mayor al de la AASHTO, lo que es consecuente con el hecho de que la norma cubana (NC 285. 2003) establece valores de presiones sobre el vehículo de diseño mayores que las dispuestas por la institución norteamericana, lo que hace que la carga total distribuida sobre la superficie de la losa según la NC sea mayor que la carga total obtenida mediante la AASHTO, a pesar de que las presiones horizontales que esta última arroja son mayores que las presiones horizontales calculadas por la NC.

Los valores de los momentos negativos en ambos casos son ínfimos en comparación con los positivos.

Envolvente de momentos originados por presiones verticales

Las figuras 3.17 y 3.19 muestran la envolvente de momentos producidos por las presiones verticales según la NC y la AASHTO, respectivamente. Se observa que en ambos casos las sollicitaciones provocadas por presiones horizontales son mayores que las provocadas por presiones verticales. El mayor valor de momento vertical positivo corresponde a la situación donde la presión se encuentra actuando de forma vertical sobre la superficie inferior del tablero. Hay que tener presente que la AASHTO para este caso, introduce, además del levante provocado por la presión vertical, un efecto de torsión, lo cual difiere con el tratamiento que, para este caso, adopta la norma cubana, cuyo proceder implica que la carga vertical tiende, solamente, a levantar el tablero, esto se observa de forma gráfica en las figuras 3.8 y 3.15, correspondientes a la NC y a la AASHTO respectivamente.

El gráfico generado a partir de la NC muestra un valor de momento máximo mayor al de la AASHTO ya que, en su enfoque, la norma plantea presiones mucho mayores que las asumidas por la norma norteamericana, aunque no recoge fenómenos importantes como son la pérdida de estabilidad del tablero por torsión del mismo al no existir excentricidad de la carga aplicada.

Comparación entre NC y AASHTO

En los gráficos mostrados se distingue un aspecto común entre ellos; se trata de una ruptura en el recorrido de la curva que interrumpe su continuidad a una distancia de 230m aproximadamente, a partir del extremo izquierdo del puente. Esto se debe a que en esta posición está situada una pila cuya altura es menor que el resto y esto repercute en la rigidez de la misma, teniendo efecto, a la vez, en la rigidez de la estructura en general.

Cálculo de la carga unitaria total

NC 285 2003. Carga de viento método de Cálculo

Para el cálculo de la carga unitaria total la norma cubana establece la fórmula 1.1 donde todo el análisis parte de la presión base correspondiente en la zona donde esté ubicada la obra. Los demás factores son los encargados de modificar ese valor de acuerdo a la altura y a las condiciones reales que presente la zona de emplazamiento de la estructura. Para los puentes, la NC expone dos casos: cuando existe vehículo sobre el mismo y cuando no existe vehículo.

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

En el caso de la norma AASHTO las presiones se calculan a partir de la velocidad de diseño y de la presión base y se definen tres casos donde estas intervienen en el puente de forma diferente: en presencia de vehículo, sin vehículo y presión vertical provocando efectos de torsión.

Datos de partida

NC 285 2003. Carga de viento método de Cálculo

La norma cubana establece como dato de partida una presión que puede tomar tres valores diferentes correspondientes a tres zonas en que está dividido el territorio cubano calculadas tras asumir un período de recurrencia de 50 años, esta presión se denomina presión básica y es posible determinarla con exactitud si se tienen observaciones directas de velocidad básica relativa a la zona de trabajo.

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

La norma AASHTO parte de asumir una velocidad básica de 160 km/h a partir de la cual se basa todo el método de cálculo propuesto por el documento. A diferencia de la NC (que define presiones básicas) este documento establece velocidades del viento a 10m sobre el nivel del terreno o sobre el nivel de agua de diseño (V_{10}) representadas a través de curvas que expresan el comportamiento de este parámetro en distintas zonas geográficas. Los planos donde se muestran estas curvas correspondientes a cada zona geográfica están publicados en el ASCE-7, documento que trata el cálculo de cargas de viento en estructuras sobre el cual se apoya la *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.

Categorías de terreno

Para el cálculo de la carga de viento es muy importante no solo tener en cuenta los elementos que componen la obra en el lugar de emplazamiento, sino también las características que presenta el terreno circundante a la misma. Es por esto que los dos documentos normativos sometidos a análisis establecen categorías de terreno que ilustran, de acuerdo al enfoque de cada uno, las situaciones que pueden presentarse en la práctica.

NC 285 2003. Carga de viento método de Cálculo

La NC define tres tipos de terreno: Tipo A (terrenos abiertos (llanuras, costas, orillas de laguna y represas, etc.). También en terrenos con obstáculos y edificaciones que no superen los 10 m. Se considera costa una distancia hasta 500 metros a partir de la línea del mar). Tipo B (terrenos cubiertos con obstáculos y edificaciones que superen los 10 m. (ciudades, zonas boscosas, etc.). Se considera representativo de este tipo de terreno, cuando las condiciones señaladas se mantengan en una distancia de 500m o más, a partir de la edificación u obra) y tipo C (Estos serán los centros de grandes ciudades, en los que al menos el 50 % de las edificaciones tengan una altura promedio mayor de 22 m o más. Esta

condición debe prevalecer en la dirección analizada, en al menos una distancia de 800 m de construcciones ó 10 veces la altura del edificio u obra).

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

En este punto la AASHTO realiza un procedimiento casi igual al de la NC. Propone tres categorías de terrenos: Terreno abierto (Terreno abierto con obstrucciones dispersas de altura generalmente menor que 10.000 mm. Esta categoría incluye los terrenos llanos abiertos y las praderas). Área suburbana (Áreas urbanas y suburbanas, áreas boscosas u otros terrenos con numerosas obstrucciones poco separadas del tamaño de una vivienda unifamiliar o mayores. El uso de esta categoría se limitará a aquellas áreas en las cuales la característica representativa predomina en una distancia de al menos 500.000 mm en la dirección contra el viento). Área urbana (Centro de grandes ciudades donde al menos 50 por ciento de las construcciones tienen una altura superior a 21.000 mm. El uso de esta categoría se limitará a aquellas áreas en las cuales la característica representativa predomina en una distancia de al menos 800.000 mm en la dirección contra el viento. Se deberán tomar en cuenta los posibles efectos túnel de las presiones de viento incrementadas que se podrían originar si el puente o la estructura están ubicados próximos a estructuras adyacentes).

Ambos enfoques coinciden en que el contacto del flujo de viento con la superficie del terreno provoca variaciones en la velocidad del viento por el efecto de fricción que se produce y por lo tanto influye determinadamente en el valor de la presión.

Altura de la edificación

NC 285 2003. Carga de viento método de Cálculo

La norma tiene en cuenta este factor a través del coeficiente de altura, el cual, a su vez está definido por el tipo de terreno y por la altura a la que está ubicado el elemento analizado. Sin embargo, el valor del coeficiente de altura puede verse aumentado si se tratase de una obra que, por su ubicación, esté expuesta al incremento de la velocidad del viento encima de colinas y acantilados como ocurre en el caso de estudio del puente del Abra del Yumurí.

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

La AASHTO introduce el valor de la altura que presenta la edificación directamente en la fórmula para el cálculo de la velocidad de diseño, de modo que, a partir de la velocidad V_{10} predefinida en el ASCE-7, se halla la velocidad que presenta el viento a la altura real de la edificación y con las condiciones reales de la zona de emplazamiento.

Ráfagas de viento

NC 285 2003. Carga de viento método de Cálculo

Esta norma tiene en cuenta el incremento que se produce en la velocidad del viento producto al efecto de ráfaga, el cual está estrechamente relacionado con la altura del elemento que se esté analizando y con la superficie del mismo que se encuentre expuesta al viento.

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

Esta norma tiene en cuenta el efecto de ráfaga en el cálculo de las presiones básicas que se muestran en la tabla 1.5 de modo que cuando se elige el valor de presión básica en función de la tipología del elemento y del ángulo de impacto del viento con la estructura ya este valor trae consigo la repercusión que va a tener en la edificación el efecto de ráfaga.

Variabilidad de la forma de la superficie donde incide el viento

NC 285 2003. Carga de viento método de Cálculo

La norma cubana introduce un factor en el cálculo de la carga unitaria total llamado Coeficiente de Forma, el cual tiene como función expresar numéricamente los efectos que se producen en el elemento, vinculados a la forma de la superficie expuesta, cuando está bajo la influencia de la carga de viento. La forma de los elementos que componen una estructura están en función del diseño arquitectónico y de las necesidades que motivaron la obra en cuestión, de ahí que la determinación de este coeficiente se hace en muchos casos una tarea engorrosa.

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications

En la AASHTO la variabilidad de la forma de la superficie expuesta se tiene en cuenta a la hora de seleccionar la presión base en la tabla 1.5 solo que aquí se tiene nada más que tres casos donde se produce una variación de la presión en función de la forma de la superficie expuesta cuando se trata de:

1. Reticulados, columnas y arcos
2. Vigas
3. Grandes superficies planas

LA norma ASCE-7, que es complementaria a la AASHTO en el análisis de la carga de viento, si tiene un análisis mucho más completo en cuanto a la forma para otros tipos de edificaciones pero no se aplican para el caso de estudio de los puentes.

Conclusiones:

Se estudiaron la norma cubana y norteamericana para el cálculo de la carga de viento, analizándose las consideraciones que fundamentan los enfoques asumidos por cada una y se precisó sus diferencias y semejanzas. La aplicación de ambas normas para el cálculo de la carga de viento sobre el tablero del puente del Abra del Yumurí arrojó menores valores de momento con el procedimiento propuesto por la

norma AASHTO, lo cual implica que el uso del método propuesto por esta norma para el diseño del puente es el idóneo desde el punto de vista económico.

La aplicación de esta norma al caso de estudio es factible desde el punto de vista de la seguridad estructural, ya que la velocidad del viento a 10m sobre el nivel del terreno se eligió a partir de la isóclina que pasa por La Florida (la más cercana a Cuba planteada por el ASCE 7) cuyo valor de 150mph (241km/h) es mayor a todos los valores de velocidad máxima del viento medidos en la zona de emplazamiento de la obra.

El uso del citado documento para el diseño del Puente del Abra del Yumurí introduce el análisis del vuelco del puente ante un carga excéntrica ubicada a $\frac{1}{4}$ de la luz de la sección transversal, lo cual la NC no tiene en cuenta.

Por otra parte, por la ubicación de la obra, se produce lo que la norma cubana define como “incremento de velocidad del viento encima de colinas y acantilados”, fenómeno que la AASHTO omite en su análisis, pero que sí está recogido en el ASCE 7. Sin embargo, se considera certera la elección de esta norma por lo antes expuesto y por la probada eficacia que goza su implementación en muchísimos países para el cálculo de la carga de viento en puentes, hecho que demuestra la robustez práctica de la misma.

Bibliografía:

- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 1998.
- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications 2007. Vigente en la actualidad
- ASCE 07. Carga Mínima de Diseño para Edificios y Otras Estructuras 2005. Vigente en la actualidad
- Blanco Heredia, y Llanes Burón. *Es la Norma Cubana NC 285:2003, pertinente para las Cargas de Viento que se desarrollan en la actualidad* [en línea]. Revista de Arquitectura e Ingeniería. 2011, vol. 5 no.1. Marzo 2011 [Consulta: mayo 2013]. Disponible en www.empaimatanzas.co.cu/revista/Numeros%20Anteriores.html.
- EMPAI. Memoria. Ideas conceptuales del Puente del Abra del Río Yumurí en la carretera Circunvalación Norte de la Ciudad de Matanzas. 2013.
- Florida Building Code 2008
- Holmes, Tamura, Krishna. *Comparison of wind loads calculated by fifteen different codes and standards, for low, medium and high-rise buildings* [disco]. 11th Conference Wind engineering. Junio 2009. [Consulta: mayo 2013].
- Holmes. *Emerging Issues in wind engineering-Part 2* [en línea]. Newsletter of american association for wind engineering. Septiembre 2003. [Consulta: mayo 2013]. Disponible en: www.aawe.org.

Ing. Carlo Fidel Taboada Petersson, Prof. MSc. Ing. Héctor Alfonso Pérez. Influencia de la carga de viento en puentes. Caso de estudio tablero del Puente del Abra del Yumurí.

- Meli Piralla, Roberto (1985). Diseño Estructural. Estados Unidos: Editorial: LIMUSA
- NC 285. 2003 Cargas de viento método de cálculo. Vigente en la actualidad
- NC 733. 2009 Carreteras. Puentes y alcantarillas. Requisitos de diseño y método de cálculo. Vigente en la actualidad.