



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



LABORATORIO NACIONAL  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

Programa de Ingeniería Estructural, N° 3, Volumen 2, Año 2017 · ISSN: 2215-4566

# DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD BÁSICA DEL VIENTO

Uso para Zonificar Intensidad del Viento en Costa Rica  
y en Consideraciones de Diseño por Viento para Puentes

**Ing. Jorge Muñoz Barrantes, PhD, Investigador**

*Unidad de Puentes*

*Programa de Ingeniería Estructural*

*Correo electrónico: [jorge.munozbarrantes@ucr.ac.cr](mailto:jorge.munozbarrantes@ucr.ac.cr)*





Puente Tacoma Narrows, colapsó el 7 de noviembre de 1940 ("Collapse of the Tacoma Narrows Bridge", 2012)

## Introducción

La tendencia actual de construir obras cada vez más altas y flexibles, y la introducción de nuevas filosofías de diseño, como aquellas relacionadas con desempeño, hacen que tome mayor trascendencia el análisis estructural debido al efecto de las cargas por viento. Esta evaluación, es un requisito no solo desde el punto de vista de garantizar la integridad estructural o el control del daño, sino también para asegurar que los parámetros que miden el confort del usuario se mantengan dentro de límites aceptables.

En lo relativo a puentes, los efectos de las cargas de viento han llevado a daños e incluso la falla catastrófica en estructuras mayores (puentes con tramos muy largos, puentes colgantes y puentes atirantados). Ejemplo de esto fue el famoso colapso en los Estados Unidos del Puente Tacoma Narrows en 1940, estructura que era susceptible al daño por vibraciones producidas por fenómenos como el efecto de vórtice y el flameo (flutter), incluso a velocidades de viento bajas (WSDOT, 2017). Esta estructura no superó el año de servicio luego de ser inaugurado en julio de 1940.

El colapso del Tacoma Narrows representa un hito importante en la ingeniería estructural. A partir del estudio de este caso histórico, la normativa internacional resaltó la necesidad de efectuar estudios especiales, como ensayos en túnel de viento y modelaciones numéricas avanzadas, con el fin de evitar daños globales o de

componentes en puentes mayores; en particular la determinación de velocidades críticas relacionadas con efectos aeroelásticos peligrosos como el flameo y la divergencia. Como insumo a estos estudios especiales, es necesaria la estimación de las características locales del viento como la turbulencia, velocidad media y velocidades máximas posibles durante la vida de servicio de la obra (ASCE, 1991).

Las consideraciones para el diseño por viento en nuestro país están incluidas en el reglamento de construcciones de 1983 (La Gaceta, 1983); para el cual, las estructuras de puentes están fuera de su alcance. Este reglamento presenta múltiples limitaciones (mencionadas por Gutiérrez (2005)), por lo que es necesario efectuar una actualización y mejoramiento del procedimiento actual tanto para el cálculo estático de presiones como para la introducción de indicaciones relativas a los efectos dinámicos.

Una de las limitaciones importantes del reglamento actual es el procedimiento de cálculo de la velocidad de diseño. Esta, se obtiene de una forma muy simplificada y sin relación explícita a un periodo de retorno, lo que la hace incompatible con los procedimientos actuales de diseño. El objetivo principal de este boletín, es presentar un procedimiento para la determinación de la velocidad básica del viento, parámetro esencial para la estimación de la velocidad de diseño. El procedimiento se ilustra con ejemplos y aspectos relacionados con la zonificación eólica para Costa Rica.

## Velocidad Básica del Viento

La velocidad del viento, es uno de los parámetros importantes para la estimación de las cargas en el análisis estático y la evaluación de efectos relacionados con vibraciones inducidas por viento. Características climatológicas del viento, como su dirección, velocidad y turbulencia en algún sitio específico, pueden ser determinadas gracias al procesamiento de datos provenientes de estaciones meteorológicas a nivel local o regional.

El valor de la velocidad básica, según lo define la ASCE7-10, corresponde a la magnitud de la velocidad máxima de ráfaga, "3-second gust wind speed", medida a una altura de 10 metros sobre el nivel de la superficie y en un terreno con exposición C (ASCE, 2010). Este valor de velocidad, se puede determinar mediante un análisis estadístico de valor extremo de los datos provenientes de las estaciones meteorológicas en zonas sin huracanes, para el período de retorno de diseño requerido. Usualmente, se calcula la velocidad básica para un periodo de retorno de 50 años, que es un período común de uso en códigos internacionales.

Conocer las condiciones para las que calcula la velocidad básica del viento es de suma importancia, ya que los códigos utilizan valores con características distintas. Por ejemplo, el eurocódigo, el código japonés y la OMM (Organización Meteorológica Mundial), utilizan las velocidades promedio cada diez minutos, en lugar de velocidades de ráfaga. Existen procedimientos de conversión de velocidades recomendados por la ASCE7-10, como la utilización de la curva de Durst (1960); sin embargo, la aplicación de esta curva se limita a estaciones ubicadas en zonas de exposición C y para zonas sin posible afectación por huracanes.

Además de los intervalos de medición, la velocidad varía con la altura medida desde el nivel del terreno y el entorno de la medición (ver grados de exposición del ASCE7-10). Es por ello que las mediciones se realizan a una altura estandarizada de 10 metros.

En la figura 1, se muestra la variación con la altura, hasta una altura de 340 metros sobre el terreno, de la velocidad del viento en un día tormentoso. Aquí se destaca de forma clara, la diferencia entre valores máximos y valores promedios, la variabilidad que puede presentar las velocidades con la altura (línea azul), y la envolvente de velocidades y su fluctuación (sombra violeta). La dispersión de los valores de velocidad es función del entorno de la estación

(topografía y exposición) y su desviación estándar que es un parámetro útil para medir el grado de turbulencia. La turbulencia, al contrario de la velocidad, es mayor cerca de la superficie del terreno y disminuye con la altura.

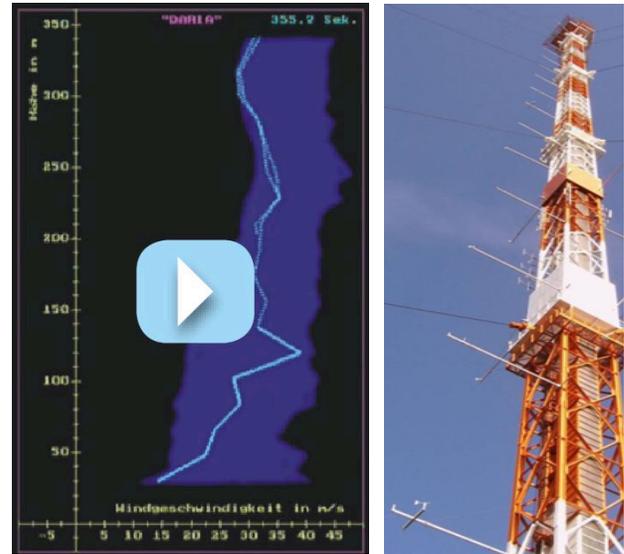


Figura 1: Variación de la velocidad en altura para el mástil instrumentado Gartow de 341 metros de altura ubicado en Alemania (Clobes, 2015)

## Corrección de Datos de las Estaciones Meteorológicas

Según la norma ASCE7-10 (ASCE, 2010), la estimación de la velocidad básica del viento se puede obtener de una estación meteorológica siempre y cuando se cumpla con lo siguiente:

- la duración del registro, el error de muestreo, los redondeos, la altura del anemómetro, la calidad de los datos y el tipo de terreno han sido tomados en cuenta y,
- se utilicen procedimientos estadísticos de análisis de valores extremos reconocidos.

La corrección de los datos de las estaciones tomando en cuenta lo descrito en el punto a) es de suma importancia, en particular si se busca realizar comparaciones entre estaciones meteorológicas, para lo cual es necesario filtrar los efectos locales. El tratamiento de los registros depende del objetivo que persiga el analista. En el caso de la obtención de velocidades básicas del viento, según la definición anterior, se recomienda el siguiente procedimiento:



- 1) Se aplican una serie de filtros para eliminar datos inconsistentes o errores en los registros.
- 2) Se indica por estación cuales son los cuatro meses con velocidades promedio más altas por año (análisis estacional y no por año).
- 3) Se elimina el registro de los años en donde no se tengan al menos 90 días de registros en los cuatro meses más ventosos.
- 4) La velocidad se corrige por exposición según la ecuación 5.3 del procedimiento de la OMM (WMO, 2010). Esta toma en cuenta el tipo de terreno, altura a la que se encuentre el anemómetro y la topografía.
- 5) Aplicación de un factor de conversión de velocidad a ráfaga en caso de ser necesario.

En caso de no contar con información suficiente sobre el entorno de las estaciones meteorológicas, es posible realizar la corrección de datos de velocidad haciendo uso de modelos topográficos según las hojas cartográficas y imágenes satelitales (ver figura 2 para la estación ubicada en la Universidad de Costa Rica), como lo evidencian los documentos de la NIST (2017) y Burton (2009). La corrección por exposición se debe realizar además en función de la dirección de los vientos y teniendo clara la ubicación exacta de las estaciones ya que pequeñas variaciones en regiones montañosas son de gran importancia.

La dirección de los vientos de mayor intensidad en nuestro país está fuertemente relacionada con vientos



Figura 2: Imagen satelital que indica el área a evaluar para corrección por exposición con barlovento del este (estación ubicada en la Universidad de Costa Rica)

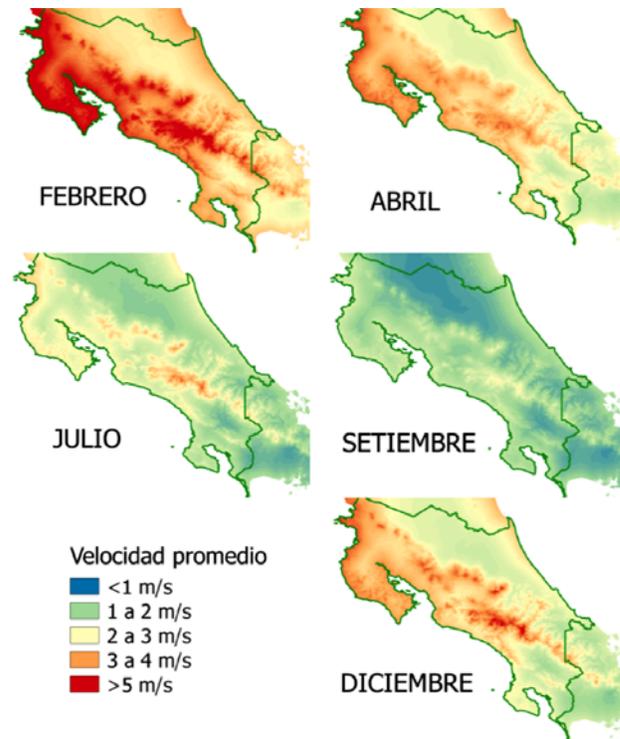


Figura 3: Variación mensual de los valores promedio de velocidad del viento para Costa Rica registrados entre los años 1970 y 2000 (elaborado a partir de los datos de Fick (2017))

alisos del norte (meses de noviembre a mayo) que son los dominantes para muchas regiones del territorio nacional (ver figura 3). Los vientos alisos del norte inciden con direcciones principales de noreste a suroeste y de este a oeste. Esta es información de utilidad en los cálculos de exposición para realizar correcciones si no se cuenta con mediciones de dirección para la estación.

Finalmente, es necesario realizar una última corrección por conversión de velocidad medida a una velocidad de ráfaga; esto en caso de que los registros se tomaran a frecuencias distintas a 3 segundos. Esta corrección solamente es posible de realizar mediante el uso de la curva de Durst cuando las estaciones cumplen con los requisitos de exposición. Si el uso de la curva de Durst no es posible, la corrección de los datos se debe realizar mediante el cálculo de un coeficiente de correlación variable con la velocidad, entre  $V_T$  y  $V_3$ , con  $V_T$  siendo la velocidad medida cada T segundos.

Una vez realizadas las correcciones de los datos, se procede a efectuar un análisis estadístico para la determinación de la velocidad básica.

## Análisis Estadístico para la Determinación de la Velocidad

Para el cálculo de velocidad a determinado periodo de retorno, se utiliza usualmente un análisis estadístico de valores extremos para los valores corregidos de velocidad anual máxima. Este análisis es de utilidad, ya que por lo general no se cuenta con una cantidad de años de registro suficientes en comparación con la vida de servicio esperada para la estructura y los periodos de retorno de diseño especificados por las normativas.

Siguiendo el procedimiento propuesto por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos (NIST por sus siglas en inglés), los valores extremos de la velocidad del viento para cualquier periodo de retorno se pueden obtener, para zonas sin huracanes, siguiendo el siguiente procedimiento (NIST, 2017):

- 1) Se obtienen las velocidades máximas anuales y se ordenan de menor a mayor.
- 2) Se estima la probabilidad anual de excedencia,  $P_v$ .
- 3) Se grafica la velocidad  $v$  vs  $\ln(-\ln(P_v))$  asumiendo que los datos son razonablemente descritos por una distribución probabilística de valor extremo tipo Gumbel (distribución generalizada de valores extremos tipo I). Esta gráfica debe ser aproximadamente lineal, y si no lo fuera, la distribución tipo Gumbel no es apropiada y se debe utilizar otro tipo de distribución.
- 4) Si la distribución tipo Gumbel se considera adecuada, encontrar los parámetros de mejor ajuste de la línea (intercepción y pendiente).
- 5) Para el Periodo de Retorno requerido  $T_{PR}$ , se obtiene el punto porcentual estadístico para una distribución Gumbel,  $-\ln(-\ln(1/T_{PR}))$ , y se evalúa este para la línea de mejor ajuste del punto anterior, obteniendo así la velocidad máxima al periodo requerido.

Aplicando este procedimiento a los registros de velocidad máxima entre 1973 y 2016 extraídos de la base de datos de la NOAA para la estación meteorológica del Aeropuerto Int. Juan Santamaría (NOAA, 2017), se obtienen los resultados mostrados en la figura 4. En la figura se muestran y comparan los datos de valores extremos anuales durante un periodo de medición

de 44 años (punto 2), con la curva de valores máximos de velocidad obtenida para distintos periodos de retorno (punto 5). La curva calculada en función de la probabilidad de excedencia anual ( $1/T_{PR}$ ) y los valores máximos esperados de la intensidad del viento en términos de su velocidad se denomina comúnmente en la literatura como curva de amenaza. Esta curva permite la obtención de la intensidad para distintos periodos de retorno. Los periodos para el diseño por viento según la ASCE7-10 son 300, 700 y 1700 años.

Para las zonas propensas a huracanes, la ASCE7-10 no permite el uso de datos regionales de las estaciones para estimar el riesgo por huracán en las zonas costeras de Estados Unidos susceptibles a este fenómeno. La elaboración de las curvas de amenaza, utilizadas en zonas propensas a huracán, se basan en simulaciones numéricas y el análisis estadístico de valores extremos registrados durante eventos anteriores.

Estudios como el de la USAID del año 2008 (USAID, 2008), indican la posibilidad del uso de un factor de importancia por huracán,  $I_H$ , como un parámetro que modifique la velocidad básica para el periodo de retorno requerido. Este factor, se deriva del análisis de las curvas normalizadas de amenaza ( $V_{TPR}/V_{50}$ ) vs  $T_{PR}$ . En la figura 5, se observan las curvas elaboradas para Gran Caimán en el Caribe (USAID, 2008).

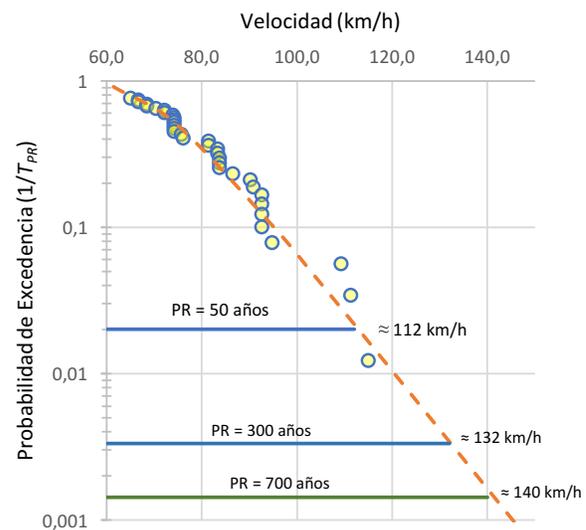


Figura 4: Curva de amenaza para velocidad máxima del viento y su relación con los datos de la estación meteorológica (estación Aeropuerto JSM)



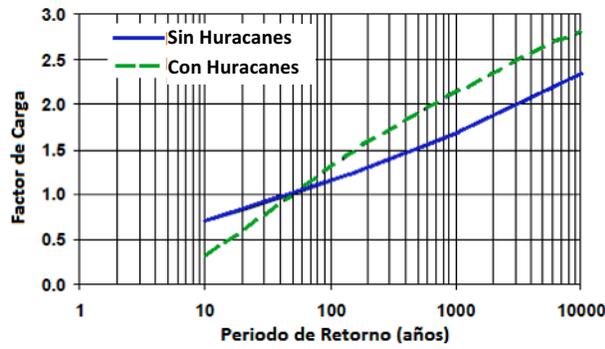


Figura 5: Factor de carga de velocidad del viento ( $V_{pr}/V_{50}$ ) para zonas propensas y no propensas a huracanes vs Periodo de Retorno  $T_{PR}$  (USAID, 2008)



Figura 8: Separación por distritos de regiones con impacto posible de huracanes (Caribe) y donde la posibilidad se considera muy baja (Pacífico)

## Regiones Eólicas para Costa Rica

La zonificación eólica de un territorio, identifica regiones con características similares en relación con algún aspecto de intensidad del viento, en este caso particular, valores de velocidad. Esta división se puede realizar con base en los valores de la velocidad medida en estaciones climatológicas, la identificación de zonas susceptibles a huracanes, las características del clima y la geomorfología del país.

En la regionalización de valores máximos de velocidad, el primer paso es la definición de las regiones susceptibles al impacto directo de huracanes. En Costa Rica, la región Caribe es la vinculada tradicionalmente con posible afectación directa por el paso de huracanes, sin embargo, la posibilidad de un impacto directo es baja y previo al paso del huracán Otto (año

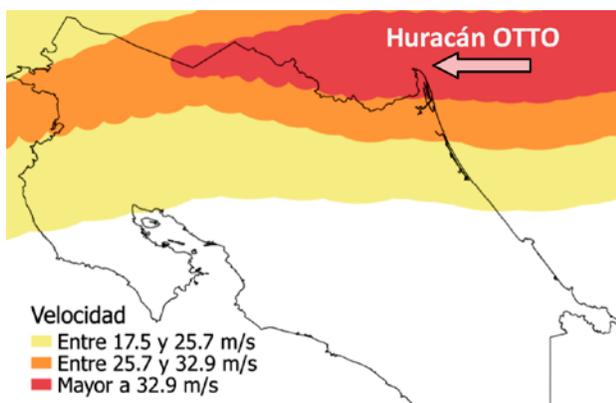


Figura 7: Contorno de velocidades máximas de viento por el paso del Huracán OTTO del año 2016. Elaborado según las capas de la base de datos de la National Hurricane Center de los Estados Unidos (NHC, 2016)

2016), no se tienen registros de algún otro evento con el grado de huracán en los últimos 100 años (Johanning, 2015). Este escenario, en donde los eventos ocurren con periodos de retornos prolongados, son complejos dada la poca disponibilidad de datos para realizar análisis estadísticos o evaluar simulaciones, y potencialmente destructivos gracias a que la población e instituciones no están familiarizados con estos eventos y posiblemente presenten una baja resiliencia.

Tomando en cuenta los datos suministrados por el Centro Nacional de Huracanes de Estados Unidos, NHC por sus siglas en inglés, para el huracán Otto en noviembre del 2016 (figura 7), los mapas de velocidad pico de ráfaga suministrados por el estudio de USAID para el Caribe (USAID, 2008) y la orientación de los sistemas montañosos principales en Costa Rica, se propone la división por distritos de zona de huracán y no huracán según la figura 8.

En la figura 8, la región asociada con afectación por incremento de la velocidad del viento producto de huracanes serían las zonas al noreste de las principales cadenas montañosas del país. Estas son las denominadas por el Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica como Zona Norte y Vertiente del Caribe (Solano, s.f).

Estas zonas coinciden aproximadamente con los mapas de velocidades propuestos por el estudio de la USAID (2008). Inspeccionando las figuras del estudio USAID, se observan velocidades aproximadas

de 48, 64, 144 y 177 km/h para periodos de retorno de 50, 100, 700 y 1700 respectivamente para la zona Caribe Norte de Costa Rica. Tomando en cuenta que durante para el Huracán Otto se superaron velocidades de ráfaga de 130 km/h (NHC, 2016), relacionadas con un huracán grado 1, una velocidad con un máximo de ráfaga para huracán grado 1 de 170 Km/h, según la tabla C26.5-2 de la ASCE7-10, podría ser adecuada para edificaciones convencionales.

En el resto del país, se puede considerar que debido a la barrera que conforman los sistemas montañosos y las trayectorias históricas registradas por los huracanes en el Caribe (NOAA, 2014), estas zonas pueden ser definidas como una región de no-huracán y el análisis de estadístico de los datos registrados por estaciones climatológicas de valores máximos anuales de velocidad es válido. Los valores máximos de velocidad del viento en Costa Rica en zonas de no-huracán están relacionados con la zona de convergencia intertropical de los vientos alisios. Los vientos alisios son corrientes de aire que se mueven desde los cinturones subtropicales (altas presiones) hacia el cinturón ecuatorial (bajas presiones)(Johanning, 2015). Los vientos alisios provenientes del noreste reportan las mayores velocidades y son los responsables del clima seco en varias regiones del país. La influencia en velocidades del viento máximas de los alisios del noreste para Costa Rica se evidenció claramente en la figura 3.

Para algunas regiones del país, como en el pacífico sur, la influencia de los alisios del norte es menor, por lo que las velocidades máximas podrían estar relacionadas con los alisios del suroeste.

La magnitud de las velocidades básica de diseño para una zonificación eólica se obtiene del análisis estadístico de valores extremo para las estaciones climatológicas distribuidas a lo largo del país. Del análisis de los datos, se pueden determinar también las velocidades a distintos periodos de retorno. Para los datos analizados en la figura 4, en la estación ubicada en el aeropuerto Juan Santamaría, la ecuación propuesta por la ASCE7-10 (ecuación C26.5-2 (ASCE, 2010)) para zonas sin huracanes, aproxima bien a los resultados obtenidos.

Finalmente, para determinar la velocidad de diseño en un sitio específico a partir de un mapa de zonificación de la velocidad básica, se aplica parte del procedimiento en forma inversa, empleando según el sitio específico de análisis los ajustes por exposición, periodo de retorno y topografía.

## Consideraciones de Diseño por Viento para Puentes

A continuación, se resumen aspectos generales sobre el uso de la velocidad de diseño en puentes basados en la sección 3.8 de la AASHTO-LRFD (2014). Para esta norma, las velocidades de diseño se utilizan tanto para el análisis estático de estructuras de puentes, como también para determinar parámetros iniciales de utilidad en estudios de evaluación de los efectos dinámicos del viento en estructuras de puentes mayores, como puentes atirantados y colgantes.

La AASHTO-LRFD-(2014) asume para todo tipo de puente una velocidad base de diseño constante por viento,  $V_B$ , igual a 160 km/m (100 mph), de aplicación uniforme en las áreas expuestas perpendiculares a la dirección del viento. La dirección debe variarse hasta que se encuentre la mayor posible afectación sobre la estructura. Para puentes con alguno de sus componentes por encima de los 10 metros de altura del terreno o el nivel de agua, se debe recalculer la velocidad a la llamada altura de diseño  $V_{DZ}$ . Esta velocidad de diseño es variable en función de la relación  $V_{30}/V_B$ , donde  $V_{30}$  viene de la velocidad de diseño del viento para el período de retorno requerido a una altura de 10 metros (30 pies) sobre la superficie. Los valores de  $V_{30}$  se derivan de los mapas de zonificación básica o del análisis de los registros in situ en caso de contar con estos. La norma permite, en caso de no contar con información de  $V_{30}$ , utilizar  $V_{30} = V_B$ . Con la velocidad del viento de diseño definida, se pueden estimar presiones estáticas según el artículo 3.8.1.2 de la AASHTO-LRFD (2014).

Los efectos aeroelásticos deben ser considerados en el diseño de puentes y sus componentes para estructuras con posibilidad de ser sensibles a vibraciones inducidas por el viento. Si este fuera el caso, es requerido realizar un análisis dinámico según la sección 4.7 de la AASHTO-LRFD (2014). Según esta norma, los puentes sensibles a inestabilidad aeroelástica son aquellos con razones de largo de claro entre profundidad (dimensión de altura en la sección de la superestructura) y razones en sus componentes estructurales de largo entre ancho mayores a 30. La norma menciona que fenómenos aerodinámicos como el efecto de vórtice (“*vortex shedding*”), el flameo (“*flutter*”), “*galloping*” y divergencia (o aeroelasticidad estática) deben ser evaluados con el fin de que la ocurrencia de estos pueda ser evitada o contralada. Los estudios de túnel de viento pueden



ser utilizados para determinar velocidades críticas específicas relacionadas con flameo o efecto de vórtice para la estructura evaluada. La figura 9, muestra la relación entre los distintos efectos dinámicos del viento sobre las estructuras y las velocidad del viento.

En relación a la evaluación de la condición de servicio, la AASTHO-LRFD (2014) especifica que se debe utilizar una velocidad fija de 88.5 km/h (55 mph).

## Vibraciones Inducidas por Viento

Las estructuras de puentes con claros largos son flexibles y con bajos valores de amortiguamiento, lo cual los hace susceptibles a vibraciones por cargas dinámicas (Larsen, 1998). Las vibraciones inducidas sobre el puente o sobre alguno de sus componentes, pueden llevar a daños en elementos como el tablero, las torres, los cables y los anclajes (Clobes, 2015). En particular, los anclajes pueden presentar daño por fatiga si las vibraciones no se mantienen bajo control (Clobes, 2015).

Las características de los efectos aerodinámicos a los cuales podrían estar expuestas las estructuras de puentes mayores se observan en la figura 10. Los niveles de aceleración y deformaciones en la estructura debido a vibraciones deben ser consideradas en el diseño ya que se pueden alcanzar niveles excesivos de esfuerzos, fatiga estructural y discomfort del usuario que deben ser evitados (AASHTO, 2014). En caso de ser viable en la práctica, el empleo de amortiguadores o cambios en la geometría deben ser evaluados para el control de vibraciones.

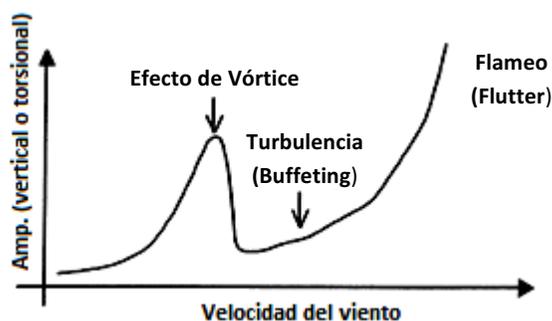


Figura 9: Velocidades del viento y su relación con fenómenos que inducen vibraciones (Fujino, 2002)

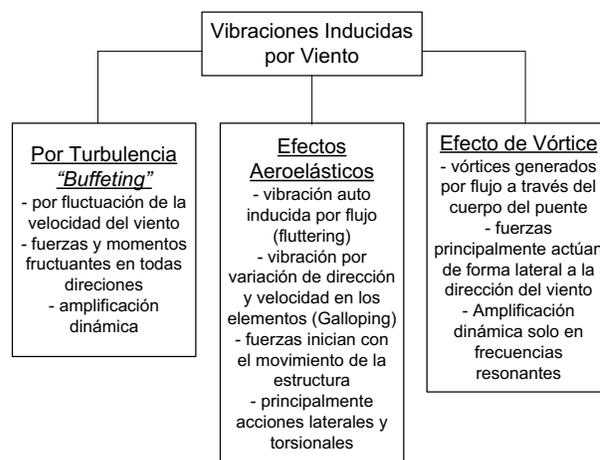


Figura 10: Vibraciones inducidas por viento (modificado de Clobes (2015))

Otra condición que debe ser evaluada es la interacción de la lluvia con el viento. Las vibraciones por viento-lluvia se dan por una variación de la rugosidad debida a la formación hilos de agua que cambian las propiedades de elementos como los cables en puentes. Este tipo de vibración se han observado recientemente en varios puentes a nivel internacional como el puente Erasmus en Rotterdam (Persoon y Noorlander, 1999) y el Franjo Tudman en Dubrovnik (figura 11); en ambos casos se controlan las vibraciones mediante la adición de amortiguadores.

## Conclusiones

Los parámetros actuales utilizados en el diseño de estructuras por acción del viento son obsoletos, estos provienen del vigente reglamento de Construcciones de Costa Rica del año 1983. Para puentes específicamente, este tipo estructural está inclusive fuera del alcance de este reglamento. Por ello, es importante la actualización o cambio de esta norma, tomando en cuenta un ajuste para el parámetro de velocidad de diseño y la inclusión de la evaluación de los efectos dinámicos sobre las estructuras

La determinación de la velocidad básica para una estación meteorológica, es un parámetro importante que permite la obtención de velocidades máximas de ráfaga del viento para distintos periodos de retorno según lo indique la norma respectiva. La identificación de la variación regional de la velocidad básica, es de utilidad para realizar estudios de zonificación eólica.

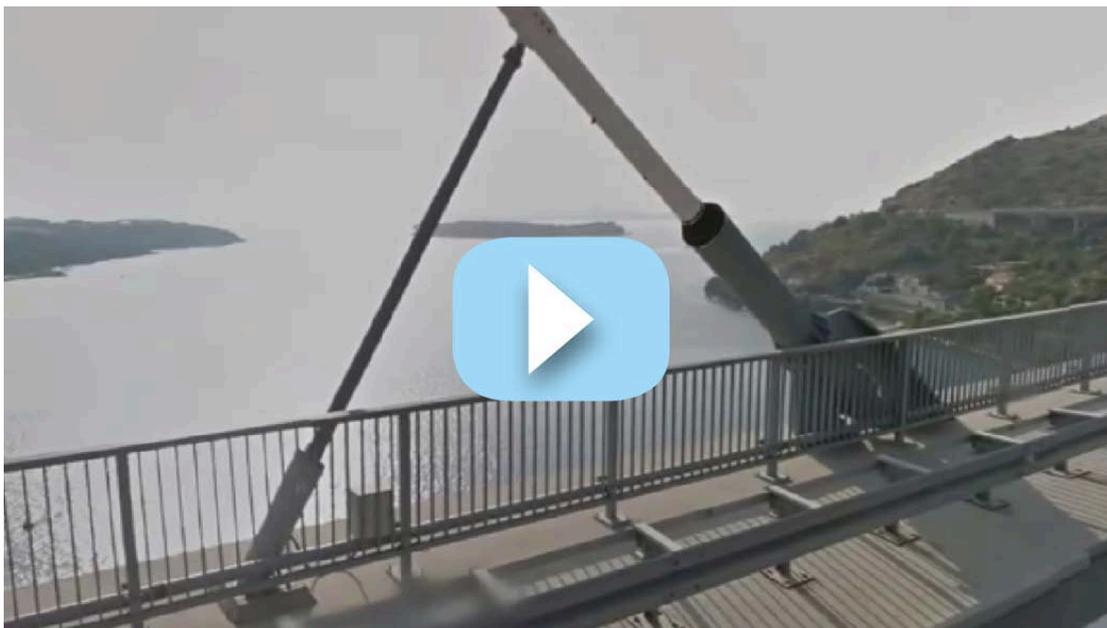


Figura 11: Dispositivo para el control de vibraciones instalado en el puente Franjo Tudman para mitigar las vibraciones producidas por la interacción viento-lluvia en los cables ("Cable-stayed bridge Dubrovnik", 2015)

Gracias a la zonificación eólica de la velocidad básica, se pueden encontrar variables útiles para el diseño estático y dinámico de estructuras de puentes; en donde, para puentes con bajos valores de amortiguamiento y flexibles, la evaluación de los efectos dinámicos por viento sobre la estructura podrían representar una de las condición crítica de diseño, requiriendo inclusive en ocasiones de estudios especiales como ensayos de modelos a escala en túnel de viento (AASHTO, 2014).

## Bibliografía

AASHTO. (2014). The AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, Seventh Edition, 2014. American Association of State Highway and Transportation Officials. Washington DC, EE.UU

ASCE. (2010). ASCE7-10, Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures. American Society of Civil Engineers. Reston, Virginia, EE.UU

ASCE. (1991). Guideline for the design of cable-stayed bridges. American Society of Civil Engineers, New York, New York, EE.UU.

Burton. (2009). Irish National Annex to the Wind Eurocode (EN1991-1-4). Derivation of the Wind Map. Department of the Environment, Heritage and Local Government

Cable-stayed bridge Dubrovnik. (2015, febrero 2). Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=SsfQN1ilcGU>

Clobes M. (2015). Curso Puentes de Acero. Wind Loading on Bridges. Noviembre 2015, LanammeUCR, San José, Costa Rica

Collapse of the Tacoma Narrows Bridge. (2012, Marzo 21). Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=R8TRTHh16wo>

Durst, C. S. (1960). Wind Speeds Over Short Periods of Time. The Meteorological Magazine, Vol. 86, No. 1056

Fick, S.E., Hijmans, R.J. (2017). Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. International Journal of Climatology

Fujino Y. (2002). Vibration, control and monitoring of long-span bridges—recent research, developments and practice in Japan. Journal of Constructional Steel Research 58 (2002) 71–97

Gutiérrez J. (2005). Evaluación de código por viento. University of the West Indies, Jamaica.

Johanning C., Castillo R. (2015) Código de Viento para Costa Rica, Boletín Estructuras, N°5, Junio 2015. LanammeUCR, Universidad de Costa Rica

Larsen A, Esdahl S, editors. (1998). Bridge aerodynamics, Rotterdam: Balkema, 1998



NHC. (2016). Datos descargados del sitio web del National Hurricane Center de EE.UU. <http://www.nhc.noaa.gov/>

NIST. (2017). Extreme Winds and Wind Effects on Structures. Statistical Engineering Division, National Institute of Standards and Technology, NIST. Recuperado: <http://www.itl.nist.gov/div898/winds/homepage.htm>

NOAA. (2017). Base de datos descargados del sitio web de la National Oceanic and Atmospheric Administration de EE.UU. Recuperado de: <http://www.noaa.gov/>

La Gaceta. (1983). Reglamento de construcciones. Diario oficial La Gaceta, Marzo 22, 1983

Persoon A.J., Noorlander K. (1999). Full-scale measurements on the Erasmus bridge after rain/wind induced cable vibrations. National Aerospace Laboratory

Solano J., Villalobos R. (sf). Regiones y Subregiones climáticas de Costa Rica. Instituto Meteorológico de Costa Rica. Recuperado de: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>

USAID. (2008). Wind Speed Maps for the Caribbean for Application with the Wind Load Provisions of ASCE 7. ARA Report 18108-1. United States Agency for International Development, USAID

WMO. (2010). WMO Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, I.5 Measurement of Surface Wind. World Meteorological Organization, Ginebra, Suiza

WSDOT. (2017). Lessons from the failure of a Great Machine: The Tacoma Narrows Bridge. Washington State Department of Transport, EE.UU. Recuperado: <https://www.wsdot.wa.gov/TNBhistory/Machine/machine3.htm>

---

CENTRO DE TRANSFERENCIA TECNOLÓGICA

Diagramación, diseño y control de calidad: Licda. Daniela Martínez Ortiz / Óscar Rodríguez Quintana

DETERMINACIÓN DE LA VELOCIDAD BÁSICA DEL VIENTO / Julio, 2017

Palabras clave: velocidad básica del viento, puente, zonificación eólica, vibraciones inducidas por viento.





**LanammeUCR**

---

**LABORATORIO NACIONAL**  
DE MATERIALES Y MODELOS ESTRUCTURALES

**PIE** Programa de  
**Ingeniería Estructural**

Tel. (506) 2511-2500 / Fax (506) 2511-4440 / Código Postal 11501-2060  
E-mail: [direccion.lanamme@ucr.ac.cr](mailto:direccion.lanamme@ucr.ac.cr) / Sitio web: <http://www.lanamme.ucr.ac.cr>