



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL VIENTO INCIDENTE SOBRE ESTRUCTURAS EN CASO DE TERRENOS COMPLEJOS

EXPERIMENTAL STUDY OF INCIDENT WIND CHARACTERISTICS ON STRUCTURES IN THE CASE OF COMPLEX TERRAIN

Adrián R. Wittwer (1) (P); Acir M. Loredou-Souza (2); Mario G. Klaus Oliveira (3); Jorge O. Marighetti (1); Mario E. De Bortoli (1)

(1) Profesor, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina.

(2) Profesor, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

(3) Director, Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento Ltda., Porto Alegre, Brasil.

Dirección para correspondencia: a_wittwer@yahoo.es; (P) Presentador

Resumen

La existencia de accidentes y modificaciones del relieve sobre el terreno origina lo que comúnmente se denomina como topografía compleja. En el caso de estructuras sensibles a la acción aerodinámica, las características del viento incidente se ven modificadas por la topografía circundante provocando, a su vez, variaciones de las cargas aerodinámicas que se podrían prever en caso de terrenos planos. Los Reglamentos de Viento incorporan factores vinculados a las características topográficas que permiten tener en cuenta estas modificaciones para las situaciones más comunes. No obstante, en casos más complejos es necesario simplificar demasiado el análisis con la consiguiente disminución de confiabilidad en el cálculo. En estos casos, el túnel de viento resulta una herramienta muy adecuada para el correcto análisis de este tipo de efecto, siendo que las mediciones a escala natural resultan demasiado costosas. En este estudio se presentan los resultados obtenidos en dos estudios experimentales realizados en el túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE, utilizando modelos a escala, para terrenos complejos de características diferentes destinados, en cada caso, a estructuras que también presentan características muy distintas. Los casos evaluados corresponden a un edificio de gran altura y a un puente atirantado de dimensiones importantes. Los resultados obtenidos a partir de mediciones de valores medios y fluctuantes de velocidad de viento son analizados y comparados con datos de referencia y, finalmente, discutidos para su aplicación en términos de la Normativa de Vientos.

Palabras-clave: Efectos topográficos, túnel de viento, cargas aerodinámicas.

Abstract

Complex terrains are characterized by topographic accidents and non-planar surfaces. The characteristics of the incident wind on structures are modified by the surrounding topography and this local situation produces variations on the provided aerodynamic loads for planar terrains. Wind codes incorporate topographical factors to evaluate common situations, but to analyze more complex cases it is necessary to simplify the real situation and then the reliability of the results decreases. In these cases, wind tunnel tests are an adequate tool because natural scale measurements are very expensive. This work presents results obtained from two experimental studies developed in the “Jacek Gorecki” wind tunnel of the UNNE using scale models for two different complex terrain situations. The cases correspond to a tall building and a long-span bridge. The results obtained from measurements of mean and fluctuating velocity were analyzed and compared with reference data and then, a discussion to evaluate their application in wind codes was realized.

Keywords: topographical effects, wind tunnel, aerodynamic loads.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

1. INTRODUCCIÓN

El perfil de velocidades del viento está influenciado por la rugosidad y la topografía del terreno. En un terreno plano, las velocidades disminuyen conforme su proximidad con la superficie terrestre, determinando a conformación de la capa límite atmosférica. El escurrimiento de viento en terrenos complejos que poseen cerros, montes y taludes, sean estos aislados o múltiples, está definido por un perfil de velocidades modificado, donde para las cotas más próximas a la superficie se observa un aumento de las velocidades.

En el caso de cargas de viento sobre estructuras, estas modificaciones pueden provocar aumentos en los valores de las cargas estructurales de origen aerodinámico. Las normas de viento, en su mayoría, contemplan estas situaciones a través de coeficientes o factores topográficos. La Norma Brasileira NBR-6123 (1988) establece la metodología de cálculo del factor de amplificación de velocidades o factor topográfico S_1 contemplando configuraciones generales y simplificadas para cerros y taludes.

Este estudio tiene por objetivo el análisis experimental de las modificaciones que se producen en los perfiles de velocidad media e intensidad de turbulencia del viento incidente en casos específicos de terrenos complejos. La complejidad del terreno en cuestión, así como las características del escurrimiento resultante, hacen que muchas veces la utilización de soluciones simplificadas, como las indicadas en normas técnicas, conduzcan a resultados que se aparten de la situación real. Entonces, se hace necesaria una verificación experimental de las características del viento en la región de interés a través de modelos a escala reducida en túnel de viento (Davenport and Isyumov, 1967). En este trabajo se presentan dos trabajos experimentales diferentes que corresponden a un edificio de gran altura y a un puente suspendido de dimensiones importantes, caracterizados en ambas situaciones por entornos topográficos complejos. Los ensayos, en ambos casos, fueron realizados en el Túnel de Viento *Prof. Jacek Piotr Gorecki* de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE), Argentina, en colaboración con el *Laboratório de Aerodinâmicas das Construções* (LAC) de la Universidade Federal de Rio Grande do Sul (UFRGS) y la empresa de Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento Ltda., Brasil .

2. CARACTERIZACIÓN DEL PROBLEMA

Las características del viento atmosférico son afectadas por la rugosidad de la zona y por la configuración topográfica local. Un talud o cerro de altura d causa un aumento de la velocidad del viento por el “efecto Venturi”. Este efecto será máximo para viento soplando perpendicularmente a la línea de la cima y para un talud o cerro muy ancho (dimensión transversal al viento), de modo que el flujo pueda considerarse bidimensional (Cook, 1985; Cook, 1990).

Hay una altura de influencia h_i , medida a partir de la base del cerro, hasta la cual las líneas de corriente sufren una deflexión sensible en el plano vertical y el viento es acelerado (Figura 1). Esta altura de influencia depende de la forma y dimensiones del talud o cerro, así como del gradiente térmico vertical. Para vientos fuertes en estabilidad neutra, la influencia de este gradiente puede despreciarse. La altura h_i , en general, se sitúa entre $3d$ y $4d$, de acuerdo con medidas realizadas en viento natural o en túneles de viento (Blessmann, 1982).

Para inclinaciones hasta aproximadamente 17° el aumento de la velocidad causado por ese efecto Venturi se incrementa con la inclinación. Algunos autores afirman que para inclinaciones mayores, el perfil de velocidades medias permanece constante, independientemente de la

inclinación. Esto se debe a la formación de un vórtice en la base de la superficie de barlovento del cerro o talud, que mantiene prácticamente inalterables las líneas de corriente que se formaron con la inclinación de 17° (Blessmann, 1995).

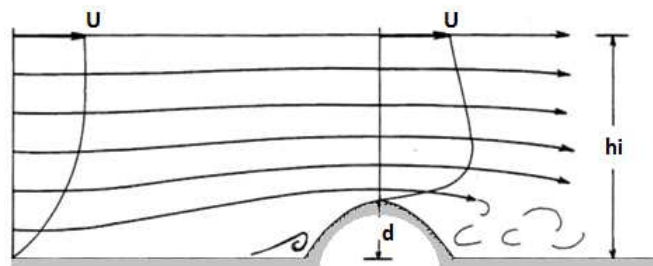


Figura 1. Líneas de corriente en proximidades de un cerro.

El viento sobre terrenos de topografía compleja, tales como los casos que serán analizados a continuación, en los cuales las estructuras de interés están rodeadas de cerros y elevaciones de alturas distintas, son complejos y muy difíciles de prever teóricamente. También resulta difícil afirmar que exista algún efecto de protección con respecto a los cerros más próximos. Los trabajos de investigación (Lemelin et al., 1988; Loredou-Souza et al., 2010; Loredou-Souza et al., 2012; Mattuella, 2012; Miller, 1995) y procedimientos normativos (NBR-6123, 1988; NRCC-30619, 1990) relacionados con la acción del viento en terrenos complejos son muy diversos, no obstante, no existe todavía consenso mundial sobre cuál es la metodología más adecuada. De esta forma, el túnel de viento se muestra como la herramienta más adecuada para evaluar estos efectos.

3. EL TUNEL DE VIENTO DE LA UNNE

Los túneles de viento son equipamientos proyectados para obtener ciertas condiciones de escurrimiento de aire, de forma que puedan desarrollarse estudios de semejanza con la certeza de que las condiciones reales del fenómeno serán reproducidas. Al construirse un túnel de viento, la primera etapa es la evaluación de las características del flujo y el análisis de la posibilidad de reproducir las características de flujo para las que fue diseñado.

El túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la Universidad Nacional del Nordeste (UNNE) es un túnel de capa límite de circuito abierto, también denominado tipo Eiffel. La longitud total del túnel es de 39,65 m (Figura 2). La cámara de ensayos tiene 2,4 m de ancho \times 1,8 m de alto \times 22,8 m de largo. Posee dos mesas de ensayos giratorias de 1,2 m de diámetro; una a 3,8 m del inicio de la cámara de ensayos y la otra a 19,4 m, denominada mesa II.

Un ventilador axial de 2,25 m de diámetro accionado por un motor trifásico inductivo de 92 kW produce una velocidad máxima en vacío de 25 m/s en la mesa II. La regulación de la velocidad se hace a través de un regulador de caudal mecánico. El aire es succionado por el ventilador y, antes de salir del túnel de viento, pasa a través de un difusor que evita una desaceleración tan brusca (Wittwer and Möller, 2000).

4. TÉCNICAS DE SIMULACIÓN DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA

Las técnicas de simulación de la capa límite atmosférica implementadas en el túnel de viento para estos ensayos fueron diferentes en cada uno de los estudios presentados. En el caso

del edificio de gran altura, la técnica empleada se encuentra comprendida dentro de los métodos de rugosidad, barrera y dispositivo de mezcla (Cook, 1978), que permiten obtener escalas de simulación adecuadas para su utilización en el área estructural. La longitud de rugosidad superficial sobre el piso del túnel, durante los ensayos se modifica en función de la categoría de terreno a reproducir. A barlovento, se ubican cuatro generadores de vorticidad del tipo Counihan, mostrados en la Figura 2 (centro), para generar un déficit inicial de cantidad de movimiento (Cook, 1982) y distribuirlo en altura para obtener características semejantes a las atmosféricas. El espesor de la capa límite obtenida, denominado también altura gradiente, alcanza un valor de 1.20 m.

En el caso de la evaluación experimental referida al puente atirantado, se utilizó una simulación natural. Esto implica usar solamente rugosidad superficial distribuida en 14 m del largo de esta sección, como se indica en la Figura 2 (derecha), sin incluir otros dispositivos simuladores. De esta forma, se obtuvo una capa límite de aproximadamente 500 mm de espesor.

Conforme la clasificación que aparece en los reglamentos de viento, los flujos atmosféricos simulados corresponden a las categorías de mar abierto y terreno suburbano. Es decir, el perfil potencial de velocidades medias para el viento incidente tiene un exponente $p = 0,15$. En el caso de la NBR-6123, define terrenos con rugosidad entre las categorías I y II.



Figura 2. Túnel de viento “Jacek P. Gorecki”, generadores de Counihan y elementos de rugosidad para la simulación del viento natural.

5. EVALUACIÓN DE EFECTOS TOPOGRÁFICOS – EDIFICIO EN CAMBORIU

Estructuras edilicias de ciertas dimensiones que se construyen en zonas con topografías complejas presentan dificultades para la evaluación de cargas aerodinámicas. Estas situaciones no son específicamente contempladas en los Reglamentos de Viento y en muchos casos es conveniente realizar ensayos en túnel de viento, en los cuales se pueden obtener coeficientes topográficos o, directamente, determinar coeficientes aerodinámicos de carga. Aquí se presentan los resultados de ensayos realizados para las modificaciones que provoca la topografía y el entorno urbano en los perfiles de viento incidente actuando sobre un edificio que tiene una altura de aproximadamente 215 m y está emplazado en el Balneario Camboriu, SC, Brasil (Figura 3). El estudio fue realizado en conjunto por la empresa Vento-S, Consultoria em Engenharia do Vento Ltda. y el Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE (Argentina).

5.1. Descripción del trabajo experimental

Los ensayos fueron realizados sobre un modelo topográfico a escala 1/400 en el túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. Se tuvieron en cuenta las

condiciones reales de vecindad en torno a la estructura, así como las características medias y los parámetros de turbulencia del viento atmosférico correspondiente al terreno de emplazamiento de la estructura. Las mediciones de las velocidades medias y fluctuantes se obtuvieron con un anemómetro de hilo caliente.

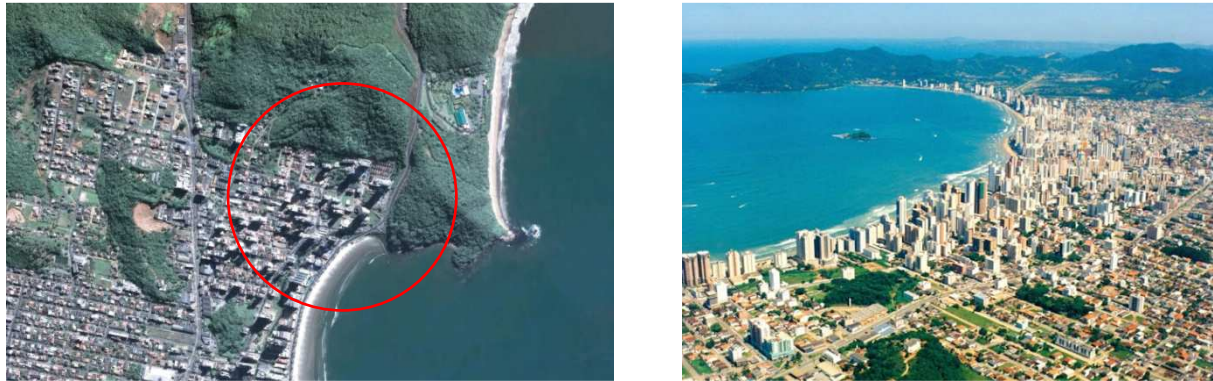


Figura 3. Características topográficas y entorno edilicio del lugar de emplazamiento del edificio, Camboriú, SC.

En función de los accidentes topográficos más próximos, constituidos por dos cerros de con alturas superiores a 85 m, se determinaron dos direcciones a ser analizadas. Estas direcciones, una vez definido el modelo, fueron designadas como 37.5° y 345° . Las Figuras 4 y 5 muestran fotografías del modelo topográfico, incluyendo el entorno edilicio próximo, dispuesto en la cámara de ensayos del túnel de viento para cada dirección, respectivamente. Complementariamente, la Figura 6 muestra los respectivos esquemas en planta correspondientes a cada una de las dos direcciones de viento analizadas.



Figura 4. Montaje del modelo para la dirección de viento correspondiente a 37.5° .

5.2. Perfiles verticales de velocidad media e intensidad de turbulencia

En la Figura 7 se muestran los perfiles de velocidad media adimensional para el viento incidente sin efectos topográficos (izquierda), para la posición del emplazamiento del edificio (centro) y sobre los cerros que definieron las direcciones de viento 37.5° y 345° (derecha). En la posición del edificio no se registran incrementos de velocidad respecto al viento incidente, ni

quiera en los puntos superiores a los 100 m (250 mm en la escala del modelo indicada en los gráficos). En los puntos inferiores se verifica claramente la disminución de velocidad producto de efecto de “protección” de los cerros para las dos direcciones analizadas. Las mediciones complementarias realizadas sobre los propios cerros si indican aumentos de velocidad con respecto al viento incidente, aunque es posible verificar que los valores máximos se mantienen siempre en torno al máximo de referencia.



Figura 5. Montaje del modelo para la dirección de viento correspondiente a 345°.

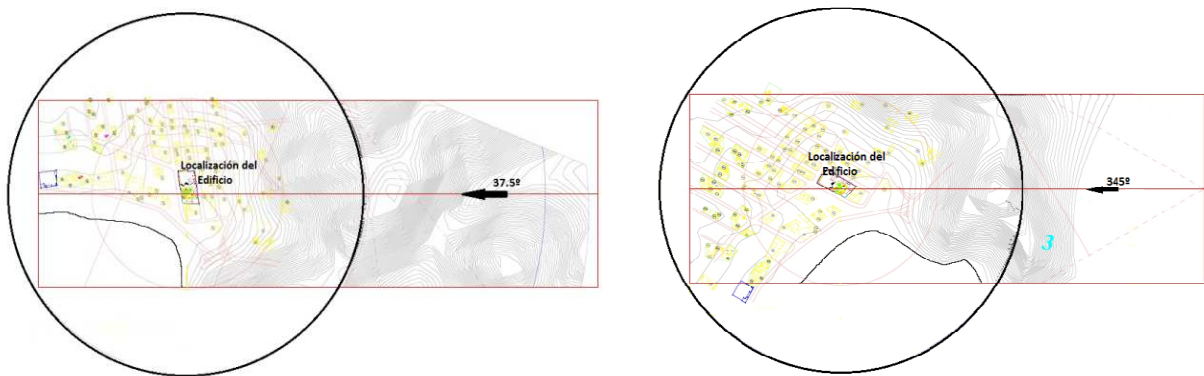


Figura 6. Esquemas de los modelos para las direcciones de viento correspondientes a 37.5° y 345°.

Los perfiles de intensidad de turbulencia normalizada se muestran en la Figura 8, dispuestos de la misma forma que en el caso de las velocidades. En la posición donde será emplazado el edificio, para la dirección correspondiente a 37.5°, se registran dos picos de intensidad de turbulencia, característicos de un desprendimiento de vórtices; el pico ubicado más abajo (110 mm) seguramente corresponde al efecto localizado de otro edificio del entorno, mientras que el segundo, ubicado a 240 mm, es producto del cerro a barlovento. Para la dirección de viento de 345°, se registra solamente un pico ubicado a la altura de 160 mm, pero en los puntos inferiores los valores de intensidad de turbulencia se mantienen bastante elevados y constantes. Los valores de los perfiles medidos de forma complementaria sobre los propios cerros indican los picos por desprendimiento de vórtices encima de la altura que define el mayor

gradiente vertical sobre la superficie de cada cerro. Los valores de intensidad en esos picos son del mismo orden que los obtenidos en la posición del edificio.

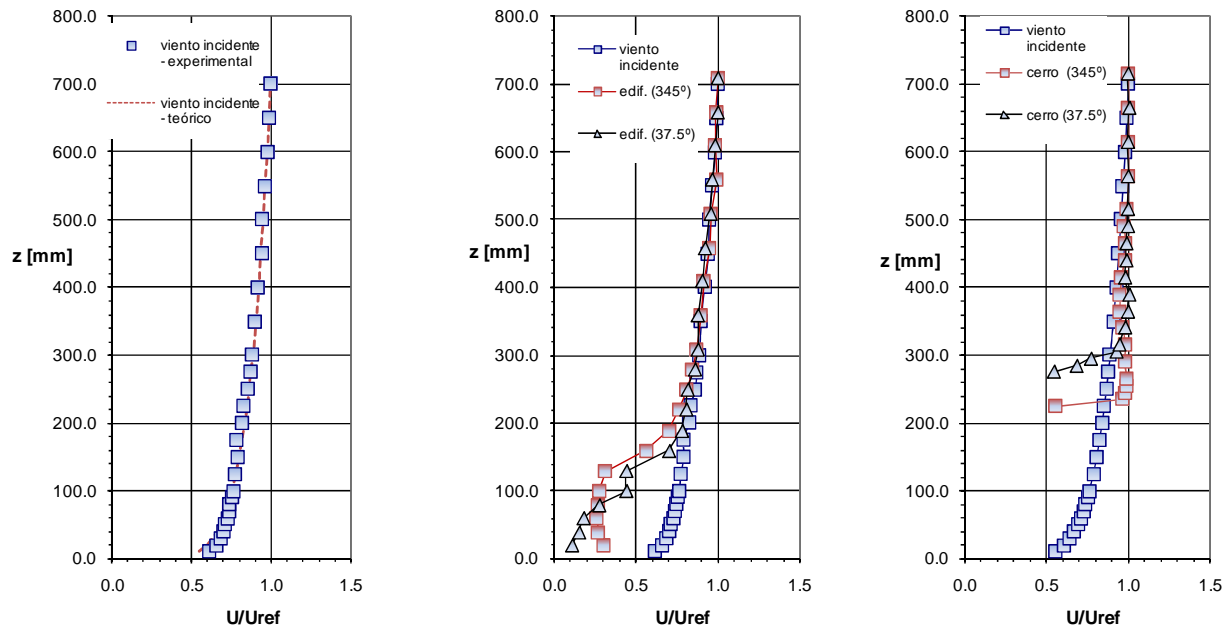


Figura 7. Perfiles de velocidad media del viento incidente, en la posición del edificio y sobre los cerros.

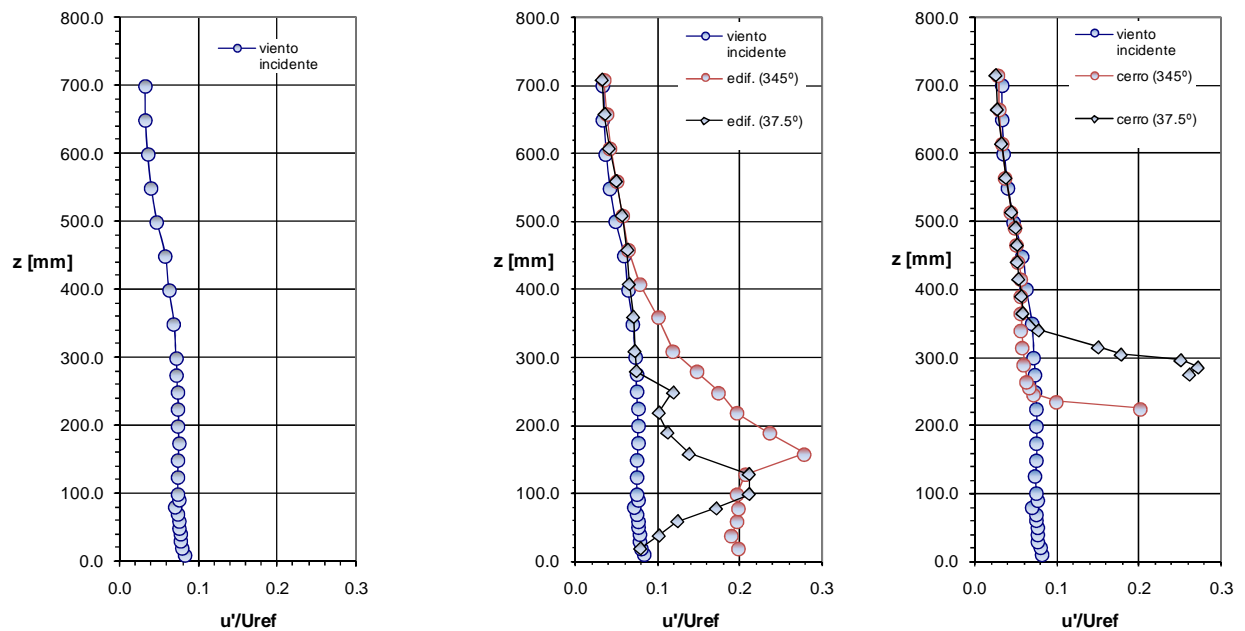


Figura 8. Perfiles de intensidad de turbulencia del viento incidente, en la posición del edificio y sobre los cerros.

5.3. Análisis de las mediciones

En general, es posible observar un efecto de protección con respecto al viento incidente medio. Es decir, los coeficientes topográficos que deben afectar al cálculo de los coeficientes aerodinámicos de carga son menores que 1. Inclusive analizando los perfiles medios sobre los cerros, los coeficientes topográficos serían muy próximos a 1, lo que además muestra que el efecto de bloqueo en el túnel de viento, producto del modelo topográfico no es excesivo.

Con respecto a los efectos de la turbulencia generada por el entorno topográfico, además de los efectos localizados para las direcciones evaluadas, es posible detectar el efecto local de otro edificio para una de las direcciones. Para evaluar posibles efectos dinámicos localizados sobre partes sensibles del edificio, debería realizarse un análisis espectral de la turbulencia. Asimismo, podrían evaluarse posibles problemas de confort, también localizados, asociados al incremento de la turbulencia.

Finalmente, para profundizar el análisis, deberían verificarse datos locales de viento y su correlación con estas dos direcciones de viento incidente.

6. EVALUACIÓN DE EFECTOS TOPOGRÁFICOS – PUENTE EN LAGUNA

A continuación, se describe el estudio del escurrimiento del viento en la región donde se sitúa el puente atirantado sobre el Canal Laranjeiras - BR-101, Laguna, SC. Una perspectiva artística del puente, las principales características de su trazado e indicaciones referentes a la topografía del terreno se exhiben en la Figura 9. El objetivo del estudio es la evaluación de las características del viento incidente en la región de interés, principalmente en los puntos donde se localizan los dos mástiles de la estructura y en la parte central del vano principal, a través de la simulación del viento natural en el túnel de capa límite considerando los efectos topográficos.

La complejidad del terreno, así como las características del flujo resultante, indican que la utilización de soluciones simplificadas, tales como las presentadas en normas, puedan conducir a resultados que se aparten mucho de la situación real. Entonces, se hace necesaria una verificación experimental de las características del escurrimiento en la región de interés a través de un modelo a escala en túnel de viento. El análisis experimental fue realizado en el Laboratorio de Aerodinámica de la UNNE (Argentina) y la evaluación de resultados se realizó en conjunto con especialistas de la empresa Vento-S, Consultoria em Engenharia do Vento Ltda.

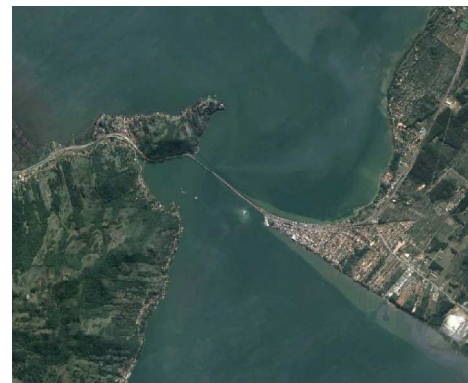


Figura 9. Vista de la maqueta computacional del Puente atirantado e identificación de la rugosidad del terreno por satélite.

6.1. Descripción del trabajo experimental

El modelo reducido del entorno fue construido en escala geométrica 1:2000 con base en el levantamiento topográfico y los ensayos fueron realizados en el túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la Facultad de Ingeniería de la UNNE. Las características del viento atmosférico corresponden al terreno donde está localizado el puente. Las mediciones de velocidad fueron realizadas con un anemómetro de hilo caliente.

La Figura 10 indica el levantamiento topográfico, la posición de la mesa de ensayos y el detalle de la referencia para el ángulo de incidencia del viento. Complementariamente, la Figura 11 muestra fotografías del modelo topográfico dispuesto en la cámara de ensayos del túnel de viento, que tiene 2,40 m de ancho \times 1,80 m de altura \times 22,80 m de longitud, donde el viento atmosférico fue simulado utilizando rugosidad superficial distribuida en 14 m del largo de esta sección. De esta forma, se obtuvo una capa límite de aproximadamente 500 mm de espesor, con un perfil potencial de velocidades medias para el viento incidente de exponente $p = 0,15$.

La caracterización previa del escurrimiento fue realizada mediante un estudio de visualización con viento incidente a partir de nueve ángulos, identificados en la Figura 10: 0° , 30° , 60° , 90° , 120° , 150° , 180° , 195° e 210° . Fueron colocados hilos flexibles en la región del puente como elementos de visualización del flujo. El estudio permitió definir las direcciones más relevantes para la evaluación de los lugares más indicados para posicionarlas sondas del anemómetro de hilo caliente.

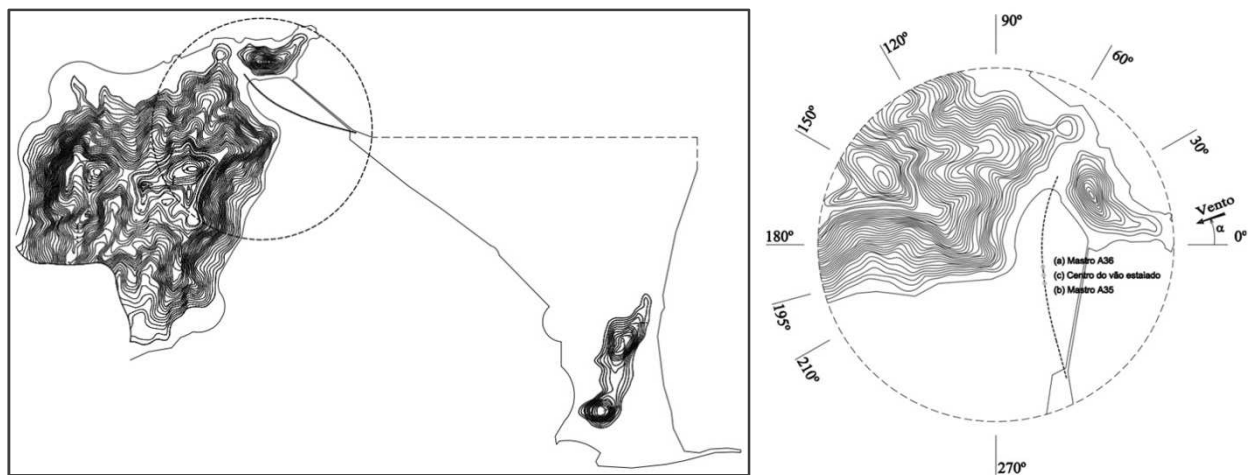


Figura 10. Levantamiento topográfico, mesa de ensayos y referencia para el ángulo de incidencia del viento.

6.2. Perfiles verticales de velocidad media e intensidad de turbulencia

Fueron evaluadas las características del escurrimiento atmosférico en la región de localización del puente para las nueve direcciones de viento incidente mencionadas (Figura 10). Los valores de velocidad media y de la intensidad local de turbulencia obtenidos para la dirección de viento 0° fueron considerados los perfiles de referencia para la comparación con las otras direcciones de viento. Fue constatado un buen ajuste de los valores experimentales al perfil potencial hasta la altura de 200 mm, que equivale a 400 m en escala real.



Figura 11. Modelo topográfico en la cámara de ensayos del túnel de viento.

En la Figura 12 se indica el perfil de velocidad media para el viento incidente, la comparación de este con el perfil en el punto (c) para la dirección de 90° y, finalmente, la comparación con los perfiles para la dirección de 180° en los puntos (a) y (b). Para 90° se produce el mayor aumento en la velocidad media, lo que está de acuerdo con la configuración topográfica a barlovento del punto de medición, el cual provoca una canalización o estrechamiento del flujo entre ambos cerros. Este aumento en los valores de velocidad debe ser considerado en la evaluación de los efectos estáticos del viento. Para la dirección de 180° , en el punto (a), los efectos del cerro mayor a barlovento provocan una pequeña disminución de velocidad media entre 20 y 50 mm de altura (entre 40 y 100m en escala real). Además, es posible observar diferencias entre las posiciones (a) y (b), siendo que en este último punto se verifica un ligero aumento de velocidad.

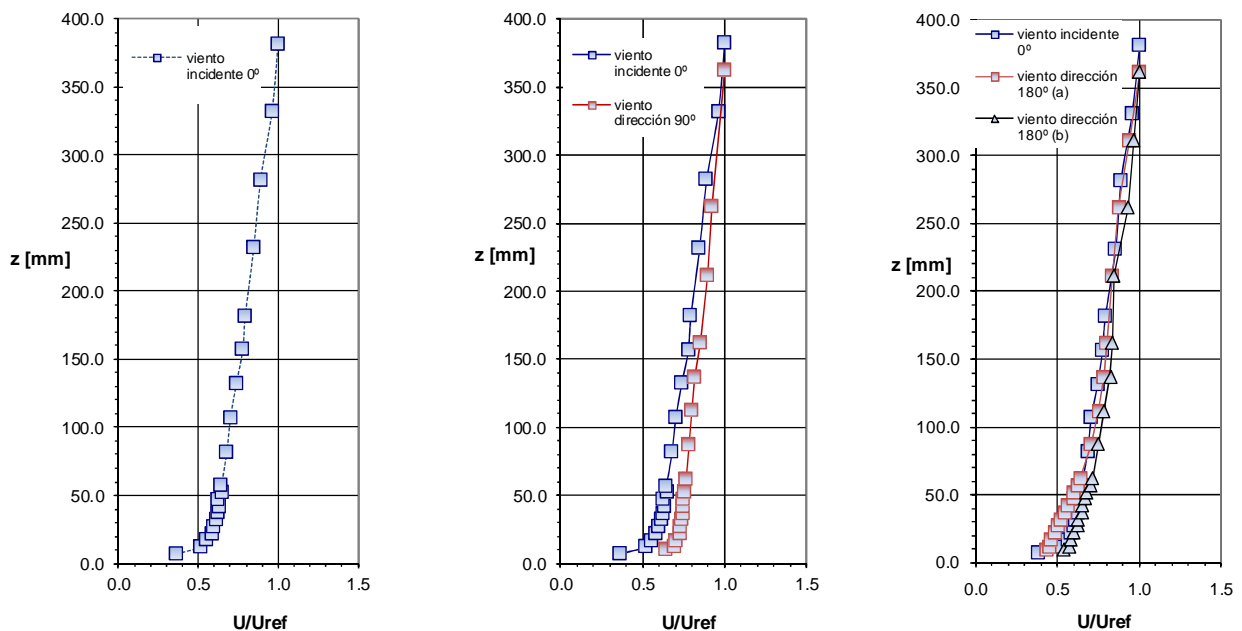


Figura 12. Perfiles de velocidad media del viento incidente, en la dirección de 90° y en la dirección de 180° .

En la Figura 13 se realiza una comparación semejante para los perfiles de intensidad de turbulencia. Para la dirección de 90° , la disminución de la intensidad local de turbulencia se debe básicamente al incremento local de la velocidad media, siendo que las fluctuaciones de velocidad permanecen prácticamente inalteradas. Para la dirección de 180° , en el punto (a) se verifica un incremento significativo de la intensidad de turbulencia, sobre todo en los 70 mm (140 m a escala real) inferiores del perfil, y también es posible observar diferencias entre los puntos (a) e (b), en cuanto a la configuración de los perfiles.

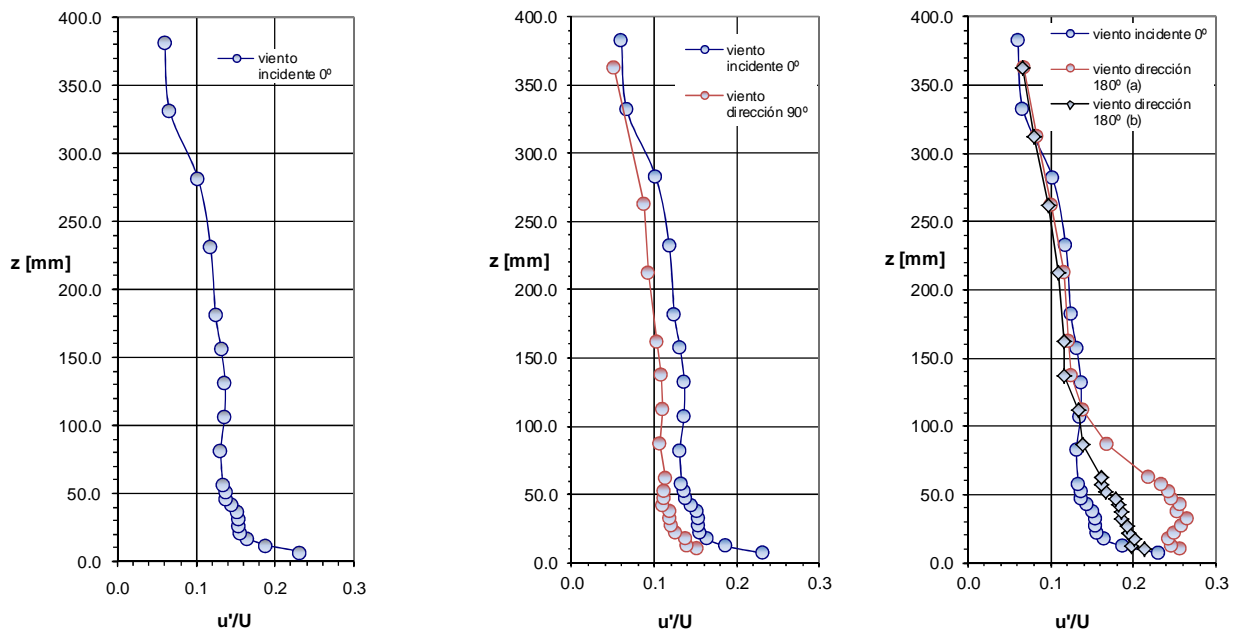


Figura 13. Perfiles de intensidad de turbulencia del viento incidente, en la dirección de 90° y en la dirección de 180° .

6.3. Análisis espectral de la turbulencia

La evaluación de los espectros de la componente longitudinal de la turbulencia fue realizada con el objeto de caracterizar los efectos del entorno topográfico con relación a las escalas de turbulencia del viento incidente. A partir de la caracterización del viento incidente en la situación de menor perturbación a barlovento (dirección 0°), se realizaron comparaciones con los espectros obtenidos en la zona donde está localizado el puente, para las direcciones consideradas más afectadas por la topografía próxima. Los espectros fueron determinados en tres alturas distintas para las posiciones (a), (b) e (c) definidas en la Figura 10. Las alturas son; cota z_1 , a 12 mm del piso del túnel (24 m en escala real); cota z_2 , a 27 mm del piso del túnel (54 m en escala real), que representa aproximadamente la mitad de la altura del mástil; y cota z_3 , a 40 mm del piso del túnel (80 m en escala real), que representa aproximadamente la altura total del mástil.

Para obtener los espectros, se realizaron registros de las velocidades fluctuantes de 64 segundos de duración, utilizando una frecuencia de adquisición de 2048 Hz. Durante las mediciones, se usó un filtro pasa-bajos ajustado a 1 kHz. Los espectros fueron obtenidos mediante un programa computacional de procesamiento basado en la rutina de la FFT (*Fast Fourier Transform*).

A modo de resumen de la evaluación espectral, en la Figura 14 se presenta la comparación de los espectros obtenidos a la altura z_1 con viento incidiendo a 0° y 60° , para las posiciones (a) y (b). En la Figura 15, nuevamente los espectros correspondientes a 0° son comparados con los espectros obtenidos con viento incidente en dirección 60° , en la posición (a) para las alturas z_2 y z_3 . Los espectros correspondientes a 0° son considerados como los valores de referencia, de forma que los espectros obtenidos en la dirección de 60° permiten caracterizar las modificaciones provocadas por el cerro menor en la distribución de la turbulencia, en el dominio de la frecuencia. Las modificaciones del espectro, producto de la generación de turbulencia por la presencia del cerro a barlovento comienza en torno de los 10 Hz, pero el efecto más visible ocurre a partir de los 40 Hz. En general, también para las demás direcciones se produce una modificación de los espectros a partir de una determinada frecuencia, siendo esta perturbación más clara después de los 40 Hz, a pesar de que ningún caso presenta una frecuencia específicamente definida indicando un desprendimiento de vórtices.

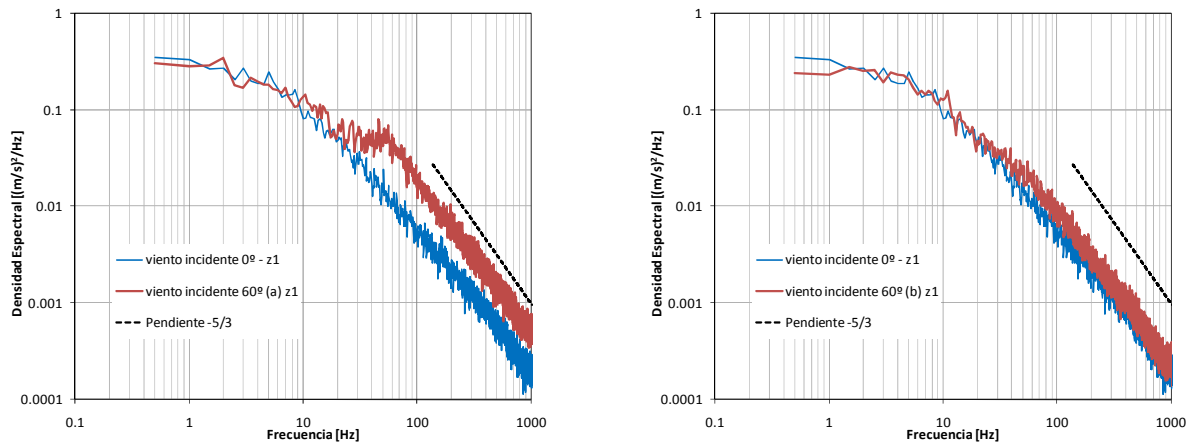


Figura 14. Comparación de los espectros en la región del puente para viento incidente 0° y 60° (a), a la izquierda, y 60° (b), a la derecha – altura z_1 .

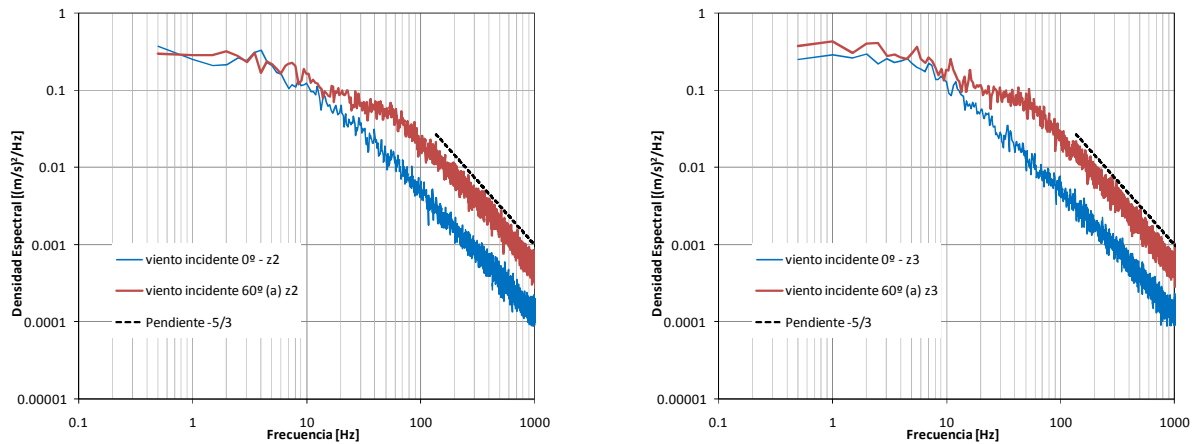


Figura 15. Comparación de los espectros en la región del puente para viento incidente en las direcciones de 0° y 60° (a) – alturas z_2 y z_3 .



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

6.4. Evaluación de los resultados

Los estudios fueron realizados a través de ensayos de visualización del escurrimiento y mediciones de velocidad del viento con un sistema de anemometría de hilo caliente. Fueron obtenidos los perfiles de velocidades medias, intensidades locales y espectros de potencia de la componente longitudinal de la turbulencia para tres posiciones: mástil (a); mástil (b) y centro del vano entre mástiles, llamado punto (c), conforme Figura xx8. La visualización permitió definir las direcciones más relevantes para la evaluación cuantitativa del campo de velocidades mediante el sistema de anemometría.

El análisis de los perfiles verticales de velocidad media e intensidad de turbulencia permite constatar que el mayor aumento de velocidad media ocurre en la dirección 90° , debido a la canalización del viento entre ambos cerros. Si bien no se presentan los perfiles, los efectos más nítidos del cerro menor se manifiestan en la dirección de viento incidente de 60° , verificándose una disminución de la velocidad y aumento de la intensidad de turbulencia en la región de localización del puente. De la misma forma, en la dirección de 180° , donde el cerro mayor se encuentra a barlovento de la posición de medición, se observa un comportamiento semejante.

A partir de las evaluaciones de los perfiles de viento, fueron definidas las posiciones para realizar el análisis espectral. La comparación de los espectros de referencia (0°) con los espectros medidos para la dirección de 60° , donde se verifican incrementos de las fluctuaciones de velocidad, permite observar variaciones en la distribución de energía de la turbulencia, en el dominio de la frecuencia. Por otro lado, los espectros no presentan picos espectrales claramente definidos que indiquen la existencia de algún fenómeno específico que pueda actuar en la zona de localización del puente.

El estudio permite concluir que en la evaluación estática de las cargas de viento deberían considerarse los incrementos de velocidad media que se producen en la dirección de 90° . En caso de que el proyectista opte por utilizar aproximaciones que incluyen valores fluctuantes medios, deberían ser considerados los valores RMS de las fluctuaciones de velocidad obtenidos en este estudio para la dirección de 60° .

Con relación a la evaluación de las acciones dinámicas del viento, las modificaciones espectrales no indican la existencia de algún fenómeno caracterizado por una frecuencia específica. A pesar de esto, debe resaltarse la importancia de la incorporación de los efectos del aumento de energía de las fluctuaciones de velocidad del viento en el modelado físico y analítico de los efectos de viento sobre la estructura del puente.

7. CONCLUSIONES

Fueron presentados los resultados obtenidos en dos estudios experimentales realizados en el túnel de viento “Jacek P. Gorecki” de la UNNE, utilizando modelos a escala, para terrenos complejos de características diferentes. Los casos analizados corresponden a un edificio de gran altura y a un puente atirantado de dimensiones importantes. El análisis incluye la evaluación de perfiles de velocidad media, intensidad de turbulencia y, en el caso del puente, espectros de turbulencia.

En el caso del edificio en altura, de forma general, fue posible determinar un efecto de protección de la topografía con respecto al viento incidente medio. Es decir, al aplicarse la norma de viento correspondiente, en este caso la NBR-6123, el cálculo de los coeficientes aerodinámicos de carga deberá ser realizado usando coeficientes topográficos cuyos valores son



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

menores que uno. Por otro lado, por debajo de los 100 m de altura, los valores de intensidad de turbulencia se mantienen bastante elevados, por lo que sería aconsejable realizar una verificación mediante una aproximación que incluya valores fluctuantes medios o valores pico para analizar posibles efectos localizados.

El estudio experimental del viento incidiendo sobre el puente permitió determinar que la dirección de mayor aumento de velocidad media (90°) no corresponde a una ubicación desfavorable de la estructura. Asimismo, se determinaron las direcciones de viento en que los valores de intensidad de turbulencia son bastante elevados (60° y 180°), y por lo tanto debería contemplarse aplicar una aproximación que considere valores fluctuantes medios o pico. Finalmente, el análisis espectral no permite establecer la existencia de fenómenos con frecuencias características definidas que podrían provocar efectos dinámicos específicos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del Laboratório de Aerodinâmica das Construções (LAC, UFRGS), del Laboratorio de Aerodinámica (UNNE) y de la empresa Vento-S Consultoria em Engenharia do Vento Ltda. Asimismo agradecen el apoyo financiero del Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) y de la Secretaria General de Ciencia y Técnica (SGCYT, UNNE).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (1988). NBR-6123 – Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro.
- Associate Committee on the National Building Code (1990) National Building Code of Canada. National Research Council of Canada, Ottawa, NRCC 30619.
- Blessmann, J. (1982). The Boundary Layer Wind Tunnel of UFRGS. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 10. pp. 231-248.
- Blessmann, J. (1995). O vento na engenharia estrutural. Porto Alegre. Ed. Universidade. UFRGS.
- Cook, N. J. (1978). Wind-Tunnel Simulation of the Adiabatic Atmospheric Boundary Layer by Roughness, Barrier and Mixing-Device Methods. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 3, pp. 157-176.
- Cook, N. J. (1982). Simulation techniques for short test-section wind tunnels: roughness, barrier and mixing-device methods. *Wind tunnel Modeling for Civil Engineering Applications*, Cambridge university press, pp. 126-136.
- Cook, N.J. (1985). The designer's guide to wind loading of building structures. Part 1. (Building Research Establishment). Butterworths, London, UK.
- Cook, N. J. (1990) The designer's guide to wind loading of building structures. Part 2: Static Structures. (Building Research Establishment). London, UK.
- Davenport, A. G., Isyumov, N. (1967) The Application of the Boundary Layer Wind Tunnel to the Prediction of Wind Loading. In: *Proceedings of the International Research Seminar: Wind Effects on Buildings and Structures*. Ottawa, Canada. September 11-15. Vol. 1. pp. 201-230.
- Lemelin, D.R., Surry, D., Davenport, A.G. (1988). Simple approximations for wind speed-up over hills. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 28. pp. 117-127. Elsevier.



La Ingeniería Estructural, motor del desarrollo en América, en un marco de Integración y Sustentabilidad

- Loredou-Souza, A. M., Mattuella, J. M. L., Oliveira, M. G. K. (2010). Investigation of the atmospheric boundary layer characteristics over complex terrains. In: DEWEK 2010 - 10th German Wind Energy Conference, 2010, Bremen. Proceedings of the 10th German Wind Energy Conference - Dewek 2010.
- Loredou-Souza, A. M., Mattuella, J. M. L., Oliveira, M. G. K. (2012). Investigation of the Atmospheric Boundary Layer Characteristics over Different Hills. In: DEWEK 2012 - 11th German Wind Energy Conference, 2012, Bremen. Proceedings of 11th German Wind Energy Conference - Dewek 2012.
- Mattuella, J. M. L. (2012). Avaliação em túnel de vento do comportamento da camada limite atmosférica em terrenos complexos. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre.
- Miller, C.A. (1995). Turbulent Boundary Layers Above Complex Terrain. Ph.D. Thesis. University of Western Ontario. London, Canada.
- Wittwer, A. R., Möller, S. V. (2000). Characteristics of the low speed wind tunnel of the UNNE. J. Wind Eng. Ind. Aerodyn., 84 (3), pp. 307-320.