

# Vientos descendentes extremos en el análisis y diseño de estructuras

RIERA, Jorge D.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Profesor Invitado, PPGEC, Universidad Federal de Río Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil. [jorge.riera@ufrgs.br](mailto:jorge.riera@ufrgs.br)

## RESUMEN

Debido a su menor frecuencia de ocurrencia, los vientos ocasionados por corrientes descendentes, también denominadas tormentas eléctricas, han recibido tradicionalmente una atención marginal en la literatura técnica, en comparación con los vientos causados por sistemas sinópticos. Esta situación es sorprendente, pues en los Estados Unidos de América, por ejemplo, las tormentas eléctricas son las responsables de la mayor parte del daño económico anual atribuido a causas naturales. La relevancia económica de dichos eventos es posiblemente mayor en países como Brasil, cuyos territorios son caracterizados por moderado o bajo riesgo sísmico. Este artículo describe la evolución del conocimiento, en la Ingeniería Estructural, de la relevancia y las correspondientes frecuencias de ocurrencia de fenómenos meteorológicos que causan vientos intensos en las capas inferiores de la atmósfera, incluyendo una propuesta para la determinación de la frecuencia de ocurrencia, así como las cargas inducidas en las estructuras por las corrientes descendentes.

**Palabras Claves:** Viento, Frecuencia de ocurrencia, Tormentas eléctricas, Cargas extremas.

## ***Extreme downburst winds in structural engineering analysis and design***

### **Abstract**

*On account of their lower frequency of occurrence, downburst winds have traditionally received marginal attention in Engineering analysis and design, in comparison to winds caused by synoptic storms. This is rather surprising since in the USA, for instance, thunderstorms account for most of the annual economic damage attributed to natural causes. This unbalance is possibly more pronounced in countries like Brazil, that are characterized by low or moderate seismic risk. The paper discusses the evolution of engineering knowledge, relevance and corresponding frequencies of occurrence of different meteorological phenomena that cause extreme winds in the lower atmosphere, including a proposal to evaluate the frequency of occurrence as well as the loads resulting from downbursts, for purposes of structural analysis and design.*

**Keywords:** *Wind effects, Frequency of Occurrence, Downbursts, Extreme Loads.*

## Introducción

Con excepción de los tornados, que se consideran por separado, la carga de viento para el diseño estructural de edificios y otras estructuras generalmente se escala a la componente horizontal del vector de velocidad a 10 m de altura sobre el terreno abierto, definida como la velocidad del viento de referencia, independientemente del tipo de fenómeno meteorológico que origine el evento. Esta simplificación, aceptada a principios del siglo XX por todos los primeros códigos de viento de Europa, es válida sólo cuando el viento es el resultado de tormentas a escala sinóptica, comúnmente designadas por los meteorólogos como Sistemas de Presión Extendida (EPS). Los vientos fuertes, sin embargo, a menudo son causados por eventos no sinópticos, como ráfagas descendentes (tormentas eléctricas o vientos TS), que en las regiones templadas suelen constituir la causa más importante de velocidades extremas de vientos. **Riera y Nanni** (1989) y posteriormente **Riera et al** (1989) demostraron que las series anuales de vientos intensos EPS y TS registradas en estaciones meteorológicas brasileñas seleccionadas se caracterizan por tener diferentes distribuciones de probabilidades. Se encontró que las distribuciones de Tipo I presentan el mejor ajuste para la mayoría de las series anuales de vientos brasileños EPS y TS disponibles en ese momento, mientras que una distribución de Tipo II (Frechet) se ajusta mejor a las series mixtas (series combinadas). Esto se ilustra en las Figuras 1 y 2, que muestran los datos de las velocidades extremas anuales mixtas de viento registradas en dos estaciones aeroportuarias de Porto Alegre (Brasil), trazadas en papel probabilístico de Tipo I. La relación no es lineal en todo el campo de variación de X. Sin embargo, las ecuaciones lineales son válidas para valores pequeños y grandes de X, con un límite  $\xi c$  entre ambos rangos que difiere ligeramente para las estaciones meteorológicas situadas en diferentes regiones. La transición puede ser modelada por la función logística  $f[\ln(X)]$ . Estableciendo  $\xi = \ln(X)$ , las ecuaciones resultantes son:

$$\text{Log } N(\xi) = (a_1 - b_1 \xi) f(\xi) + (a_2 + b_2 \xi) [1 - f(\xi)] \quad (1)$$

$$f(\xi) = \exp[-(\xi - \xi_c)/0.025] / \{1 + \exp[-(\xi - \xi_c)/0.025]\} \quad (2)$$

Adoptando por prueba y error un parámetro de ubicación  $\xi c = 0,3$  para la función logística, conduce para Estación 1 y Estación 2 a los coeficientes  $a_1 = 46,802$  (42,569),  $b_1 = 2,907$  (2,486),  $a_2 = 43,934$  (34,440) y  $b_2 = 17,297$  (25,395).

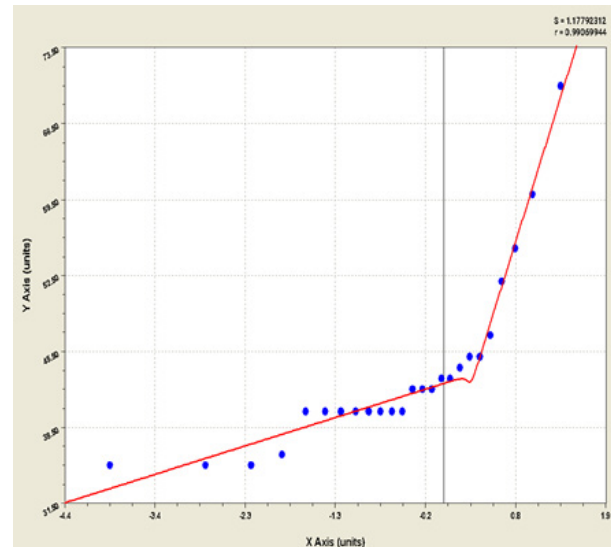


Figura 1. Velocidad de viento en estación 1.

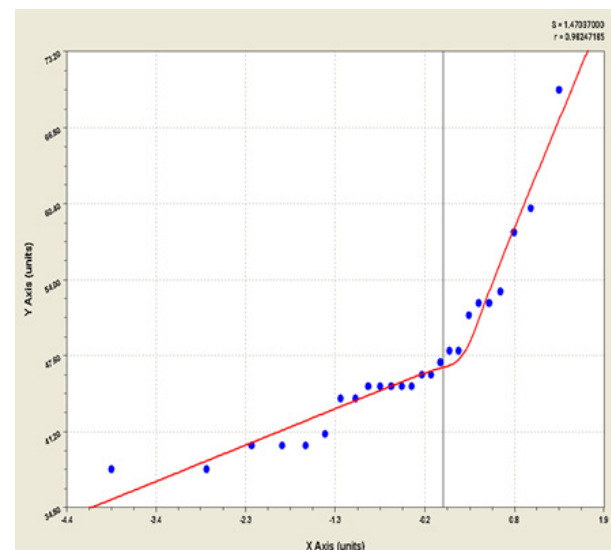
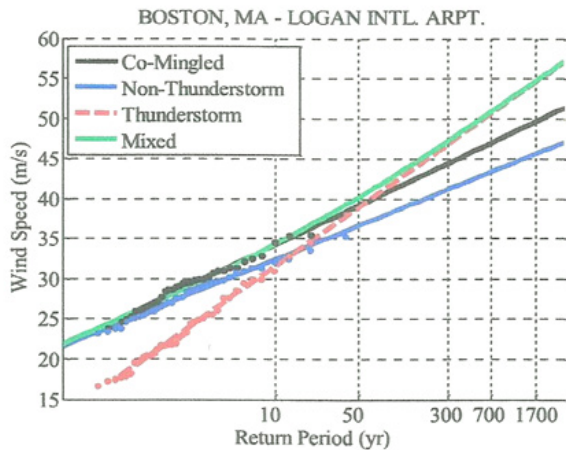


Figura 2. Velocidad de viento en estación 2

Los resultados de ambas estaciones, distantes a menos de un kilómetro entre sí, confirman que los vientos EPS y TS pueden modelarse mediante distribuciones de Tipo I. Las líneas rectas de la izquierda en ambos gráficos corresponden a eventos EPS, mientras que las líneas rectas de la derecha corresponden a

eventos TS seguramente transportados por tormentas EPS en las llamadas líneas de inestabilidad (squall lines).



**Figura 3.** Vientos “mixtos” (Boston, MA)

En el mapa de velocidades del viento del Código ASCE 7 2016, así como en la Norma AS / NZS 1170.2-2011 de Australia/Nueva Zelanda, observaciones similares llevaron a que consideraran los vientos TS por separado de los vientos EPS. La Figura 3 muestra un gráfico de las series de vientos EPS y TS registradas en el Aeropuerto Internacional Logan (Boston, MA), que también están modeladas satisfactoriamente por distribuciones de Tipo I, en las que la distribución TS tiene una pendiente más pronunciada y, por lo tanto, gobierna la velocidad del viento para fines de diseño en la región de baja probabilidad (**Letchford y Lombardo 2015**). **Vallis et al (2018)** y **Vallis (2019)** llegaron a conclusiones idénticas, quienes concluyen que los vientos extremos asociados a ráfagas descendentes se describen típicamente mediante distribuciones de Tipo I en las siete regiones geográficas propuestas para la revisión del Código de Vientos NBR 6123 de 1988.

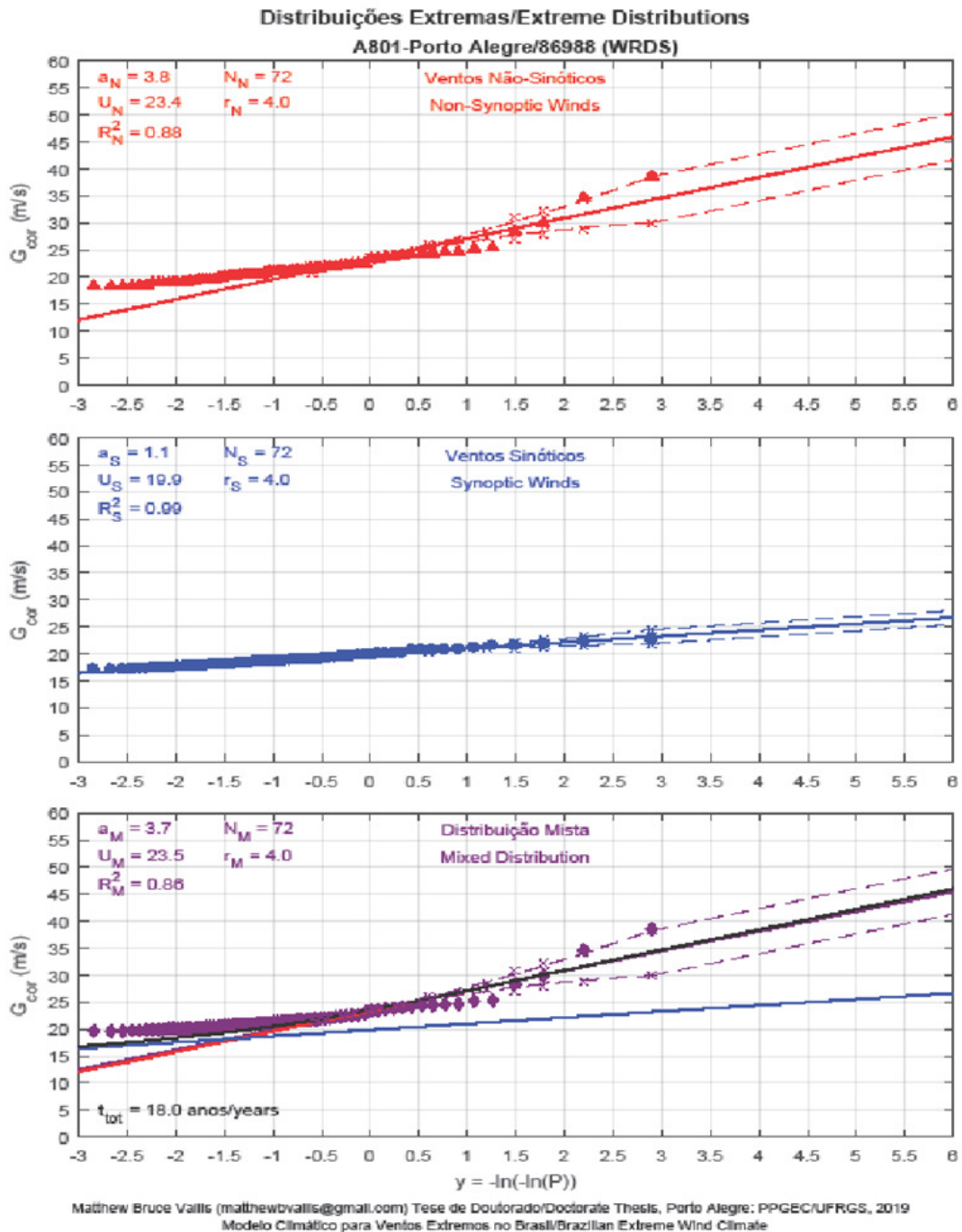
Sin embargo, la Figura 4, que se considera representativa de las estaciones meteorológicas con más de 30 años de registros ininterrumpidos, muestra claramente que, en la estación de registro, a diferencia de los vientos EPS, los vientos TS no se caracterizan por una distribución de Tipo I en toda la gama de frecuencias, sino por dos distribuciones de tipo I (o por una distribución de Tipo II). La segunda distribución de Tipo I,

probablemente correspondiente a eventos dentro de las líneas de inestabilidad, se identifica en la figura con una línea azul recta. La evidencia de tal desviación de una sola distribución de Tipo I se puede encontrar en aproximadamente el 20% de la base de datos recopilada por Vallis (2019), que involucra un grupo de estaciones caracterizadas por más de 30 años de operación continua. En cualquiera de los casos, las distribuciones presentadas en las Figuras 1 a 4 son características de las regiones templadas y llevan a la conclusión de que la carga máxima de viento en esos lugares debe estar asociada a eventos TS, al menos para construcciones de baja o media altura. Esto constituye una dificultad bastante seria porque los procedimientos para la determinación de los efectos causados por los vientos TS aún están en desarrollo y/o requieren una evaluación experimental. De hecho, en la mayoría de los códigos de viento modernos se especifican procedimientos apropiados para determinar la respuesta de estructuras sometidas a vientos sinópticos, para lo cual la excitación dinámica inducida por la acción del viento se basa en la suposición, introducida por **Davenport (1957)** y **Vickery y Watkins (1962)**, de que este último puede definirse como un proceso aleatorio estacionario. Por lo tanto, los vientos extremos debidos a eventos sinópticos se predicen típicamente en base a series de velocidades máximas anuales. Estos pueden consistir en series suficientemente largas de velocidades de ráfagas, medias de 10 minutos o medias horarias, lo que debería conducir a predicciones similares. Por otra parte, para predecir la probabilidad de ocurrencia de las velocidades del viento TS, se requieren series de velocidades máximas anuales de ráfagas que, como se ha comentado anteriormente, no pueden modelarse correctamente mediante una única distribución de valores extremos de Tipo I y, además, no puede suponerse que la carga de viento dependiente del tiempo en el diseño estructural sea un proceso aleatorio estacionario. Una discusión del problema desde un punto de vista conjunto de ingeniería y meteorología fue presentada recientemente por **Loredo-Souza et al (2022)**.

Como se mencionó anteriormente, mientras que para los vientos sinópticos la especificación de una velocidad de diseño, generalmente la componente horizontal del vector de

velocidad media a la altura de referencia de 10 m en terreno llano y abierto, define completamente la intensidad de la excitación, la velocidad horizontal de diseño a la altura de referencia en caso de ráfagas descendentes, es decir, durante eventos TS, requiere información

adicional para permitir evaluar la evolución de la velocidad del viento con la altura sobre el nivel del suelo. Esta cuestión se abordará después de la breve discusión subsiguiente del campo de velocidad durante un evento de ráfaga descendente estacionaria.



**Figura 4.** Velocidades de vientos EPS, TS y combinados vs. Período de retorno para una estación meteorológica en Brasil constituidas por distribuciones Tipo I (Vallis et al. 2018; Vallis 2019)

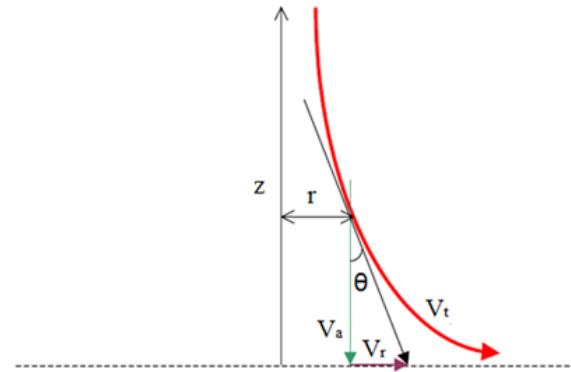
## Viento inducido por ráfagas descendentes estacionarias

**Gheno et al** (2015) ampliaron el modelo del campo de viento en una ráfaga descendente empleado anteriormente por **Ponte** (2005), **Ponte y Riera** (2007, 2010) y **Fadel Miguel y Riera** (2013) para determinar las cargas de viento convectivo en las líneas de transmisión (**Riera**, 2018). El modelo original se basa en una representación semi-empírica de un patrón de flujo axialmente simétrico que describe un campo estacionario, que está modelado por una función de tiempo empírica que da cuenta de la evolución de la velocidad del viento con el tiempo. **Gheno et al** (2015) introdujeron simplificaciones adicionales del campo de viento, asumiendo las condiciones atmosféricas habituales durante la ocurrencia de eventos TS y una geometría simplificada de la nube cumulonimbos causante. El campo de viento generado es axial-simétrico y depende de la caída de presión, la altura desde el nivel del suelo hasta el centro del yunque de la nube y la relación de la corriente descendente en la base, que aquí se consideran variables aleatorias. Se supone que la corriente descendente se produce en una gran superficie horizontal, bajo una atmósfera estable. Las variables meteorológicas de esta atmósfera estable se ven alteradas debido a las condiciones meteorológicas cambiantes, lo que da lugar a la formación de una nube *cumulonimbus*, caracterizada por los parámetros que se enumeran a continuación: (1) la base de la nube se encuentra a una altura  $h$  sobre el suelo, estimada como  $h = 0,1 H_c$ ; (2)  $H_c$  es la altura desde el suelo hasta el centro del yunque; (3) la base de la nube es circular, de radio  $R_o$ ; (4) Hay una caída de presión en relación con la atmósfera estable, que varía linealmente a lo largo de  $H_c$  y que provoca un flujo de aire descendente. Las líneas de corriente dentro de la ráfaga descendente tienen una forma aproximada por la ecuación (3), en la que  $k$  y  $\alpha$  son constantes, mientras que  $r$  denota la distancia al eje vertical de la ráfaga descendente.

$$z(r) = k / r^\alpha \quad (3)$$

Se espera que el coeficiente  $\alpha$  sea cercano a la unidad. La velocidad tangencial de cada línea de corriente puede descomponerse como se muestra en la Figura 5. Una línea de corriente específica, que pase a través del punto  $(r_n, z_n)$  estaría

definida por la ecuación (4). La Ec. (5) presenta la derivada  $z'(r)$  de  $z$  con respecto a  $r$ , que entra en las ecuaciones (6) y (7), permitiendo la descomposición de la velocidad tangencial  $V_t$  en sus componentes radial y axial,  $V_r$  and  $V_a$ , respectivamente.



**Figura 5.** Representación de una línea de corriente genérica

$$z(r) = \frac{z_h \cdot r_h^{1,2}}{r^{1,2}} \quad (4)$$

$$z'(r) = -\frac{1,2 \cdot r_h^{1,2} \cdot z_h}{r^{2,2}} \quad (5)$$

$$\sin(\theta) = \frac{1}{\sqrt{1 + (z'(r))^2}} \quad (6)$$

$$\cos(\theta) = \frac{(z'(r))^2}{\sqrt{1 + (z'(r))^2}} \quad (7)$$

$$V_r = V_t \cdot \sin(\theta) \quad (8)$$

$$V_a = V_t \cdot \cos(\theta) \quad (9)$$

Las componentes cartesianas de velocidad,  $V_x$  (10),  $V_y$  (11) y  $V_z$  (12), representadas en la Figura 6, son:

$$V_x = V_t \cdot \sin(\theta) \cdot \cos(\beta) = V_r \cdot \cos(\beta) \quad (10)$$

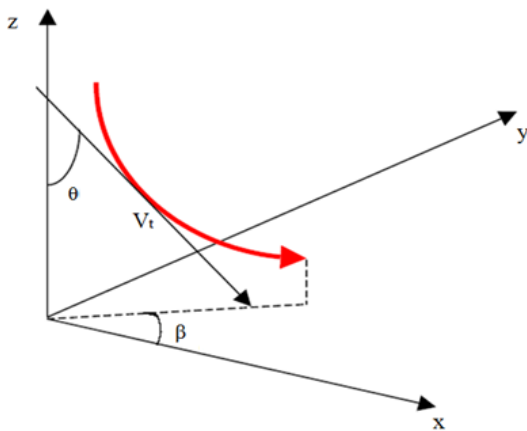
$$V_y = V_t \cdot \sin(\theta) \cdot \sin(\beta) = V_r \cdot \sin(\beta) \quad (11)$$

$$V_z = V_t \cdot \cos(\theta) = V_a \quad (12)$$

Considere un plano  $x = a$ , donde  $a$  denota una distancia de al menos un 50% mayor que el radio de la corriente descendente.

Admitiendo que la ecuación (3) con  $\alpha = 1$  describe la forma de una línea de corriente en el límite de la corriente descendente, el campo de viento causado por esta última estaría entonces limitado por la ecuación:

$$z = k (a^2 + y^2)^{-1/2} \quad (13)$$



**Figura 6.** Ángulos y ejes coordenados

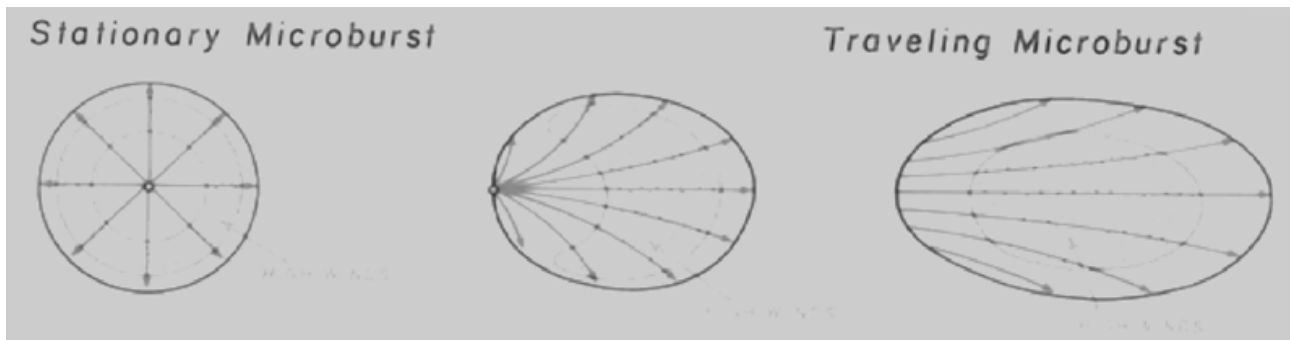
Obsérvese también que la velocidad del viento en la dirección  $x$ , dada por la ecuación (10), es máxima para  $y = 0$ , y que disminuye a medida que aumenta la distancia  $y$  al eje  $x$ . Cuando la nube *cumulonimbus* causante es transportada por una tormenta sinóptica que causa una velocidad media del viento orientada en la dirección  $x$ , a la altura de referencia, superior a unos 10 m/s, se produce un campo de viento compuesto, que se asemeja al campo de un gran túnel de viento con su eje coincidente con el eje  $x$ .

### Efectos del viento causado por ráfagas descendentes

Para los vientos sinópticos, la ráfaga de 3 segundos, la media de 10 minutos o la media horaria, que pueden convertirse fácilmente de una escala a otra, puede adoptarse como velocidad de diseño. Sin embargo, la situación no es la misma

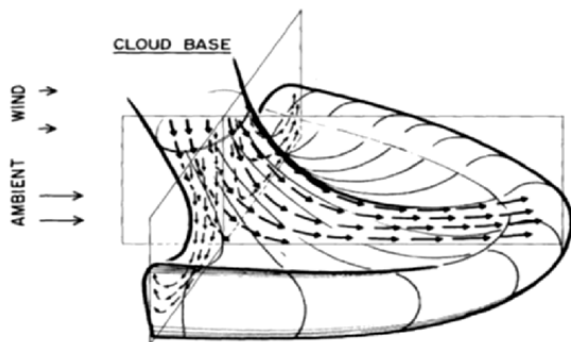
en el caso del viento inducido por corrientes descendentes, en el que el campo de velocidad del viento sólo puede describirse como un proceso tridimensional no estacionario. Cuando la nube cumulonimbus causante es transportada por un viento sinóptico, antes de la llegada de la ráfaga descendente al nivel del suelo, la gráfica de velocidad horizontal del viento frente al tiempo aún se puede modelar como un proceso aleatorio estacionario. La orientación media de la componente de velocidad horizontal a la altura estándar de 10 m permanece constante dentro de un área grande. Luego, cuando la corriente descendente impacta contra el suelo, produce un flujo predominantemente radial que se expande alejándose del eje vertical de la corriente descendente. La orientación media del viento en cualquier lugar, que resulta de la combinación de los componentes sinóptico y de ráfaga descendente, puede experimentar un cambio repentino, que obviamente aumenta con la distancia desde el plano que contiene el eje vertical de ráfaga descendente hasta el punto de observación (es decir, hasta la ubicación de la estación meteorológica). En este contexto, Burlando (2019) recuerda que los conceptos de ráfagas descendentes espacialmente estacionarias o móviles fueron introducidos por Byers y Braham (1949), quienes explican que, cuando una tormenta se mueve lentamente, el flujo de salida de la corriente descendente es aproximadamente radial, mientras que en las tormentas de movimiento rápido el flujo de salida no es simétrico y el flujo aguas abajo es sustancialmente mayor que en el lado aguas arriba. De manera similar, Fujita (1985) distinguió más tarde entre el flujo tipo “estallido estelar” axial simétrico con un anillo anular de fuertes vientos producidos por microrráfagas estacionarias que ocurre en ausencia de flujo ambiental y la forma elíptica del flujo con velocidades de viento más altas en la parte frontal cuando la microrráfaga está viajando. La Figura 7, extraída de Fujita (1985), muestra las vistas en planta de las líneas de flujo cerca de la superficie del suelo.

Byers y Braham (1949) ya se refirieron a una corriente descendente que se desplaza cuando la nube de tormenta asociada se mueve con respecto al suelo, de modo que la ráfaga descendente en sí misma determina un flujo de impulso horizontal descendente desde lo alto hacia la capa límite atmosférica. La inclinación del eje de



**Figura 7.** Vistas de planta de las líneas de flujo de viento cerca de la superficie del suelo según Fujita (1985): (izquierda) ráfaga descendente estacionaria, (centro) ráfaga descendente moviéndose lentamente, (derecha) ráfaga descendente móvil

la corriente descendente está relacionada con el movimiento de la tormenta, pero las corrientes descendentes no verticales pueden deberse a diferentes causas. Por ejemplo, Hjelmfelt (1988), analizando las ráfagas descendentes registradas durante el Proyecto JAWS en Colorado, relacionó la inclinación del eje de la corriente descendente con la cizalladura vertical del viento por debajo de la base de la nube en lugar de con el movimiento de la tormenta. La Figura 8 reproducida de Hjelmfelt (1988) y Burlando (2019), muestra una vista esquemática en 3D de las líneas de flujo en una ráfaga descendente móvil.



**Figura 8.** Representación 3D de una microrráfaga que muestra que la inclinación del eje descendente está relacionada con el viento ambiental debajo de la base de la nube asociada (Hjelmfelt, 1988).

De hecho, Burlando (2019) señala que pocos modelos de flujo de ráfagas descendentes incluyen el efecto del movimiento de la tormenta, citando como excepción el modelo propuesto por

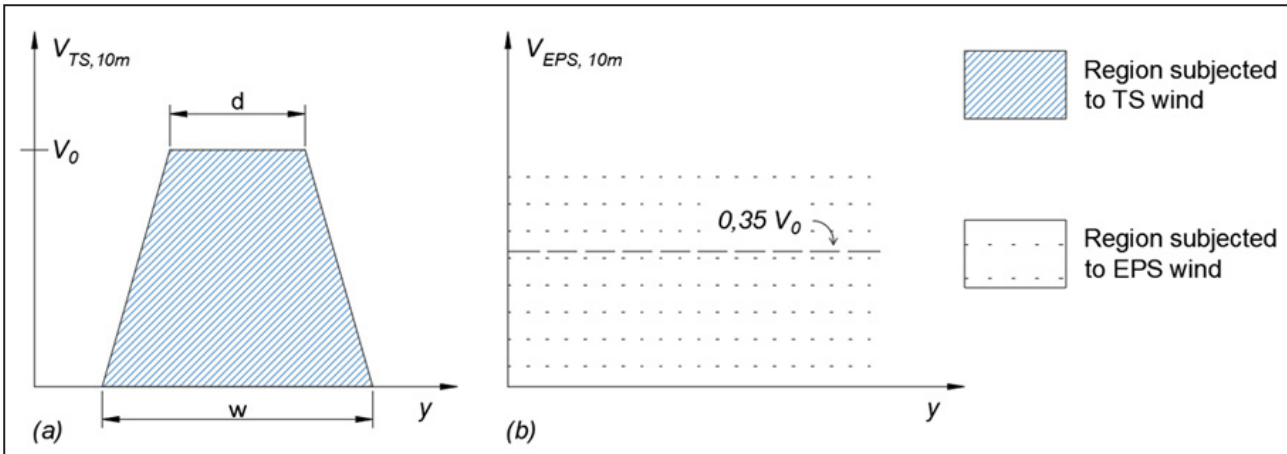
Holmes y Oliver (2000), pero ninguno de ellos considera la posibilidad de que el campo de flujo medido real,  $V$ , pueda ser la superposición de tres contribuciones: el flujo axial-simétrico de ráfaga descendente,  $V_1$ , el movimiento de la tormenta,  $V_2$  y el campo de flujo de la capa límite atmosférica,  $V_3$ .

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (14)$$

En este contexto, parece obvio que los componentes de la velocidad del viento observados en las estaciones meteorológicas a la altura estándar de 10 m, son en realidad la superposición de tres contribuciones: el flujo de salida de ráfaga descendente (aproximadamente) axial-simétrico,  $V_1$ , el movimiento de la tormenta,  $V_2$  y el campo de flujo de la capa límite atmosférica,  $V_3$ . Sin embargo, sólo se registra  $V$ , es decir, la participación relativa de cada componente sigue siendo desconocida y sólo podría estimarse sobre la base de datos estadísticos aún inexistentes. Iida et al. (2021) informan cargas de viento en edificios prismáticos, para la excitación causada por la traslación de ráfagas descendentes, determinadas experimentalmente en un simulador de chorros de aire móvil de laboratorio. Riera (2016) había argumentado previamente que sólo los vientos causados por ráfagas descendentes dentro de los campos de viento sinópticos en las llamadas líneas de inestabilidad (squall line) requieren consideración en el diseño estructural, sugiriendo para tal propósito un modelo simplificado para la determinación de las cargas de viento, también descrito por Miguel et al. (2018). La propuesta equivale a aceptar que la velocidad del viento TS de diseño

**Tabla 1:** Parámetros básicos de las cinco categorías de ráfagas descendentes (DB) (Riera, 2016; Miguel et al, 2018).

Designación (DB)	$V_0$ (m/s)	d (m)	w (m)	b (m)	T (s)
DB 1	$V_0 \leq 30$	10	40	20	60
DB 2	$30 < V_0 \leq 40$	20	60	40	120
DB 3	$40 < V_0 \leq 50$	40	100	80	180
DB 4	$50 < V_0 \leq 60$	60	160	120	300
DB 5	$60 > V_0$	80	240	160	480



**Figura 9.** Dimensiones de la sección transversal del canal de viento virtual en una línea de inestabilidad (Riera, 2016; Miguel et al, 2018).

(componente horizontal a 10 m de altura) ocurre cerca del eje horizontal de la Figura 7 (derecha), lo que implica que las componentes  $V_1$ ,  $V_2$  y  $V_3$  en la ecuación (14) están orientadas en la misma dirección. Cuando no se cumple esta suposición, la respuesta estructural máxima, en la dirección de la velocidad instantánea máxima, será necesariamente menor y, por lo tanto, no es necesario considerarla a los efectos del diseño estructural. El perfil vertical de velocidad para la componente no sinóptica adoptada en los trabajos mencionados anteriormente fue modificado por **Riera** (2018) sobre la base de argumentos holísticos (**Gheno et al, 2015**). El procedimiento propuesto requiere la especificación de la *velocidad máxima de la ráfaga en eventos de corrientes descendente*, información que debiera incluirse en las revisiones en curso de varios códigos de viento.

### Carga estructural inducida por líneas de inestabilidad

**Riera** (2016) observa que los efectos de la corriente descendente, a los fines del diseño estructural, alcanzarán la máxima intensidad dentro

de la región descrita anteriormente, en la que la velocidad inducida no difiere significativamente de  $V_x$ , como se describe en la ecuación (10) con  $\theta = \pi/2$  y  $\beta = 0$ . Además, los coeficientes aerodinámicos especificados en los códigos de viento o determinados experimentalmente en túneles de viento convencionales, suponiendo una tormenta a escala sinóptica, seguirían siendo aplicables, siempre que las dimensiones de la sección transversal de la estructura considerada sean compatibles con las dimensiones del túnel de viento virtual que se produce a lo largo del eje de la línea de inestabilidad. La traza de la línea de inestabilidad sobre el suelo es similar a la trayectoria de un tornado. **Schwarzkopf y Russo** (1982) mapearon tales trayectorias en Argentina, mostrando que, en caso de vientos rectos, las líneas de flujo en los límites de la trayectoria están orientadas en la misma dirección, mientras que en caso de tornados están orientadas en direcciones opuestas. Por lo tanto, el supuesto básico en el modelo propuesto (**Riera, 2016**) es que se pueden sumar los campos de viento inducidos tanto por la corriente descendente como por el evento



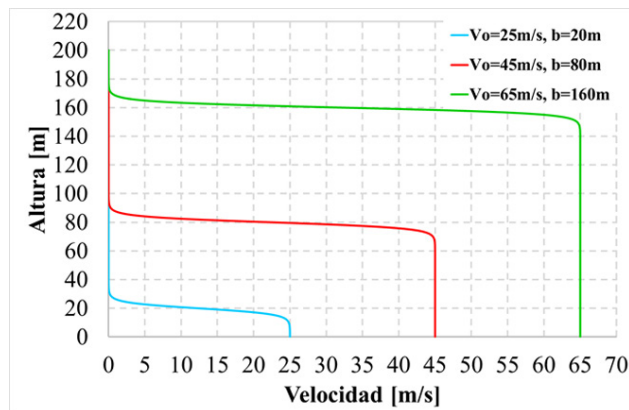
sinóptico que transporta la tormenta TS, despreciando cualquier interacción. El error del modelo resultante de la última simplificación no debería tener importancia en las aplicaciones de ingeniería y, en la mayoría de los casos, debería sobrestimar la carga real del viento.

Se sugieren las siguientes expresiones para la componente horizontal de la velocidad causada por una ráfaga descendente a distancias superiores a  $D$  desde la línea central de la misma (Riera, 2018):

$$V = V_0 f(z) \quad (15)$$

$$f(z) = \exp[-(z - b) / 2] / \{1 + \exp[-(z - b) / 2]\} \quad (16)$$

Las ecuaciones (15) y (16),  $f(z)$  representan la función logística. En la Tabla 1 se sugieren valores de  $b$  para diferentes categorías de eventos TS, como se muestra en la Figura 9, con  $D \approx 2b$ . La capa límite adyacente al terreno no supera unos pocos metros y, por lo tanto, se desprecia, es decir,  $\eta = 0$ .



**Figura 10.** Perfiles de velocidad horizontales / verticales inducidos por ráfagas descendentes.

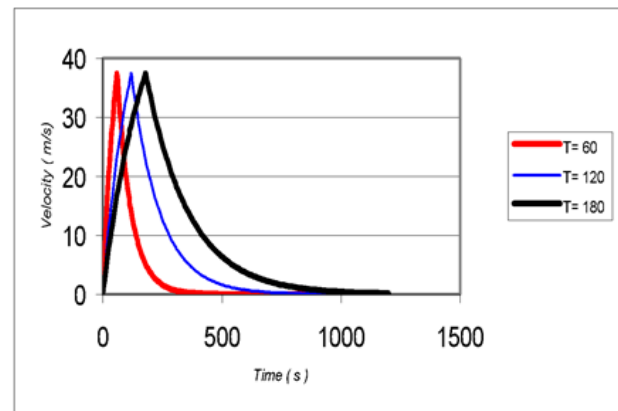
Además, se encontró que la expresión propuesta por **Holmes y Oliver** (2000) para describir la evolución con el tiempo de la componente de velocidad TS modela satisfactoriamente la mayoría de

las observaciones experimentales y fue adoptada aquí:

$$V(t) = 1,58 V_t [1 - \exp(-t/T)] \quad t \leq T \quad (17)$$

$$V(t) = V_t \exp[-(t-T) / T] \quad t > T \quad (18)$$

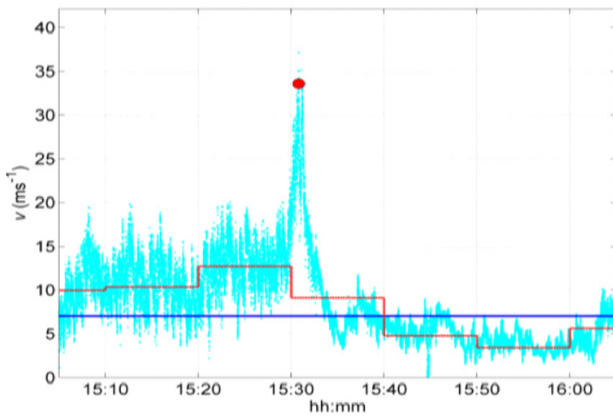
donde  $T$  representa el tiempo característico, factor que depende de la categoría de la ráfaga descendente (Tabla 1).



**Figura 11.** Evolución en el tiempo de la contribución de la corriente descendente para  $V_t = 37.5$  m/s y tres valores diferentes del tiempo característico  $T$

Tenga en cuenta que la orientación  $x$  coincide con la orientación de la velocidad media del viento a la altura estándar de 10 m. Cuando el centro de la línea de inestabilidad pasa por la ubicación de una estación meteorológica, no se observará ningún cambio en la orientación del viento registrada hasta que el eje de la ráfaga descendente esté exactamente por encima del instrumento de registro, cuando la componente horizontal del viento inducido por la ráfaga descendente sea cero. A continuación, la orientación de la componente horizontal gira  $180^\circ$  y la contribución de la ráfaga descendente debe deducirse de la velocidad sinóptica del viento para obtener el módulo de la velocidad.

El proceso es claramente descrito por **Le y Caracoglia** (2017) con relación a la tormenta Andrews (Tormenta registrada en la Base de la



**Figura 12.** Componente horizontal de la velocidad de viento durante el evento TS en Puerto La Spezia, Italia, (25/11/2011) en el que el pico de ráfaga reportado por Solari (2015) fue  $V_o=35m/s$ .



**Figura 13.** Registros fotográficos de los daños causados en el sur de Brasil por una línea de inestabilidad que atravesó una carretera, como se muestra a la izquierda, arrastró un camión pesado aproximadamente 150 m, como se muestra a la derecha, y volcó a muchos otros (Junio de 2018, RS, Brasil)

Fuerza Aérea de St. Andrews). La mayor carga de viento en las estructuras dentro de la trayectoria de la tormenta ocurre antes de que la componente horizontal de la ráfaga descendente disminuya notablemente, por lo tanto, la sección posterior al pico del registro suele ser de menor relevancia para el diseño ingenieril. Un ejemplo típico se muestra en el registro de la Figura 12, en el que la velocidad de la ráfaga para el evento de corriente descendente fue  $V_o = 35 m/s$  (Solari, 2015). Se puede observar que la contribución de la corriente descendente es transportada por un viento sinóptico con una velocidad media a la altura de referencia de 10 m estimada de cerca por la relación propuesta de  $0,35 V_o$ . Las propiedades de turbulencia, así como los perfiles verticales de la contribución sinóptica del viento, dependen de la rugosidad del terreno aguas arriba. Tanto la excitación sinóptica del viento como la respuesta estructural resultante pueden modelarse como procesos aleatorios estacionarios. La contribución de la ráfaga descendente, por otro lado, se modela como la carga transitoria resultante de la función velocidad vs. tiempo dada por las ecuaciones (17) y (18) y se muestran en la Figura 11 y, además, en los perfiles verticales ilustrados en la Figura 10. Si bien un solo perfil caracteriza la contribución sinóptica del viento, se sugiere aplicar un perfil vertical diferente para cada categoría de ráfaga descendente. Por último, obsérvese que, a efectos del diseño, la velocidad máxima de la ráfaga  $V_o$  se define en las Figuras 1 y 2 por las líneas rectas de la derecha o por la línea roja trazada en la Figura 3, que corresponden a eventos TS. Estos describen las amplitudes en la región de baja probabilidad, es decir, largos períodos de recurrencia. Lógicamente, se puede esperar que el error del modelo propuesto disminuya a medida que aumenta el período de recurrencia del diseño.

### Más evidencias de vientos extremos en líneas de inestabilidad

Finalmente, hay que tener en cuenta que, aunque son relativamente poco comunes, los vientos rectos conocidos como *derechos* por su designación inicial en México, también se producen fuera de América del Norte. En Europa, según *Wikipedia*, un evento de este tipo ocurrió el 10 de

julio de 2002 en el este de Alemania y partes limítrofes de países vecinos, y también se han descrito casos similares en Finlandia, España, Francia y Bulgaria. El caso de Finlandia fue el primero que se documentó por encima de los 60 grados de latitud. Un factor que limita la ocurrencia de vientos rectos en Europa y otras partes más frías del mundo puede ser la naturaleza poco frecuente de las capas mixtas elevadas (EML). Aunque los fenómenos meteorológicos y los campos de viento resultantes difieren en cierta medida de los eventos TS, aparentemente el modelo propuesto en este documento podría aceptarse como una aproximación ingenieril hasta que se disponga de evidencia adicional. En un evento reciente de línea de inestabilidad en el sur de Brasil, un viento recto que dejó una trayectoria de unos 250 m de ancho, causó daños, como se ilustra en la Figura 13, compatibles con una velocidad del viento de referencia en el centro de la traza superior a 60 m/s. La traza tenía varios kilómetros de longitud, pero las estaciones meteorológicas situadas en la región fuera de la traza registraron velocidades máximas del viento inferiores a 15 m/s. En cuanto a las velocidades del viento para el diseño de estructuras críticas, está claro que las velocidades de diseño superiores a unos 50 m/s, que no son eventos extremadamente raros, también deben asociarse al impacto de proyectiles, incluidos los vehículos aerotransportados (Holmes, 2010).

## Conclusiones

Se discute brevemente la relevancia de los diferentes fenómenos meteorológicos que provocan vientos extremos en la atmósfera inferior, así como las propuestas para evaluar las cargas resultantes a los efectos del diseño estructural, enfatizando la necesidad de evaluar, para fines de diseño, la

probabilidad de ocurrencia de velocidades máximas de ráfagas de viento debido a corrientes descendentes dentro de las líneas de inestabilidad o eventos no sinópticos similares.

Se demostró que la componente horizontal de la velocidad de vientos causados por nubes estacionarias o de movimiento lento, a la altura de referencia de 10 m sobre el nivel del terreno, muy rara vez supera los 30 m/s, su efecto sobre el diseño estructural en cualquier dirección horizontal es menor que los efectos inducidos por los vientos sinópticos. Por lo tanto, no requiere un tratamiento específico en los códigos de viento que aborden adecuadamente la ocurrencia y los efectos de las tormentas meteorológicas sinópticas, como es el caso de la mayoría de los códigos de viento modernos, incluido el código brasileño NBR 6123. Sin embargo, no es admisible en la segunda década del siglo XXI desprestigiar la posibilidad de que ocurra simultáneamente una ráfaga descendente y un evento sinóptico, que puede dar lugar a componentes horizontales de la velocidad del viento a 10 m de altura sobre el nivel del suelo, superiores a 60 o incluso 70 m/s.

Finalmente, se describe un esquema que no requiere una extensa investigación teórica o experimental adicional para ser aplicable a estructuras sometidas a vientos descendentes dentro de las líneas de inestabilidad. El enfoque propuesto permitiría adoptar, para los eventos no sinópticos descritos, coeficientes aerodinámicos ampliamente disponibles determinados para los vientos sinópticos.

## Agradecimientos

El autor agradece el apoyo del Consejo Nacional de Investigación de Brasil (CNPq).

## Referencias

ASCE 7, 2016: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures.

AS/NZS 1170.2:2011, 2011: Structural design actions. Part 2: Wind actions.

BURLANDO M. 2019: "Downburst flow reconstruction by wind profile measurement", 5th International Conference on Wind Engineering Beijing, China; September 1-6, 2019

**BYERS H.R. and BRAHAM, H.R.**, 1949: "The Thunderstorm", US Department of Commerce, Washington DC, 1949, 287 pp.

**DAVENPORT A.G.** 1957. International Research Seminar: "Wind Effects on Buildings and Structures". Proceedings, Volume 1, Canada.

**FADEL MIGUEL L. F. and RIERA J. D.**, 2013: "Loads induced on tall structures by thunderstorm winds in temperate latitudes". 11<sup>th</sup> International Conference on Structural Safety and Reliability – ICOSSAR, 2013, New York, United States.

**FUJITA T.T.**, 1985: "The Downburst", SMRP Research Paper Number 210, University of Chicago, Chicago, 1985, 122 pp.

**GHENO R.M., MENEZES R. C. R., RIERA J.D. and FADEL MIGUEL L. F.**, 2015: "Loads Induced on Cables by Convective Winds in Temperate Latitudes", 14<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering, June 2015, Porto Alegre, RS, Brazil.

**HJELMFELT M.R.**, 1988: "Structure and Life Cycle of Microburst Outflows Observed in Colorado", J. Appl. Meteor., 27, 900-927.

**HOLMES J. D. and OLIVER, S. E.**, 2000: "An empirical model of a downburst", Engineering Structures, Elsevier, 22, 1167-72.

**HOLMES J. D.**, 2010: "Windborne debris and damage risk models: a review", Wind and Structures, Vol. 22, N°2, pp. 95-108.

**IIDA Y., ASANO K. and UEMATSU, Y.**, 2021, "Experimental study of downburst-induced wind loading on buildings with different sizes and heights", J. of Wind Engineering (JAWE), Vol. 46, N° 1 (N° 166), pp. 12-28, January 2021.

**LE T-H and CARACOGLIA L.**, 2017: "Computer based model for the transient dynamic analysis of a tall building during a digitally simulated Andrews AFB thunderstorm", Computer and Structures, 193, 44-72

**LETCHFORD C. W., and LOMBARDO F. T.**, 2015: "Is codification of non-synoptic wind loads possible?", Invited Lecture, 14<sup>th</sup> International Conference on Wind Engineering, June 2015, Porto Alegre, RS, Brazil.

**LOREDO-SOUZA A.M.; PFEIL M.; NASCIMENTO E.L.; RIERA J.D.; FISCH G.F. and BECK A.T.**; 2022: "Towards a climatological approach in the proposal for the wind speed map in the new Brazilian wind code", 14<sup>th</sup> American Conference on Wind Engineering (ACWE), Lubbock, TX, May 17-19, 2022.

**MIGUEL L.F.F.; RIERA J.D. and FADEL MIGUEL, L.F.**, 2018: "Assessment of downburst wind loading on tall structures", J. Wind Eng. Ind. Aerodynamics, (174) 252-259.

**PONTE Jr., J.**, 2005: "Modelagem e simulação do campo de velocidades do vento em tormentas elétricas". Doctoral Thesis, PROMEC, UFRGS, Porto Alegre, RS, Brazil.

**PONTE Jr. J. and RIERA J. D.**, 2007: "Wind velocity field during thunderstorms", Wind and Structures, An International Journal, Vol. 10, No. 3, 287-300.

**PONTE, Jr., J., and RIERA, J. D.**, 2010: "Simulation of extreme wind series caused by thunderstorms in temperate latitudes". Structural Safety, 32, 231-237.

**RIERA J. D. and NANNI L.F.**, 1989: "Pilot study of extreme wind velocities in a mixed climate considering wind orientation". Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Elsevier, The Netherlands, 32, 11-20.

**RIERA, J.D., VIERA F.B. and dos SANTOS M.L.W.**, 1989: "Probabilistic assessment of wind loading for structural analysis", Proceedings, 5th International Conference on Structural Safety & Reliability, ICOSSAR'89, Innsbruck, Austria, Balkema, Rotterdam.

**RIERA, J. D.**, 2016: "Sobre a definição do vento para projeto estrutural na NBR 6123 e outras normas sul-americanas". Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural, (ASAE), Passo Fundo, RS, Brasil, v. 13, n. 3, p. 1-27, set/dez. 2016. <http://dx.doi.org/10535/rsee.v13i3/6532>.

**RIERA J. D.**, 2018: "Sobre el perfil vertical de las velocidades inducidas por corrientes descendentes", Anales, XXXVIII Jornadas Sud Americanas de Ingeniería Estructural, Lima, Perú, Oct. 2018.

**SCHWARZKOPF M. L. A. and RUSSO, L. C.**, 1982: "Severe storms and tornadoes in Argentina", Preprints, 12th Conf. on Severe Local Storms, San Antonio, TX, American Meteor. Soc., 59-62.

**SOLARI G., DE GAETANO P. and REPETTO M. P.**, 2015: "Thunderstorm response spectrum: fundamentals and case study", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 143, 62-77.

**VALLIS M. B.; LOREDO-SOUZA A. M.; WATRIN L. C.; BENIA, M. C. D.**, 2018: "Extreme winds east of the Andes", Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, Lima, Peru.

**VALLIS M.B.**, 2019: "Brazilian extreme wind climate", PhD Thesis, Departamento de Engenharia Civil, Eng. School, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil.

**VICKERY B.J. and WATKINS R.D.**, 1964. "Flow-induced Vibrations of Cylindrical Structures". University of Sydney. School of Civil Engineering. Research report no. R.34.

## AUTOR

**RIERA, Jorge D.** ID  ORCID 0000-0002-4902-237X



REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERÍA  
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología