

Revisión del Estado del Arte de la Metodología para el estudio del efecto del viento en estructuras

Wind effects on structures study methodology review

José M^a Terrés-Nícoli^a, G. Kopp^b

^a Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Principal Oritia & Boreas, Prof. Universidad de Granada.

terresnicoli@oritayboreas.com

^b Dr. Ingeniero Mecánico, Western University, Full Professor. gkopp@uwo.ca

RESUMEN

Los avances en materiales y metodologías de diseño permiten crear estructuras optimizadas más ligeras y flexibles. Estructuras que precisan del estudio específico del efecto del viento dado su comportamiento dinámico. Igualmente proliferan volumetrías y geometrías no convencionales. En estos estudios, se usan metodologías de modelización física y numérica de diversa tecnología y escala buscando aproximar la realidad de la capa límite y turbulencia atmosférica y sus efectos en el medio construido. El artículo revisa el estado actual de estas metodologías y las modificaciones en normas como la ASCE 7-22, 49-21 y el Eurocódigo 1-4 en el marco del trabajo que el Grupo de trabajo 9 de la Comisión 1 de ACHE.

ABSTRACT

Advances in design materials and methodologies often result in optimized lighter and more flexible structures. Structures that require the specific study of the wind effects given its dynamic behavior. Unconventional geometries are also proliferating. In these studies, physical and numerical modeling methodologies of diverse technology and scale are used, seeking to approximate the nature of the boundary layer and atmospheric turbulence and their effects on the built environment. The article reviews the current state of these methodologies and the modifications in standards such as ASCE 7-22, 49-21 and Eurocode 1-4 within the framework of the work of Working Group 9 of ACHE Commission 1.

PALABRAS CLAVE: aerodinámica de puentes, vibración inducida por vórtices, mitigación.

KEYWORDS: bridge aerodynamics, vortex-induced vibration, mitigation.

1. Introducción

Los avances en materiales de alto rendimiento junto con metodologías de diseño optimizadas, han posibilitado la creación de estructuras más esbeltas y arquitecturas innovadoras que requieren un estudio detallado de la acción del viento. Esta necesidad surge debido a la mayor flexibilidad estructural, lo que incrementa la contribución de las componentes dinámicas de

fondo y resonantes en la respuesta de las edificaciones y puentes ante cargas de viento. Adicionalmente, estos materiales permiten el diseño de geometrías no convencionales, que se alejan de las formas reflejadas en normativas tradicionales, haciendo imprescindible una evaluación aerodinámica avanzada para garantizar su estabilidad aerodinámica y

desempeño estructural frente a la acción del viento.

Adicionalmente, hay evidencias claras de una mayor valoración del medio construido acompañada de una mayor incidencia de eventos extremos de catastrofe natural. Específicamente se observan tendencias exponenciales en daño relativo a tormentas convectivas severas posiblemente relacionadas con patrones de cambio climático que ponen en relevancia la acción del viento en el medio construido.

Para llevar a cabo estos estudios, se dispone de diversas metodologías de modelización física y numérica. Las técnicas experimentales incluyen ensayos en túneles de viento con modelos de presión, balanza aerodinámica, configuraciones estáticas y aeroelásticas, ya sean de sección o de modelo integral. Estos se prueban en flujos atmosféricos de capa límite o uniformes, dependiendo de la escala y del fenómeno a analizar. Más allá de los convencionales túneles de viento de capa límite se han desarrollado en los últimos años simuladores físicos y herramientas que permiten el estudio de los efectos de vientos tridimensionales de naturaleza convectiva o el detalle de los efectos a escala real. Por otro lado, las simulaciones numéricas han evolucionado significativamente mediante modelos CFD (Computational Fluid Dynamics), como los métodos de volúmenes finitos para RANS o LES, y enfoques sin malla como Lattice-Boltzmann, que permiten estudiar la interacción fluido-estructura con mayor precisión. Asimismo, se han desarrollado modelos numéricos de turbulencia capaces de capturar efectos no estacionarios y fluctuaciones de presión con mayor fiabilidad.

El desafío para arquitectos e ingenieros radica en la selección de la metodología más adecuada para cada caso específico. Este artículo ofrece una revisión del estado de la metodología y fronteras en algunas técnicas de evaluación de cargas de viento, considerando referencias en normativas y guías internacionales. En

particular, se analizarán las actualizaciones en ASCE 7-22 y ASCE 49-21, que han incorporado criterios más detallados para la estimación de efectos aerodinámicos y estructurales en edificaciones, así como las modificaciones previstas en la próxima edición del Eurocódigo 1-4, con el objetivo de armonizar los criterios de diseño en el contexto europeo. Este artículo se enmarca en los trabajos del Grupo 9, Viento, de la Comisión 1 de ACHE.

2. Perspectivas y retos en ingeniería del viento

La ingeniería del viento es un campo multidisciplinario ubicado en la confluencia de áreas del conocimiento relativas a la teoría de la probabilidad y el riesgo, la mecánica de fluidos y la dinámica de estructuras [1]. Ha experimentado avances significativos en las últimas décadas. La combinación de enfoques computacionales con experimentos a gran escala ha permitido mejorar los diseños resistentes al viento para edificios, puentes y estructuras en alta mar. Especial atención metodológica han requerido el estudio de estructuras de menor envergadura como las de plantas fotovoltaicas [2] o de fachadas complejas. Las instalaciones experimentales, como túneles de viento avanzados y redes de sensores en tiempo real, han fortalecido nuestra comprensión de los efectos del viento.

Las capacidades computacionales actuales están afectando a la ingeniería del viento mediante el uso de dinámica de fluidos computacional (CFD), simulaciones estocásticas y técnicas de aprendizaje automático. Modelos CFD como Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS), Large Eddy Simulation (LES) y Direct Numerical Simulation (DNS) han mejorado la capacidad de simular las complejas interacciones entre el viento y las estructuras. Modelos híbridos como Detached Eddy Simulation (DES) combinan LES y RANS para optimizar tiempos de computación. Un reto importante en

CFD es la cuantificación de la incertidumbre en las cargas de viento debido a la variabilidad en la turbulencia y las suposiciones del modelo. Es por esto que las normas tales como ASCE 7-22, ASCE 49-21 [3, 4] o la próxima Eurocódigo [5],

Figura 1 y otras [6] no permiten la aplicación de metodologías exclusivamente numéricas de forma independiente sin emplear las metodologías basadas en el ensayo en túnel de viento de capa límite.

Table K.1 — Fields of applicability of WTT and CWE (A: advised, N: not advised)

Class of problem	WTT		CWE	
	Prelim. stage	Detailed Design	Prelim. stage	Detailed Design
Topographic effects	A	A	A	A
Local pressures	A	A	A	N
Overall forces	A	A	A	N
Gust buffeting response	A	A	A	N
Vortex shedding response	A	A	A	N
Galloping	A	A	A	N
Flutter	A	A	A	N
Key A: advised N: not advised				

Figura 1. Provisión del nuevo prEN 1191-1-4:2024-03 Eurocódigo 1-4 en relación al uso y aplicabilidad de metodologías físicas (ensayo en túnel de viento de capa límite) y numéricas (CFD).

Con relación a la limitación de la incertidumbre de los modelos numéricos, se están explorando modelos sustitutos, que emplean técnicas como la regresión de procesos gaussiano y permiten aproximaciones más rápidas y precisas para el análisis aerodinámico. Además, el aprendizaje automático mejora la generación de turbulencia de entrada mediante el uso de grandes volúmenes de datos de ensayos existentes en diversas plataformas para mejorar la fidelidad de las simulaciones [7].

En esta misma línea, el aprendizaje automático se utiliza cada vez más para mejorar los modelos de ingeniería del viento. Las redes neuronales profundas, redes bayesianas y aprendizaje por refuerzo ayudan en la predicción del comportamiento del viento y sus efectos, la optimización de formas estructurales y la evaluación de daños post-desastre. Técnicas como Dynamic Mode Decomposition (DMD) han demostrado ser efectivas para analizar

fluctuaciones de presión inducidas por el viento en estructuras, permitiendo mejores predicciones.

Las simulaciones híbridas, que combinan modelos físicos y numéricos, han sido utilizadas exitosamente para estudiar efectos aeroelásticos en estructuras y componentes. Este es especialmente el caso en sistemas complejos de envolvente arquitectónica. Como se indicaba, los nuevos materiales y procedimientos constructivos posibilitan, por ejemplo, sistemas de parasoles ligeros muy interesantes desde el punto de vista arquitectónico. Estos sistemas resultan, no obstante, en una aerodinámica compleja que frecuentemente lleva a metodologías avanzadas multi-escala física y numérica para obtener cargas de diseño, asegurar la estabilidad aerodinámica y comfort acústico.

3. Perspectiva y proyección del riesgo

3.1 Evolución del reclamaciones y daño

Sólo en Canadá, para contextualizar, en los últimos 41 años, los pagos de las aseguradoras por daños por eventos meteorológicos extremos han experimentado un aumento drástico. En 2023, los pagos superaron los 8 mil millones de dólares, lo que equivale a 150 millones de dólares por semana, cuando hace cuatro décadas esa cifra correspondía al total anual. Esto representa un incremento cincuenta veces mayor en términos ajustados por inflación. Si bien esta tendencia se observa a nivel global, su impacto en algunos países es particularmente alarmante debido a la creciente exposición de la infraestructura y al aumento en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos. La Figura 2,

muestra una tendencia igualmente preocupante en EE.UU.

La realidad puede ser incluso más alarmante. Las cifras de las aseguradoras no reflejan la totalidad del daño económico, ya que existen pérdidas no cubiertas por seguros y, en menor grado, no reclamadas. En países como Canadá o EE.UU., se estima que el seguro solo cubre alrededor del 40% del total de los daños económicos, mientras que el 60% restante representa la “brecha de aseguramiento”. Esto incluye infraestructura pública sin cobertura, deducibles y exclusiones en pólizas de propietarios de viviendas y empresas. Ajustando estos datos, la pérdida económica total en 2023 superó los 20 mil millones de dólares, evidenciando la necesidad urgente de mejorar la resiliencia estructural y las estrategias de mitigación.

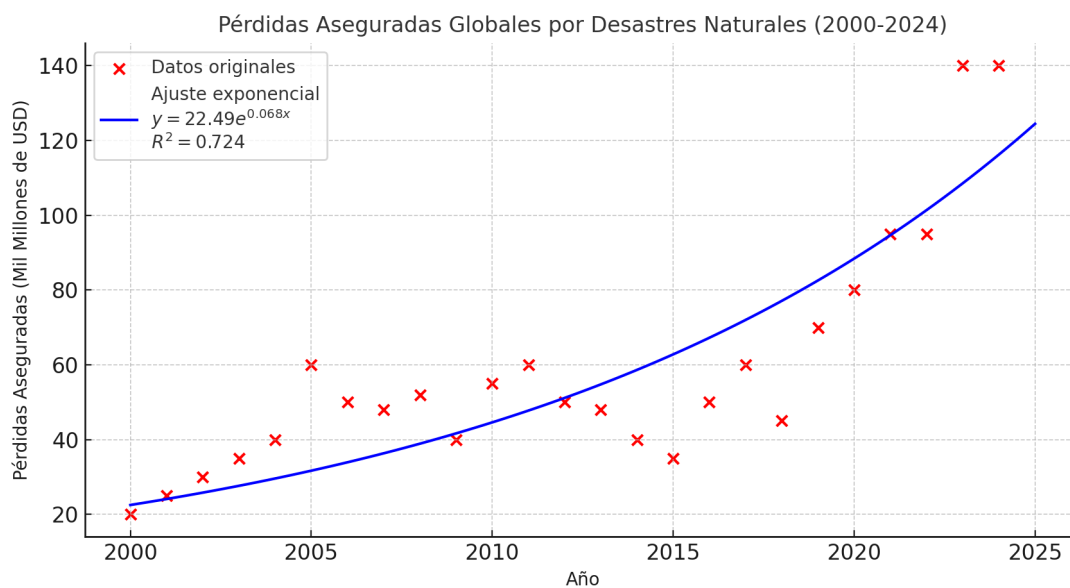


Figura 2. Proyección de pérdidas globales en miles de millones de dólares asegurados por desastres naturales hasta 2024. Se aprecia una proyección exponencial en los últimos años. Elaboración propia. Datos [8-12].

Es especialmente relevante la tendencia de los últimos años que pudiera obligar a cambios en el sistema que conlleven a subida de primas o declinación de pólizas. Véase por ejemplo el caso particular en Canadá [13] (Figura 3).

Con especial interés a los efectos del viento se observa el importante crecimiento de eventos relacionados a tormentas severas de

naturaleza convectiva (Figura 4). Esto pone de manifiesto la necesidad de estudio de los efectos del viento de esta naturaleza.

A pesar de la magnitud del problema, existen soluciones bien documentadas en la ingeniería del viento para reducir la vulnerabilidad de las edificaciones ante tormentas severas:

1. Diseño y construcción de cubiertas resistentes al viento: La implementación de cubiertas reforzadas con anclajes mecánicos, barreras de protección y membranas de alta resistencia puede reducir significativamente el desprendimiento de techos durante vientos extremos.

2. Uso de sistemas de fijación estructural avanzados: Incorporar conexiones reforzadas y anclajes estructurales en construcciones nuevas puede mejorar drásticamente la resistencia de las edificaciones. Sistemas de disipación y control avanzados que regulen la componente dinámica de la respuesta.

3. Materiales resilientes: Se ha demostrado que ciertos revestimientos de alto impacto y sistemas de protección contra vientos de alta intensidad pueden minimizar los daños en fachadas y ventanas expuestas a vientos de alta velocidad.

4. Adaptación de normas de construcción: Los estados deben implementar regulaciones más estrictas basadas en las últimas actualizaciones de ASCE 7-22, ASCE 49-21 y Eurocódigo 1-4, que incorporan avances recientes en modelado de cargas de viento y respuesta estructural.

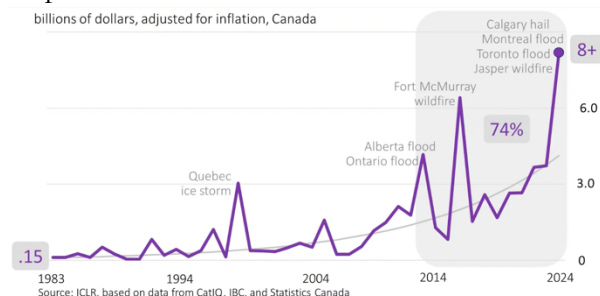


Figura 3. Reclamaciones por catástrofe natural en Canadá en los últimos años. En miles de millones corregidos por inflación [13].

Estas estrategias han sido probadas en diversos contextos y han demostrado su efectividad en la reducción de daños materiales y económicos. La clave está en la implementación de normativas más estrictas y la adopción de tecnologías innovadoras en el sector de la construcción.

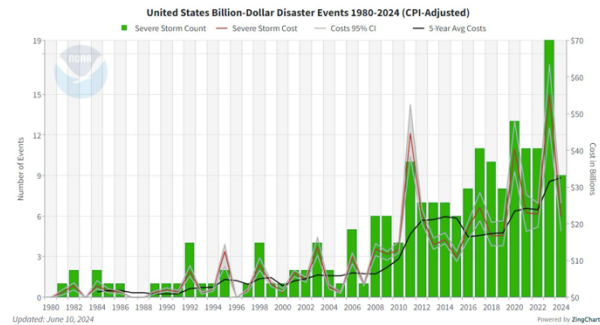


Figura 4. Evolución de de eventos severos de naturaleza convectiva en EE.UU. NOAA. [14]

3.2 Diseño basado en la teoría de la fiabilidad

La ingeniería del viento desde los trabajos pioneros del Prof. Davenport se enmarca en la teoría de la fiabilidad y el riesgo. No obstante, la regulación de este difiere según la naturaleza y tipo de la infraestructura. Así, en la distintas normas, las velocidades de viento de diseño prescritas dependen a través de los periodos de retorno según el grado de importancia o tipo de una edificación (residencial, hospitalario, militar, emergencias). Los estados con las debidas coberturas reaseguradas son capaces de preservar el estado de bienestar. En otros como el español concurre además el consorcio de compensación de seguros.

Este contexto difiere notablemente, por ejemplo, del de una planta de energía solar fotovoltaica de acceso restringido y carácter no crítico o estratégico en la red. No obstante, estas plantas se dimensionan normalmente conforme a la regulación descrita anterior propia de la edificación y seguridad del ciudadano estado de bienestar. Las velocidades de diseño deberán resultar de un estudio de probabilidad y modos de fallo y riesgo en plena consonancia con un plan de negocio. A falta de estudios específicos se podrán desarrollar guías sectoriales para diseño a viento de estas estructuras tal y como se han desarrollado en el sector del oil and gas.

4. Regulación normativa

Se presentan a continuación el estado regulatorio de los efectos del viento en estructuras. Por limitaciones de espacio esta descripción se limitará a las normas más relevantes a estos efectos y foro (ASCE y Eurocódigo).

4.1 ASCE

Desde los estudios pioneros de Alan Davenport y Jack Cermak en los años 60, los túneles de viento han sido la herramienta estándar para determinar cargas de viento en estructuras de gran escala, como rascacielos, puentes de gran luz y cubiertas de grandes dimensiones. Con el tiempo, la necesidad de unificar métodos llevó a la publicación del ASCE 49-12 (ahora 21) y de obligado cumplimiento que se basó en las recomendaciones anteriores prescritas en la guía #67, ASCE. Este fue el primer estándar reconocido para pruebas en túneles de viento de capa límite. Sin embargo, con el crecimiento de la producción de energía renovable y la creciente preocupación por los efectos de los tornados y tormentas severas, se ha vuelto esencial actualizar este estándar para mejorar la precisión en el diseño estructural y la mitigación de daños [15].

La versión ASCE 49-21 [4] introduce cambios significativos en la metodología de túneles de viento para cargas de viento en estructuras, con un enfoque especial en:

- Simulación de la propia estructura espaciotemporal del viento natural:
 - o Simulaciones de turbulencia parcial.
 - o Modelado parcial de flujo alrededor de elementos menores arquitectónicos.
- Requisitos más flexibles pero regulados para el escalado y semejanza dinámica, permitiendo una mayor variabilidad en los modelos utilizados sin comprometer la precisión en la simulación.

Se incluye la referencia a sistemas convectivos y de tornados y vientos no sinópticos, en respuesta a estudios que indican que los daños por

tornados en EE. UU. tienen costos anuales similares a los huracanes. Esto ha llevado a la introducción de requisitos específicos en ASCE 7-22 y su futura incorporación en pruebas de túneles de viento.

En lo que respecta a las simulaciones de Túneles de Viento y Nuevas Metodologías, la ASCE 49-21 establece requisitos para la simulación de flujos en túneles de viento, diferenciando entre: edificios de baja altura, donde las turbulencias locales afectan de manera significativa la distribución de presiones permitiendo simulaciones de turbulencia parcial (PTS), utilizadas para mejorar la precisión en modelos con geometrías complejas así como la carga de viento en productos específicos, como paneles solares montados en cubiertas y estructuras modulares.

Una modificación importante es la flexibilización del escalado y semejanza dinámica en túneles de viento, permitiendo modelar elementos más pequeños con mayor precisión, pero de forma igualmente regulada en esta norma. Tradicionalmente, los túneles de viento de capa límite utilizan escalas entre 1:200 y 1:500, pero para elementos como paneles solares, estas escalas no eran adecuadas. Ahora, se pueden utilizar modelos más grandes, de 1:20 a 1:50, para resolver detalles geométricos más pequeños.

Así, el estándar introduce la simulación parcial de turbulencia (PTS), que permite modelar con precisión los efectos aerodinámicos más relevantes sin la necesidad de replicar completamente todas las escalas de turbulencia.

Se establecen también nuevos requisitos de ASCE 49-21 en lo que respecta a la medida:

- Duración mínima de pruebas de al menos 500 veces la escala de tiempo integral para garantizar la estabilidad estadística.
- Frecuencia de muestreo de presiones para capturar correctamente los efectos aerodinámicos relevantes.
- Precisión en la fabricación de modelos, estableciendo tolerancias de $\pm 2\%$ en la

geometría y especial atención a la nitidez de bordes y aristas vivas en modelos impresos en 3D.

Estos cambios buscan mejorar la fiabilidad de los datos obtenidos en túneles de viento, asegurando que las cargas de viento calculadas sean aplicables a condiciones reales.

En términos de futuras investigaciones, se plantea la necesidad de estudiar con mayor profundidad diversas áreas como la validación de simulaciones numéricas (LES) con pruebas en túneles de viento para optimizar modelos aerodinámicos. Actualmente al igual que otras normas como NBC [6] o Eurocódigo la ASCE no contempla la aplicación de modelos numéricos.

En definitiva, la ASCE 49-21 representa un avance en la metodología de túneles de viento, incorporando nuevas técnicas para mejorar la evaluación de cargas de viento en estructuras de gran tamaño y en productos manufacturados de distinto propósito (fachadas o sistemas de solar, por ejemplo). Con la flexibilización en los requisitos de escala y la inclusión de metodologías como PTS, los ingenieros del viento ahora cuentan con herramientas más precisas para evaluar el comportamiento aerodinámico de edificaciones y sistemas expuestos a eventos extremos.

Esta norma no solo moderniza la forma en que se realizan pruebas en túneles de viento, sino que también sienta las bases para futuras investigaciones en aerodinámica de edificaciones, mejorando la resistencia estructural y la seguridad frente a eventos meteorológicos severos.

4.2 Eurocódigo

Se presentan aquí algunos avances del nuevo prEN 1991-1-4:2021, versión actualizada del Eurocódigo 1-4 [5] que previsiblemente por fin verá la luz en Otoño de este 2025. El borrador del Eurocódigo de Segunda Generación sobre acciones del viento en estructuras, dentro del mandato M/515 de la Comisión Europea

presenta numerosas e importantes novedades con respecto a su predecesor [5], [16]. Este proceso, iniciado en 2017, busca mejorar la precisión, reducir las diferencias entre normas nacionales y simplificar su aplicación para diseñadores e ingenieros. El documento final propone una estructura más clara y organizada, con una parte principal más reducida y 13 novedosos anexos que detallan aspectos muy relevantes.

Desde su origen en los años 70, los Eurocódigos han evolucionado para armonizar los estándares europeos de diseño estructural. En particular, la normativa de viento ha pasado por diversas revisiones, desde la versión ENV 1991-2-4:1995, hasta la versión actual EN 1991-1-4:2005 [5]. La segunda generación del Eurocódigo responde a la necesidad de actualizar criterios y mejorar la coherencia con estándares internacionales. En particular y en lo relativo a la regulación de los efectos del viento en estructuras, esta edición viene a llenar un vacío de contenido notable con respecto a normas avanzadas como la descrita en la sección anterior ASCE [3], [4], la Canadiense NBC,[6], Mexicana CFE [17], o la Australiana/Neozelandesa [18].

Uno de los objetivos clave del nuevo prEN 1991-1-4:2021 es la reducción de los Parámetros Determinados Nacionalmente (NDPs), permitiendo un mayor grado de uniformidad en toda Europa. Específicamente, se han propuesto modificaciones en la evaluación de cargas de viento para optimizar los diseños estructurales y mejorar la eficiencia de materiales. El nuevo documento introducirá varios cambios clave:

1. Mapas de viento (isotacas) mejorados: Se han desarrollado mapas de velocidad básica del viento basados en valores nacionales existentes, con el objetivo de armonizar diferencias entre países. Evitando, por ejemplo, notables saltos en velocidades de diseño en pasos fronterizos como los pirineos o el río Guadiana.

2. Modelos de estructura espacial del viento, capa límite atmosférica revisados: Se mantiene el modelo logarítmico para perfiles de viento, pero se introducen alternativas para estructuras esbeltas hasta 300 m de altura.
3. Coeficientes aerodinámicos: Se han revisado y ampliado coeficientes de presión y fuerza, incorporando criterios más detallados para edificios irregulares, torres de refrigeración y estructuras con múltiples fachadas.
4. Procedimientos mejorados para respuesta dinámica: Se han revisado las metodologías para evaluar vibraciones inducidas por el viento, efectos aeroelásticos y cargas en puentes.
5. Mayor facilidad de uso: Se ha reestructurado el documento en una parte principal reducida y 13 anexos que contienen información detallada sobre distintos aspectos del cálculo del viento.

Las mejoras en prEN 1991-1-4:2021 impactarán de manera significativa en diversos ámbitos de la ingeniería estructural. En el diseño de edificios y puentes, se proporcionarán criterios más precisos para la evaluación de cargas de viento, lo que permitirá optimizar la seguridad y eficiencia de los mismos. En el caso de la infraestructura energética, que abarca torres de transmisión y aerogeneradores, se introducirán mejoras en la predicción de cargas aerodinámicas, favoreciendo un diseño más resistente y adaptado a las condiciones climáticas. Asimismo, las estructuras industriales y las torres de enfriamiento se beneficiarán de la inclusión de nuevos coeficientes aerodinámicos, lo que permitirá un cálculo más ajustado de los efectos del viento. Finalmente, en la evaluación de cargas dinámicas, se incorporarán herramientas mejoradas para el análisis de la respuesta estructural, lo que facilitará un diseño más preciso y optimizado frente a los efectos del viento.

El salto en materia de la regulación de la acción del viento en estructuras es el mayor que ha experimentado esta norma desde su origen con diferencia. Quedarán, no obstante, pendientes algunas evoluciones importantes para futuras revisiones como las acciones en sistemas de energía solar térmica y fotovoltaica de planta, sobre la topografía y en la edificación. Regulación de los efectos de sistemas meteorológicos de naturaleza convectiva.

Con este documento, los ingenieros estructurales contarán con herramientas más avanzadas y armonizadas a nivel europeo, mejorando la seguridad y optimización del diseño en el contexto del cambio climático y fenómenos meteorológicos extremos.

5. La variable humana en el riesgo frente a la acción del viento

Más allá de los avances en investigación, tecnología y regulación normativa de los efectos del viento en estructuras, se pone de manifiesto aquí la necesidad de integrar la componente humana y el enfoque social en la investigación que conduzca a sistemas más resilientes especialmente cara a la gestión integral de tormentas severas. Esta no depende solo de avances tecnológicos, sino también de la comprensión profunda del comportamiento humano en situaciones de crisis. Es necesario integrar o vincular estos enfoques sociales en la investigación y regulación de la normativa.

La ciencia social puede desempeñar un papel crucial en la meteorología operativa. Los sistemas de alerta y comunicación del riesgo deben considerar la percepción pública y los factores culturales que influyen en la toma de decisiones. Las advertencias meteorológicas no siempre generan las respuestas esperadas debido a factores individuales, sociales e institucionales [19].

Esto se une a la creciente complejidad de los desastres naturales, donde pueden superponerse múltiples amenazas (por ejemplo, tormenta

extra-tropical o tornados e inundaciones simultáneas). Los sistemas de alerta deben evolucionar para reflejar estos riesgos compuestos, ayudando a las personas a priorizar sus acciones de protección y los ingenieros estructuralistas, técnicos y científicos investigadores en estos campos deben enlazar con los propios de las ciencias sociales y gestión de emergencias para una adecuada gestión integral de infraestructuras más resilientes.

Algunos estudios han demostrado que muchos ciudadanos no atienden adecuadamente las alarmas relativas a emergencias. Ya sea por falta de información clara, por experiencias previas que les hacen subestimar el riesgo o porque no existe el espacio disponible adecuado [20]. Igualmente, los sistemas de alerta no siempre logran la respuesta deseada, ya que muchas personas ignoran las advertencias tras haber experimentado múltiples alertas sin consecuencias previas ("fatiga de alertas").

Igualmente destaca el concepto de "abrigo en múltiples etapas", donde las personas ajustan su estrategia de protección a medida que el peligro se vuelve más evidente. En situaciones de emergencia algunos ciudadanos buscan refugio en una habitación interior, pero al percibir signos de peligro inminente, cambian de ubicación dentro de la casa, demostrando que las decisiones no son instantáneas, sino un proceso dinámico.

6. Conclusiones

El aumento de daños por tormentas severas presenta una tendencia insostenible que requiere acciones inmediatas. La ingeniería del viento ofrece soluciones probadas que pueden reducir significativamente las pérdidas económicas y proteger vidas. La clave pasa, en parte, por implementar regulaciones más estrictas para la resistencia estructural frente al viento y fortalecer la investigación en aerodinámica de edificaciones y modelado de vientos extremos.

La ingeniería del viento es una disciplina joven que vive una evolución importante en relación a la evolución de las tipologías estructurales como la obligada resiliencia de la mismas en el contexto del cambio climático. Así lo demuestran las revisiones de las normas más avanzadas. La ASCE integra novedades importantes en lo relativo a la modelización de los efectos del viento en túneles de viento de capa límite así como en materia de efectos de vientos de naturaleza convectiva como tornados y downbusts.

El prEN 1991-1-4:2021 representa un gran paso en la evolución de la normativa de viento en Europa, integrando avances recientes en modelos aerodinámicos, cargas dinámicas y coeficientes estructurales. La incorporación de mapas de viento mejorados y metodologías más precisas reducirá las discrepancias nacionales y facilitará el diseño eficiente de estructuras resistentes al viento.

Es fundamental integrar las ciencias sociales en la gestión y prescripción para desastres meteorológicos para comprender tanto la respuesta del ciudadano como la de los expertos que toman decisiones críticas. Para ello, es necesario revisar y optimizar los sistemas de alerta, garantizando que sean claros y efectivos para diversos grupos sociales y escenarios de riesgo compuesto. Asimismo, fortalecer la investigación interdisciplinaria entre ingeniería, meteorología y ciencias sociales permitirá desarrollar estrategias de mitigación más eficientes. Finalmente, es crucial abordar la fatiga de alertas mediante nuevas estrategias de comunicación del riesgo que eviten la complacencia y fomenten respuestas adecuadas ante advertencias meteorológicas.

Agradecimientos

Se agradece aquí la participación de numerosos miembros de los laboratorios BLWT, UWO en Canadá, así como LACIAD, Oritia & Boreas en España en asociación tecnológica oficial. Igualmente, a las Universidades de Granada y

Western University a las que ambos grupos están vinculados. Las opiniones en este documento son exclusivamente de los autores. Los documentos oficiales de la ASCE 49 o Eurocódigo 1-4 recogen las prescripciones formalmente. G.A. Kopp agradece el apoyo financiero proporcionado por ImpactWX. J.M. Terrés-Nicoli agradece el apoyo de la ACHE a través de la comisión 1 grupo 9 que coordina la acción del viento así como las aportaciones y comentarios del Prof. F. Ricciardelli.

Referencias

- [1] A. Kareem (2020), Emerging frontiers in wind engineering: Computing, stochastics, machine learning and beyond, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Volume 206, 104320, ISSN 0167-6105.
- [2] J. H. Cain; D. Banks (2015), Wind Loads on Utility Scale Solar PV Power Plants, *Seaoc Convetion Proceedings 2015*.
- [3] American Society of Civil Engineers, *ASCE/SEI Standard 7-22. Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*, 2022.
- [4] American Society of Civil Engineers, *ASCE/SEI Standard 49-21. Wind Tunnel Testing for Buildings and Other Structures*, 2021.
- [5] European Committee for Standardization, *EN 1991-1-4:2005. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-4: General actions. Wind actions*, 2005.
- [6] National Research Council of Canada. (2020). *National Building Code of Canada 2020*.
- [7] T. Wu, R. Saiki, (2022) Applications of Machine Learning to Wind Engineering. *Frontiers in built environment*. Volume 8, Articlee 811460
- [8] Swiss Re Institute. (2024). *Natural catastrophes in 2023: sigma 1/2024*.
- [9] Munich Re. (2024). *Natural disasters in 2023: Analyses, assessments, positions*.
- [10] Insurance Information Institute. (2024). *Facts + Statistics: Catastrophes*.
- [11] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2024). *Billion-Dollar Weather and Climate Disasters: Overview*.
- [12] Gallagher Re. (2024). *Natural catastrophe report: First half of 2024*.
- [13] Kovaks, P. (2024). *CSSL Symposium*. ICLR.
- [14] Guy Carpenter (2024) *Post Report*. Cat Resource Centre.
- [15] Kopp, G.A. (2023). *Updates to the wind tunnel method for determining design loads in ASCE 49-21*. Wind and Structures, Vol. 37, No. 2 (2023) 163-178
- [16] Ricciardelli, F. (2023). *prEN 1991-1-4:2021: the draft Second Generation Eurocode on wind actions on structures - A personal view*. Wind and Structures, Vol. 37, No. 2 (2023) 79-94
- [17] Comisión Federal de Electricidad. *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Viento*. Edición 2020. México: Comisión Federal de Electricidad, 2020.
- [18] Standards Australia and Standards New Zealand, *Structural Design Actions – Part 2: Wind Actions*, AS/NZS 1170.2:2021. Sydney, Australia; Wellington, New Zealand: Standards Australia and Standards New Zealand, 2021.
- [19] J. R. Olson, C. M. Doyle, D. LaDue, and A. N. Marmo, “End-User Threat Perception: Building Confidence to Make Decisions Ahead of Severe Weather,” *Weather, Climate, and Society*, vol. 15, no. 4, pp. 745–759, 2023.
- [20] 1. J. Henderson, J. Spinney, and J. L. Demuth, “Conceptualizing Confidence: A Multisited Qualitative Analysis in a Severe Weather Context,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 104, no. 2, pp.