

SIMULACIÓN DINÁMICA DE ESTRUCTURAS A PARTIR DE ENSAYOS EXPERIMENTALES EN TÚNEL DE VIENTO

Medina, Julián^b; Adotti, Marcelo I.^{a,b}; Wittwer, Adrián R.^{a,b}; Marighetti, Jorge O.^b

^aInstituto de Modelado e Innovación Tecnológica, IMIT (CONICET–UNNE), Argentina

^bFacultad de Ingeniería, Laboratorio de Aerodinámica, Universidad Nacional del Nordeste, Argentina

Palabras clave: ingeniería de viento; CAARC; túnel de viento; presiones fluctuantes; integración HFPI; elementos finitos; respuesta dinámica.

RESUMEN

Este trabajo presenta una metodología numérico–experimental para determinar la respuesta dinámica de estructuras esbeltas sometidas a la acción del viento. Se adopta como caso de estudio el modelo estándar CAARC, referencia internacional en ingeniería de viento. La propuesta combina ensayos en túnel de viento de capa límite, medición simultánea de presiones fluctuantes, integración de presiones de alta frecuencia (HFPI), escalamiento modelo–prototipo y análisis estructural por elementos finitos en el dominio del tiempo. Se comparan dos representaciones de carga: un modelo unidimensional por franjas de altura y un modelo tridimensional distribuido. La consistencia del acoplamiento se verifica mediante la comparación entre resultantes HFPI y reacciones de base del modelo FEM. Los resultados muestran que el procedimiento permite obtener desplazamientos, aceleraciones y reacciones dinámicas con trazabilidad desde el dato experimental hasta la respuesta del prototipo. El enfoque 1D resulta eficiente para estimaciones globales, mientras que el enfoque 3D conserva mayor información espacial y es más adecuado para analizar torsión, modos superiores y distribuciones asimétricas de presión.

ABSTRACT

This paper presents a numerical–experimental methodology for determining the dynamic response of slender structures subjected to wind action. The CAARC standard tall building model is adopted as the case study. The approach combines boundary-layer wind tunnel testing, simultaneous fluctuating pressure measurements, High-Frequency Pressure Integration (HFPI), model–prototype scaling, and time-domain finite element analysis. Two load representations are compared: a one-dimensional strip model and a three-dimensional distributed model. The coupling consistency is verified by comparing HFPI resultants with FEM base reactions. The results show that the procedure provides dynamic displacements, accelerations, and reactions with traceability from the experimental pressure records to the prototype response. The 1D approach is efficient for global estimates, whereas the 3D approach preserves spatial information and is more suitable for torsion, higher modes, and asymmetric pressure distributions.

1. Introducción

La acción del viento sobre estructuras esbeltas genera excitaciones fluctuantes que pueden inducir desplazamientos, aceleraciones y solicitaciones relevantes para criterios de servicio, confort y seguridad estructural. En edificios altos y estructuras sensibles al viento, la evaluación confiable de estas acciones requiere representar no sólo una presión media equivalente, sino también la variabilidad temporal, la correlación espacial de las presiones y la posible amplificación dinámica asociada a las frecuencias propias de la estructura. Este marco ha sido ampliamente desarrollado en la ingeniería de viento a partir de enfoques estadísticos y espectrales, con antecedentes clásicos y modernos sobre cargas fluctuantes, respuesta dinámica y estimación de valores máximos.¹⁻⁴

Los ensayos en túnel de viento sobre modelos a escala reducida siguen siendo una herramienta central para caracterizar las acciones aerodinámicas en estructuras complejas. En particular, la medición de presiones fluctuantes de alta frecuencia sobre modelos rígidos permite reconstruir cargas dependientes del tiempo mediante integración espacial de presiones. Sin embargo, las presiones medidas sobre un modelo reducido no son directamente el dato de interés para el diseño estructural; el objetivo final es obtener la respuesta dinámica del prototipo a escala real. Por ello, se requiere un procedimiento que conecte de manera trazable el dato experimental con un modelo estructural computacional.

El problema abordado consiste en transformar registros de presión medidos experimentalmente sobre un modelo CAARC en cargas aerodinámicas equivalentes aplicables a un modelo de elementos finitos del prototipo. El procedimiento combina: (i) preprocesamiento de señales de presión; (ii) escalamiento modelo-prototipo; (iii) integración de presiones de alta frecuencia; (iv) construcción de cargas 1D y 3D; (v) simulación elastodinámica en el dominio del tiempo; y (vi) verificación de consistencia mediante comparación entre resultantes HFPI y reacciones estructurales.

El objetivo general del trabajo es desarrollar y documentar una metodología reproducible de acoplamiento experimental-numérico para estimar la respuesta dinámica de estructuras bajo acción del viento, comparando la eficiencia y la fidelidad de un modelo 1D por franjas frente a un modelo 3D distribuido.

2. Antecedentes y caso de estudio

El modelo estándar CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council) se ha consolidado como referencia internacional para comparar resultados experimentales, modelos numéricos y metodologías de evaluación de cargas de viento en edificios altos. El prototipo es un prisma rectangular de dimensiones aproximadas 45,72 m × 30,48 m × 182,88 m, el cual posee relaciones de esbeltez representativas de una estructura sensible a la acción dinámica del viento.^{5;6}

En la literatura se distinguen dos técnicas experimentales principales para evaluar acciones dinámicas de viento sobre edificios altos: la balanza de fuerzas de alta frecuencia (HFFB) y la integración de presiones de alta frecuencia (HFPI). La primera mide resultantes globales (fuerzas de presión, fricción y efectos de estela turbulenta) en la base del modelo, mientras que la segunda mide presiones locales distribuidas sobre la superficie, permitiendo reconstruir cargas globales y distribuidas. La técnica HFPI resulta especialmente conveniente cuando se desea transferir la excitación a un

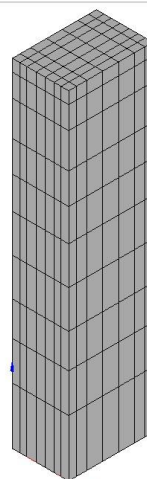
modelo estructural detallado, preservar información espacial o evaluar torsión y modos superiores.⁷⁻¹¹

Desde el punto de vista conceptual, la acción del viento sobre una estructura es un problema de interacción fluido–estructura, que puede ser abordado mediante diferentes estrategias. En este trabajo se adopta, para el acople, un enfoque híbrido: la dinámica del fluido se caracteriza experimentalmente mediante presiones medidas en túnel de viento, mientras que la dinámica del sólido se resuelve computacionalmente aplicando el Método de los Elementos Finitos (FEM).

Bajo hipótesis de pequeños desplazamientos, se considera que el movimiento estructural no modifica de forma apreciable el campo de presiones medido; por lo tanto, el acoplamiento se trata como un acople unidireccional fluido→estructura. Es posible adoptar esta hipótesis de acople sin inferir errores groseros, solo en casos donde la velocidad del flujo de fluido es de varios órdenes de magnitud mayor respecto de la velocidad de deformación del sólido, como se sucede en el caso de estudio.



(a) Modelo a escala reducida del edificio CAARC ensayado.



(b) Modelo computacional del edificio CAARC.

Figura 1. Modelos del edificio CAARC utilizados como casos de estudio.

3. Estudio experimental en túnel de viento

Los ensayos se realizaron en el túnel de viento de capa límite Jacek P. Gorecki del Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste. La cámara de ensayos posee una longitud de 22,8 m, ancho de 2,4 m y alto de 1,8 m. El flujo se genera mediante un ventilador axial accionado por un motor de 92 kW. Este túnel de viento, tipo Eiffel, cuenta con capacidad para reproducir perfiles de capa límite atmosférica mediante rugosidad superficial y dispositivos generadores de vorticidad.¹²⁻¹⁴



(a) Generadores de Vorticidad.



(b) Túnel de viento Jacek Gorecki.

Figura 2. Instalaciones del Laboratorio de Aerodinámica - FI UNNE.

Para el estudio se empleó una configuración de capa límite atmosférica suburbana, con exponente de ley de potencia cercano a $p=0,25$ y rugosidad equivalente de prototipo $z_0=0,7m$. El modelo CAARC fue construido a escala geométrica $\lambda L \approx 1/400$, con dimensiones de modelo $112,5\text{ mm} \times 75\text{ mm} \times 450\text{ mm}$. La instrumentación incluyó $N = 280$ tomas de presión distribuidas sobre las cuatro fachadas laterales del prisma, organizadas en 10 niveles horizontales con 7 tomas por cara y 28 por nivel.



Figura 3. Modelo del edificio CAARC situado en la cámara de ensayos.

Cada corrida experimental registró 20 000 muestras por toma, con frecuencia de muestreo $f_s = 625\text{ Hz}$ y duración total $T_m = 32\text{ s}$ en tiempo de modelo. Se ensayaron 24 ángulos de incidencia del viento, desde 0° hasta 345° con paso angular de 15° . La presión dinámica de referencia adoptada para el procesamiento fue $q_m = 250\text{ Pa}$, equivalente a una velocidad de referencia del modelo $U_m = 20,20\text{ m/s}$ bajo densidad estándar del aire. Para el prototipo se adoptó $U_p = 40\text{ m/s}$ a la altura de coronamiento.

Tabla 1 - Parámetros principales del ensayo y del escalamiento modelo–prototipo.

Parámetro	Modelo	Prototipo / factor
Escala geométrica	$\lambda_L = 1/406,4$	–
Dimensiones CAARC	112,5 × 75,0 × 450,0 mm	45,72 × 30,48 × 182,88 m
Presión dinámica de referencia	$q_M = 250$ Pa	$q_P/q_M = 3,92$
Velocidad de referencia	$U_M = 20,20$ m/s	$U_P = 40,00$ m/s
Frecuencia de muestreo	$f_{s,M} = 625$ Hz	$f_{s,P} \approx 3,04$ Hz
Intervalo temporal	$\Delta t_M = 0,0016$ s	$\Delta t_P \approx 0,328$ s
Duración del registro	$T_M = 32$ s	$T_P \approx 6569$ s
Cantidad de tomas	280	–
Ángulos ensayados	0° : 15° : 345°	24 direcciones

Los registros de presión se convirtieron en coeficientes instantáneos de presión mediante

$$C_{p,i}(t) = \frac{p_i(t) - p_{ref}(t)}{q_{ref}}, \quad (1)$$

donde $p_i(t)$ es la presión medida en la toma i , $p_{ref}(t)$ es la presión estática de referencia y q_{ref} la presión dinámica de referencia. Este procesamiento conserva el contenido temporal de las señales, condición necesaria para reconstruir acciones aerodinámicas fluctuantes.

4. Metodología de acoplamiento experimental–numérico

La metodología propuesta transforma las presiones medidas en el modelo reducido en cargas aplicables al prototipo. Para ello se emplean leyes de semejanza geométrica, cinemática y dinámica. Definiendo una escala de longitud $\lambda_L = L_M/L_P$ y una escala de velocidad $\lambda_V = U_M/U_P$, la escala temporal queda expresada como

$$\lambda_t = \frac{t_M}{t_P} = \frac{\lambda_L}{\lambda_V}, \quad (2)$$

de modo que $t_P = t_M/\lambda_t$. Teniendo en cuenta que el fluido entre modelo y prototipo es el mismo, la escala de presiones resulta

$$\frac{p_P}{p_M} = \left(\frac{U_P}{U_M} \right)^2. \quad (3)$$

La reconstrucción de acciones aerodinámicas se realiza mediante HFPI. A cada toma o panel superficial se le asocian un área tributaria A_i , una normal saliente $\mathbf{n}_i$ y un vector posición $\mathbf{r}_i$. En cada instante de tiempo, la fuerza resultante se aproxima por

$$\mathbf{F}_{HFPI}(t) = \sum_{i=1}^N p_i(t) A_i \mathbf{n}_i, \quad (4)$$

y el momento respecto de un punto de referencia $\mathbf{r}_0$ se calcula como

$$\mathbf{M}_{HFPI}(t) = \sum_{i=1}^N (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \times [p_i(t) A_i \mathbf{n}_i]. \quad (5)$$

En particular, se utilizó el código FEM Code Aster, el cual cuenta con módulos de análisis dinámico adecuados para resolver la respuesta estructural transitoria.¹⁷

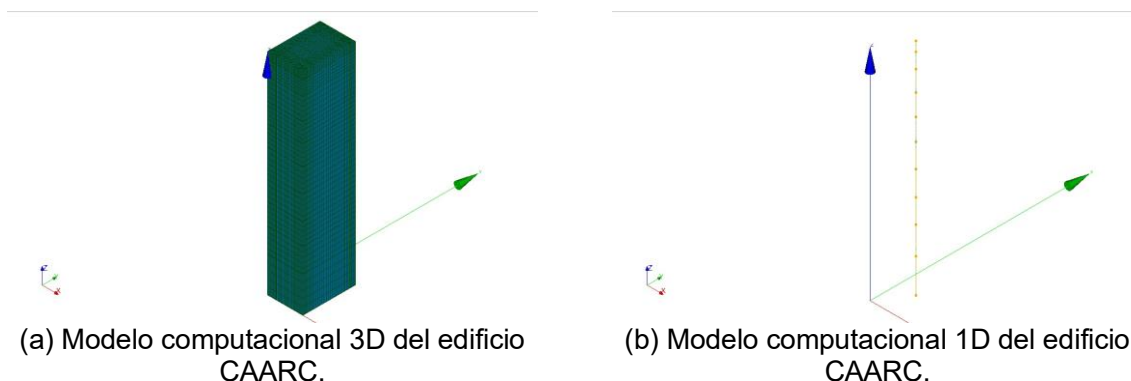


Figura 4. Modelos de Elementos Finitos de edificio CAARC utilizados como casos de estudio.

Las expresiones 4 y 5 permiten construir dos tipos de excitación estructural. En el enfoque 1D, las presiones se agrupan por franjas horizontales y se integran fuerzas y momentos equivalentes por nivel. En el enfoque 3D, las presiones se asignan sobre grupos de superficies del modelo FEM, conservando la distribución espacial de la excitación.

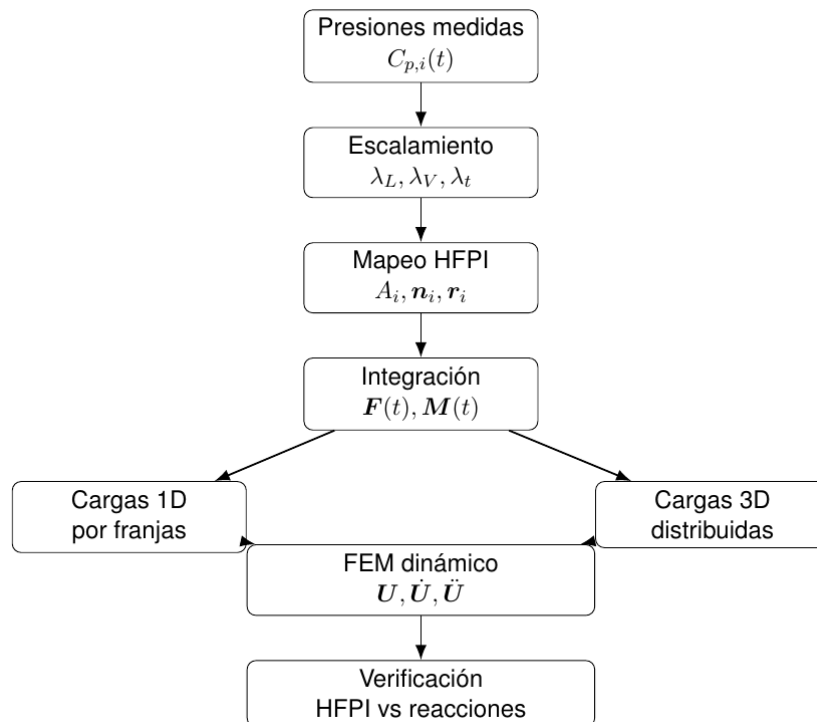


Figura 5. Flujo de trabajo del acoplamiento experimental–numérico propuesto.

5. Modelo estructural y análisis dinámico

La estructura se modela en régimen lineal elástico y pequeñas deformaciones. Luego de la discretización espacial por elementos finitos, el sistema dinámico semidiscreto se expresa como

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = F^{\text{ext}}(t), \quad (6)$$

donde M , C y K son las matrices globales de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente, $U(t)$ es el vector de desplazamientos nodales y $F^{\text{ext}}(t)$ contiene las acciones aerodinámicas reconstruidas mediante HFPI.

El amortiguamiento se representa mediante el modelo proporcional de Rayleigh,

$$C = \alpha_R M + \beta_R K, \quad (7)$$

calibrado para reproducir una razón de amortiguamiento objetivo cercana al 1 % crítico en los primeros modos de interés. La integración temporal se realiza con un esquema implícito de Newmark. Para evitar que el arranque desde reposo contamine los estadísticos, se descarta un intervalo inicial asociado al transitorio numérico de puesta en carga.

Tabla 2 - Propiedades mecánicas equivalentes adoptadas para el modelo CAARC.

Propiedad	Símbolo	Valor adoptado
Módulo de elasticidad equivalente	E	$2,30 \times 10^8 \text{ Pa}$
Coefficiente de Poisson	ν	0,25
Densidad equivalente	ρ_s	160 kg/m^3
Amortiguamiento objetivo	ζ	1 % crítico
Coefficiente de Rayleigh asociado a masa	α_R	$0,0127 \text{ s}^{-1}$
Coefficiente de Rayleigh asociado a rigidez	β_R	$0,00757 \text{ s}$
Área equivalente del modelo 1D	A	$1,3935 \times 10^3 \text{ m}^2$
Momento de inercia respecto de eje local y	I_y	$1,0789 \times 10^5 \text{ m}^4$
Momento de inercia respecto de eje local z	I_z	$2,4275 \times 10^5 \text{ m}^4$
Constante torsional equivalente	J_x	$2,5328 \times 10^5 \text{ m}^4$

La verificación interna del acoplamiento se realiza comparando las resultantes HFPI con las reacciones de base obtenidas del modelo FEM. Para fuerzas, una métrica representativa es

$$\varepsilon_F = \frac{\|F_{\text{HFPI}} - R_{\text{base}}\|}{\|F_{\text{HFPI}}\|}, \quad (8)$$

con una definición análoga para momentos. Esta comparación permite detectar errores de signo, unidades, normales, áreas tributarias o transferencia de cargas.

6. Resultados

6.1. Validación aerodinámica

Los coeficientes globales obtenidos mediante HFPI muestran coherencia con valores de referencia reportados para el CAARC. Para incidencia $\alpha = 0^\circ$ se obtuvo un coeficiente medio de arrastre $C_D = 1,486$, dentro del rango reportado en la literatura para configuraciones comparables. La componente fluctuante lateral resultó $C_{L,rms} = 0,352$, valor consistente con mediciones de edificios prismáticos bajo viento turbulento.^{6,15,16}

Tabla 3 - Síntesis de coeficientes aerodinámicos representativos.

Parámetro	Resultado propio	Referencia	Comentario
C_D a 0°	1,486	1,45–1,50	Coherente con CAARC
$C_{L,rms}$ a 0°	0,352	$\approx 0,35$	Viento turbulento

6.2. Transferencia de cargas HFPI–FEM

La comparación entre coeficientes obtenidos por HFPI y reacciones FEM permite validar la transferencia de cargas. Para $\alpha = 0^\circ$, las medias del modelo 3D coinciden prácticamente con las resultantes HFPI, con diferencias menores al 0,1 %. Las fluctuaciones observadas en las reacciones estructurales son mayores que las fluctuaciones de la excitación HFPI debido a la amplificación dinámica de la estructura.

Tabla 4 - Comparación de coeficientes medios y fluctuantes para $\alpha = 0^\circ$ en el intervalo post-transitorio.

Coeficiente	HFPI		FEM 3D		FEM 1D	
	C	C_σ	C	C_σ	C	C_σ
CFD	1,485	0,241	1,485	0,570	1,479	0,567
CFL	0,006	0,336	0,009	0,528	0,010	0,557
CMD	0,794	0,129	0,794	0,397	0,790	0,393
CML	0,002	0,153	0,003	0,331	0,004	0,353
CMz	0,001	0,009	-0,002	0,009	-0,002	0,009

Los modelos 1D y 3D producen respuestas globales comparables para el caso CAARC, especialmente en desplazamientos medios y RMS. Esto confirma que el modelo por franjas es útil como aproximación eficiente cuando la respuesta está dominada por modos traslacionales y la geometría es regular. No obstante, el enfoque 3D resulta más robusto para conservar asimetrías espaciales y evaluar efectos torsionales.

6.3. Respuesta dinámica del prototipo

La respuesta dinámica se evaluó en el coronamiento del edificio, considerando desplazamientos y aceleraciones en direcciones longitudinal y transversal al viento. La Tabla 5 resume los estadísticos de desplazamiento obtenidos para $\alpha = 0^\circ$, 45° y 90° .

Tabla 5 - Estadísticos de desplazamiento en coronamiento para el intervalo post-transitorio.

α	Modelo	U D [cm]	UD, σ [cm]	PicoD [cm]	U L [cm]	UL, σ [cm]	PicoL [cm]
0°	3D	-41,3	22,7	110,4	-0,1	8,6	33,5
	1D	-40,8	22,4	107,4	-0,1	8,7	28,6
45°	3D	-25,6	12,2	64,1	14,4	10,5	49,9
	1D	-25,3	11,8	60,5	14,1	10,3	46,2
90°	3D	-9,7	4,7	24,7	0,1	41,3	135,1
	1D	-9,4	4,6	24,1	0,5	40,7	131,2

Las diferencias entre 1D y 3D en desplazamientos globales son reducidas para la estructura regular considerada, con discrepancias del orden de pocos puntos porcentuales. En aceleraciones, las diferencias pueden ser más sensibles debido a la influencia del contenido espectral y a la forma en que cada representación de carga excita los modos de la estructura. La respuesta transversal para $\alpha = 90^\circ$ muestra la mayor demanda fluctuante, coherente con la presencia de excitación lateral asociada al desprendimiento de vórtices.

7. Discusión

El procedimiento propuesto muestra una cadena verificable desde el dato experimental hasta la respuesta estructural. La coincidencia entre las medias de las resultantes HFPI y las reacciones FEM indica que el mapeo de presiones, áreas tributarias, normales y grupos de carga se realizó de manera consistente. Este chequeo es un componente central de la metodología, porque permite detectar errores que no serían evidentes si sólo se analizaran desplazamientos o aceleraciones finales.

La comparación entre modelos 1D y 3D debe interpretarse en términos de costo y fidelidad. El enfoque 1D por franjas reduce la información de presión a resultantes por altura. Esta reducción lo hace robusto, simple de automatizar y computacionalmente eficiente, por lo que resulta adecuado para estimaciones globales y para etapas iniciales de validación. En cambio, el enfoque 3D conserva la distribución espacial de la excitación sobre la envolvente del edificio, lo cual permite representar mejor asimetrías, momentos torsionales y posibles contribuciones de modos superiores.

En estructuras prismáticas regulares, como el CAARC, la respuesta global puede quedar razonablemente representada por el esquema 1D cuando predominan los primeros modos traslacionales. Sin embargo, en geometrías irregulares, edificios con plantas complejas o sistemas con acoplamientos flexo-torsionales, la representación 3D se vuelve más conveniente. Del mismo modo, cuando el objetivo es evaluar demandas locales, esfuerzos en regiones particulares o transferencia de cargas a una malla tridimensional detallada, la reducción por franjas puede resultar insuficiente.

Entre las principales limitaciones se identifican: (i) la hipótesis de acople unidireccional, válida mientras el movimiento estructural no modifique significativamente el campo de presiones; (ii) la sensibilidad del procedimiento al cálculo de áreas tributarias y normales; (iii) la influencia del transitorio inicial asociado a la puesta en carga; y (iv) la dependencia de los resultados respecto de las propiedades equivalentes adoptadas en el CAARC. Estas limitaciones no invalidan la metodología, pero delimitan su rango de aplicabilidad y orientan futuras mejoras.

8. Conclusiones

Se desarrolló un procedimiento de acoplamiento experimental–numérico para estimar la respuesta dinámica de una estructura esbelta sometida a la acción del viento a partir de presiones fluctuantes medidas en túnel. El método combina integración HFPI, escalamiento modelo–prototipo, construcción de cargas 1D y 3D, análisis transitorio por elementos finitos y verificación por equilibrio global.

Los resultados obtenidos para el modelo CAARC permiten extraer las siguientes conclusiones principales:

1. La integración HFPI permite reconstruir acciones aerodinámicas dependientes del tiempo con trazabilidad física desde las presiones locales hasta fuerzas y momentos globales.
2. La comparación entre resultantes HFPI y reacciones FEM constituye una verificación interna esencial del procedimiento, especialmente para controlar signos, unidades, normales, áreas tributarias y transferencia de cargas.
3. El modelo 1D por franjas reproduce adecuadamente respuestas globales del CAARC cuando predominan modos traslacionales, ofreciendo una alternativa eficiente para estimaciones preliminares y comparaciones internas.
4. El modelo 3D distribuido preserva mayor información espacial y resulta preferible para analizar torsión, modos superiores, distribuciones asimétricas de presión y demandas locales.
5. El enfoque híbrido fluido experimental + sólido computacional representa un compromiso adecuado entre fidelidad aerodinámica y costo computacional, evitando las dificultades de un acoplamiento CFD–FEM completo cuando la hipótesis de pequeños desplazamientos es razonable.

Como trabajo futuro se propone extender la validación a otras configuraciones de viento, incorporar estrategias de puesta en carga gradual para reducir transitorios numéricos, estudiar la sensibilidad a propiedades modales y amortiguamiento, y aplicar la metodología a estructuras con geometrías más complejas o con mayor participación torsional.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Aerodinámica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Nordeste por el soporte experimental y técnico asociado a los ensayos en túnel de viento. Asimismo, se reconoce el marco académico de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería de la Facultad de Ingeniería de la UNNE, en el cual se desarrolló la metodología presentada.

Referencias

- [1] Davenport, A. G. The spectrum of horizontal gustiness near the ground in high winds. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 87(372), 194–211, 1961.
- [2] Davenport, A. G. Gust loading factors. Journal of the Structural Division, 93(3), 11–34, 1967.
- [3] Holmes, J. D. y Bekele, S. Wind Loading of Structures. 4.ª ed., CRC Press / Routledge, 2021.
- [4] Solari, G. y Kareem, A. Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design. John Wiley & Sons, 2019.
- [5] Wardlaw, R. L. y Moss, G. F. A Standard Tall Building Model for the Comparison of Simulated Natural Winds in Wind Tunnels. Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council, CC 662m Tech. 25, 1970.

- [6] Melbourne, W. H. Comparison of measurements on the CAARC standard tall building model in simulated model wind flows. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 6(1–2), 73–88, 1980.
- [7] Boggs, D. y Peterka, J. High frequency pressure integration technique for dynamic wind load estimation. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(1), 115–121, 2000.
- [8] Aly, A. M. Pressure integration technique for predicting wind-induced response in high-rise buildings. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 717–731, 2013.
- [9] Dragoiescu, C., Garber, J. y Kumar, K. S. A comparison of force balance and pressure integration techniques for predicting wind-induced responses of tall buildings. *ASCE Structures Congress*, 2006.
- [10] Vanin, D. D. Resposta dinâmica de edifícios altos frente à ação do vento: comparação de técnicas experimentais em túnel de vento. *Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, 2011.
- [11] Chen, X., Kwon, D.-K. y Kareem, A. High-frequency force balance technique for tall buildings: a critical review and some new insights. *Wind and Structures*, 18(4), 391–422, 2014.
- [12] Wittwer, A. R. y Möller, S. V. Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 84(3), 307–320, 2000.
- [13] De Bortoli, M. E., Natalini, B., Paluch, M. J. y Natalini, M. B. Part-depth wind tunnel simulations of the atmospheric boundary layer. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 90(4), 281–291, 2002.
- [14] Loredó-Souza, A. M., Camaño Schettini, E. B. y Paluch, M. J. Simulação da Camada Limite Atmosférica em Túnel de Vento. *IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência*, 2004.
- [15] Alminhana, G. W., Braun, A. L. y Loredó-Souza, A. M. A numerical-experimental investigation on the aerodynamic performance of CAARC building models with geometric modifications. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 180, 34–48, 2018.
- [16] Tamura, Y. Pressure measurement techniques for wind engineering. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 104–106, 134–142, 2012.
- [17] Électricité de France. *Code_Aster: Analysis of Structures and Thermomechanics for Studies and Research*. Software de código abierto, 1989–2023.