

COMPARACIÓN ENTRE METODOLOGÍAS ANALÍTICAS DE NORMAS DE VIENTO Y UN ENSAYO EN TÚNEL DE VIENTO

Dora Robert López

Ing. Civil., Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114, # 11901, e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao. CP 11500, La Habana, Cuba, dorarobert0210@gmail.com

RESUMEN

En Cuba se ha incrementado la construcción de edificios esbeltos para la industria hotelera, y esto ha hecho necesario profundizar en el análisis dinámico de estas estructuras. El análisis dinámico de edificios altos ante los efectos del viento es un problema complejo, por lo que se han motivado varias investigaciones especialmente cuando las edificaciones se encuentran insertadas en un ambiente construido que puede ocasionar fenómenos como la interferencia aerodinámica. El objetivo fundamental de este trabajo es: comparar las fuerzas longitudinales de viento de un ensayo experimental en un túnel de viento y las calculadas de forma analítica teniendo en cuenta el factor de interferencia por varias normativas internacionales: norma india (IWC), Eurocódigo (EN1991-1-4), brasileña (NBR6123) y australiana (AS/NZS1170.2-2011) en un edificio alto. Además, se analizaron los efectos y las modificaciones en las fuerzas horizontales en varios edificios bajos vecinos con la presencia del nuevo proyecto de edificación alto. En el análisis de las fuerzas estáticas equivalentes longitudinales se empleó el método de cálculo que plantea el Eurocódigo (EN1991-1-4). Los resultados del análisis evidenciaron que las fuerzas horizontales estáticas equivalentes en la base para la dirección de 90 grados, por la metodología empleada en la normativa del Eurocódigo (EN1991-1-4) con relación al túnel de viento fueron 2,5 veces superiores, debido fundamentalmente al efecto de blindaje que crea un edificio alto sobre el nuevo edificio a insertar.

Palabras claves: viento, edificios altos, efecto de blindaje, factor de interferencia.

COMPARISON BETWEEN ANALYTICAL METHODOLOGIES OF WIND STANDARDS AND A WIND TUNNEL TEST

ABSTRACT

In Cuba, the construction of slender buildings for the hotel industry has increased, and this has made it necessary to deepen the dynamic analysis of these structures. The dynamic analysis of tall buildings in the face of the effects of the wind is a complex problem, which is why several investigations have been motivated, especially when the buildings are inserted in a built environment that can cause phenomena such as aerodynamic interference. The main objective of this work is: to compare the longitudinal wind forces of an experimental test in a wind tunnel and those calculated analytically taking into account the interference factor by various international standards: Indian standard (IWC), Eurocode (EN1991-1-4), Brazilian (NBR6123) and Australian (AS / NZS1170.2-2011) in a tall building. In addition, the effects and modifications in the horizontal forces in several neighboring low buildings with the presence of the new tall building project were analyzed. In the analysis of the longitudinal equivalent static forces, the calculation methods proposed by the Eurocode (EN1991-1-4) were used. The results of the analysis showed that the equivalent static horizontal forces at the base for the 90 degree direction, by the methodology used in the Eurocode standard (EN1991-1-4) in relation to the wind tunnel was 2.5 times lower, mainly due to the shielding effect that a tall building creates over the new tall building.

Keywords: wind, tall buildings, shielding effect, interference factor.

Nota Editorial: Recibido: febrero 2021; Aceptado: abril 2021

1. INTRODUCCIÓN

El estudio del efecto de interferencia no es un tema reciente, se viene investigando desde hace 30 años, pero este análisis presenta una naturaleza muy compleja, incluso para el análisis de un solo edificio, debido al pensamiento erróneo de que el viento va a influir más en un edificio aislado que rodeado de edificios. Durante varios años se han analizado los diferentes parámetros que causan el efecto de interferencia: tamaño y forma del edificio, velocidad y dirección del viento, tipo de terreno y la cercanía entre los edificios, entre otros. El más importante es el último mencionado porque puede cambiar mucho el flujo del viento de acuerdo a las

distancias. Todo esto causa un efecto más complejo de lo que es conocido [1, 2]. Existen muchas investigaciones científicas [1, 3-5] que plantean que el flujo de viento a través de un grupo de edificios altos vecinos puede deformarse significativamente. La presencia de un nuevo edificio alto en un entorno construido, modifica las presiones de viento y las respuestas de aceleración de los edificios aguas abajo pueden tener drásticas variaciones debido al desprendimiento de vórtices del edificio más alto.

La interferencia aerodinámica inevitablemente tiene un efecto en todos los edificios, las variables como la geometría y la distancia de los edificios vecinos son las que provocan interferencia. Se ha demostrado que las presiones de viento del edificio objetivo se modifican si el edificio vecino está ubicado aguas arriba del edificio objetivo [6-11]. La posición relativa del edificio vecino altera las presiones del edificio objetivo, estas pueden aumentar o disminuir en dependencia de la ubicación que tenga el edificio vecino respecto al edificio objetivo [1, 12, 13]. El edificio vecino crea un efecto de blindaje sobre el edificio objetivo en la dirección longitudinal del viento, y en dependencia de la ubicación y de la geometría del edificio vecino la carga de viento del edificio objetivo puede modificarse entre un 10%-30% [1]. En algunos casos es tan dominante el efecto de blindaje, que en las fachadas donde deberían existir presiones positivas aparecen presiones negativas por este efecto [14-16].

La dirección del viento también es un parámetro que influye en las presiones del viento, dentro del análisis de la interferencia aerodinámica, la dirección más desfavorable para este fenómeno va a depender directamente de las configuraciones que tenga el edificio vecino y el edificio objetivo, es decir, para una dirección puede existir efecto de blindaje (dirección longitudinal), mientras que en la otra (dirección transversal) la carga del edificio objetivo puede llegar a aumentar hasta un 30% [1, 10, 16]. También cuando el edificio vecino tiene la mitad de la altura del edificio objetivo no hay un efecto interferencia, mientras que para un edificio vecino de misma altura y ubicado a $(1,5B; B)$, donde B es el ancho del edificio objetivo, hay un gran aumento del efecto de interferencia [14, 17]. Se demostró que cuando un edificio vecino se encuentra ubicado entre $2B$ y $5B$ la carga del edificio objetivo puede llegar a disminuir un 10%, mientras que el efecto de interferencia desaparece cuando el edificio vecino se encuentra entre $8B-9B$ [15].

Además de los efectos de interferencia entre edificios altos, también es importante tener en cuenta las modificaciones de las presiones que ejercen nuevos proyectos de edificios altos sobre los edificios bajos vecinos. La presencia de un edificio vecino alto respecto a los edificios vecinos bajos que se encuentran en el fondo (en los alrededores del edificio objetivo), debilita la influencia que tienen estos edificios vecinos bajos sobre el edificio objetivo, porque las presiones de los edificios vecinos bajos cercanos van a estar modificadas por el edificio vecino alto [7, 18].

La influencia del viento siempre es necesaria considerarla en áreas urbanas, porque la disposición específica de los edificios nuevos puede afectar negativamente a los edificios bajos existentes en forma de aumentos en las presiones negativas y en otros casos las presiones negativas se convierten en presiones positivas [16, 19]. Cuando el edificio bajo y el edificio alto tienen alguna fachada frente con frente, provoca que el efecto de interferencia sea muy fuerte [16, 19]. Las presiones de viento de los edificios bajos existentes son modificadas por la presencia de un nuevo edificio alto, y puede ocasionar que las cargas aumenten en más de 50% en dependencia de la altura que tenga el edificio vecino bajo y de la posición longitudinal y transversal del mismo.

La presente investigación se enmarca dentro de esos estudios de interacción del viento sobre estructuras altas en ambientes construidos, y tiene como objetivo, analizar y comparar las fuerzas longitudinales dinámicas determinadas por un ensayo en túnel de viento sobre un edificio alto a construirse y las obtenidas de forma analítica, mediante la metodología del Eurocódigo-EN1991-1-4 [20], teniendo en cuenta el factor de vecindad, o sea, el efecto de las edificaciones ya existentes sobre la obra a construirse, por varias normativas internacionales (norma india (IWC) [21], brasileña (NBR6123) [22] y australiana, (AS/NZS1170.2-2011) [23]). Fue objetivo también la determinación de forma analítica de la variación que se genera en las fuerzas de viento en algunas edificaciones bajas existentes en el entorno del edificio objetivo.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

El edificio objeto de estudio a construir estará ubicado en La Habana y presentará una altura de 152 metros. La estructura del edificio consiste en losas de entresijos de hormigón armado in situ sin vigas, apoyadas directamente sobre columnas que serán hormigonadas in situ. La estabilidad horizontal está asegurada por dos núcleos compuestos por los pozos de ascensores y escaleras ubicadas en los extremos laterales de cada piso. La transición de las cargas verticales se garantiza con columnas de hormigón armado que descienden hasta los cimientos.

Para determinar las presiones estáticas y dinámicas del viento sobre esta edificación fue realizado un estudio en túnel de viento de capa límite que tuvo en cuenta las características del entorno construido, o sea, la influencia de edificios vecinos sobre el edificio objeto de estudio. Se plantearon dos simulaciones

representativas de las características del terreno definiendo un tipo de terreno A (zona próxima al mar) y un tipo de terreno B (zona central de la ciudad) que responden a la categoría de terreno 0 y III definidas en el Eurocódigo [20]. Las características del viento correspondientes a estas dos simulaciones se representan en la tabla 1 y la figura 1 muestra las direcciones de viento ortogonales.

Se consideró también el efecto que produce el edificio objetivo sobre algunas edificaciones bajas, debido a que estas pudieran experimentar incrementos en las presiones de viento de los edificios bajos de su entorno. El análisis de las edificaciones bajas de forma analítica se realizó según se plantea en las metodologías de las normas: india [21] y el Eurocódigo [20]. La figura 2 muestra las direcciones de viento ortogonales y las edificaciones que se seleccionaron para el análisis.

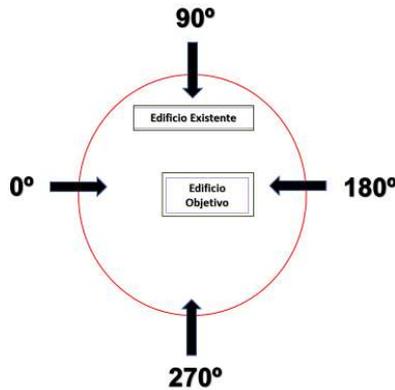


Figura 1: Direcciones de viento ortogonales

Tabla 1: Condiciones de rugosidad

Incidencia del viento	Rugosidad del suelo	Categoría Eurocódigo equivalente	z_0 (m)	Intensidad de turbulencia ($h_{ref} = 90$ m)	V_b (m/s)
Terreno A (90°)	Mar	0	0,003	10%	32
Terreno B (0°, 180° y 270°)	Urbano	III	0,3	17%	36,5



Figura 2: Edificaciones bajas a analizar

2.1. Análisis de las fuerzas estáticas longitudinales del viento en el edificio

Como paso previo a la determinación de las discrepancias debido al método entre las fuerzas longitudinales dinámicas obtenidas en el túnel de viento y las estáticas equivalentes, se decidió establecer las diferencias entre las fuerzas producto primero de la simulación estática del viento.

Para esto se compararon las fuerzas estáticas obtenidas por el túnel y las calculadas analíticamente mediante el Eurocódigo [20], ya que en las consideraciones de esta metodología estuvo basado el ensayo en el túnel. El Eurocódigo [20] plantea que la fuerza estática sobre una edificación se obtiene mediante la ecuación 1:

$$w_e = q_p(z_e) * c_{pe} \quad (1)$$

Donde z_e es la altura de referencia para la presión externa, c_{pe} es el coeficiente de presión para la presión exterior y $q_p(z_e)$ es la presión correspondiente a la velocidad pico calculada por la ecuación 2:

$$q_p(z) = [1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del aire asumida como $1,225 \text{ kg/m}^3$ y $v_m(z)$ es la velocidad media calculada mediante la ecuación 3:

$$v_m(z) = c_r(z) * c_o(z) * v_b \quad (3)$$

Donde v_b es la velocidad básica (para el ensayo 32 m/s o 36,5 m/s según el tipo de terreno en función de la dirección de viento a analizar y de acuerdo con los valores tomados en el ensayo en el túnel), $c_o(z)$ es el coeficiente topográfico (fue considerado igual a 1 de acuerdo a las especificaciones de la norma) y $c_r(z)$ es el factor de rugosidad, definido por la ecuación 4:

$$c_r(z) = k_r * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

Donde z_0 es la longitud de la rugosidad y k_r es el factor del terreno que depende de la longitud de la rugosidad (z_0) y se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$k_r = 0,19 * \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} \quad (5)$$

Donde $z_{0,II} = 0,05\text{m}$ (categoría de terreno II).

La intensidad de turbulencia se calcula mediante la ecuación 6 para $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_1}{c_o(z) * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (6)$$

Según las especificaciones de la norma $c_o(z)$ es 1, y k_1 se toma como 1.

2.1.1. Análisis de los Factores de Vecindad según las normativas internacionales

Como en el ensayo en túnel de viento se recoge el efecto de las edificaciones vecinas, para comparar analíticamente las fuerzas estáticas, se determinaron los factores de vecindad (FV), que es el término intenta recoger analíticamente las variaciones en la carga debido a las edificaciones del entorno construido. Este término es un factor multiplicador del coeficiente de presión, generalmente, o modifica a la velocidad del viento de cálculo, dependiendo de la metodología analizada. En el caso de esta investigación, dadas las incertidumbres y discrepancias entre las metodologías analíticas existentes para este término, se decidió comparar varias de las conocidas, en específico las que brindan algunas normativas internacionales (la brasileña [22], la india [21] y la australiana [23]).

El edificio objetivo puede tener alteraciones en las presiones de viento debido a la proximidad de otras construcciones existentes (ver figura 1), la dirección más afectada es la de 90 grados debido a la edificación alta existente en esa dirección es por eso que se escoge para este análisis.

La norma brasileña [22] es una de las que propone una metodología para tener ideas preliminares del efecto de interferencia entre edificios vecinos. Los FV en esta norma (NBR6123) son considerados hasta la altura máxima de los edificios vecinos, y están basados en estudios en el túnel de viento. Se establece un factor que considera de forma aproximada este efecto y modifica la carga actuante, es decir, analiza la influencia de los edificios altos vecinos a partir de la proporción existente de las dimensiones que hay entre los planos de las caras enfrentadas de dos edificios altos vecinos y la menor dimensión, entre los lados b, d y la semidiagonal en planta sobre el edificio de estudio.

Los valores de FV proporcionados en la norma de la india (IWC) [21] dependen de la zona de interferencia y del ancho estructural de la edificación normal a la dirección del viento del edificio que ofrece protección. La distancia entre el edificio alto existente y el edificio de estudio es de 200 m, por lo tanto, se sitúa aproximadamente entre $2b = (165,86\text{ m})$ y $3b = (248,79\text{ m})$, siendo b el ancho del edificio alto existente (82,93 m) por lo que el edificio objetivo se encuentra en una zona de alta interferencia (Z1).

En la norma australiana [23] no se determina un FV, la metodología que plantea para analizar el efecto de vecindad modifica la velocidad del viento a través del multiplicador de blindaje (M_s). El multiplicador de blindaje depende del siguiente parámetro de blindaje "s", donde él depende del espacio promedio de los edificios de protección, de la altura promedio del techo de blindaje y del ancho medio de los edificios de protección normal a la corriente de viento. Además, plantea que los edificios que proporcionen blindaje son aquellos que estén considerados dentro de 45° con un radio de $20h$ (posicionados de manera simétrica alrededor de las direcciones que se consideran) y la altura tiene que ser igual o mayor a "z" (altura de referencia en la estructura por encima del nivel medio del suelo local) para que proporcionen protección.

La tabla 2 muestra cómo queda la expresión de fuerza estática (ecuación 1) con FV obtenidos por cada una de las normativas internacionales analizadas:

Tabla 2: Valores del factor de vecindad (FV)

Normas	FV
NBR6123	$w_e = q_p(z_e) * c_{pe} * c_r(z) * 1,0$
IWC	$w_e = q_p(z_e) * c_{pe} * c_r(z) * 1,6$
AS/NZS	$w_e = \left[[1 + 7 * I_v(z)] * \frac{1}{2} * \rho * (c_r(z) * c_o(z) * v_b * 0.73)^2(z) \right] c_{pe} * c_r(z)$

En el estudio se considera de forma analítica, la influencia que ejerce el edificio alto objetivo en el vecindario donde se construirá. En este caso solamente las normativas de la india [21] y el Eurocódigo [20] proponen metodologías aproximadas para tener en cuenta este efecto. El Eurocódigo [20] está basado en la modificación de la presión pico en cuanto a la consideración de la altura de referencia $z_n(p_q(z_e))$. Se seleccionaron varias edificaciones para estudiar (figura 2) siguiendo los siguientes criterios: cercanía, geometría en planta regular (rectangular) y de acuerdo con un análisis preliminar basado en la norma de la india [21], se garantizó que todas se situasen en la zona de alta interferencia. Los valores de z_e obtenidos debido a la influencia del edificio objetivo para ambas direcciones ortogonales se mantuvieron, solo varió la distancia en planta en dirección al viento y la distancia en planta perpendicular al viento. Las edificaciones seleccionadas tienen una separación (X: distancia al edificio objetivo) respecto al edificio objetivo menor al radio ($r = 110\text{m}$), por lo que, $z_n = 55\text{m}$.

Para calcular las fuerzas estáticas sobre estas edificaciones mediante el Eurocódigo [20] teniendo en cuenta el Factor de Vecindad (FV) se empleó el mismo procedimiento descrito anteriormente solo que en este caso el coeficiente $c_r(z)$ y la intensidad de turbulencia se calcularon para la altura $z_e = z_n$. La tabla 3 muestra las fuerzas de viento estáticas teniendo en cuenta la interferencia del edificio objetivo y sin tenerlo en cuenta, para 0 grados porque para 90 grados los valores son muy parecidos.

Tabla 3: Determinación de w_e para 0°

0°	z_e (m) Altura del edificio	z_n (m)	q_{site} (kN/m ²)	q_{site} (kN/m ²) (F.V)	I_v	I_v (F.V)	w_e (kN)	w_e (kN) (F.V)	$\frac{w_e \text{ con FV}}{w_e \text{ sin FV}}$
E.1	6,22	55	0,53	1,12	0,33	0,19	284,20	424,23	1,49
E.2	12,71	55	0,70	1,12	0,27	0,19	351,26	458,82	1,31
E.3	14,00	55	0,73	1,12	0,26	0,19	787,66	1010,41	1,28
E.4	18,50	55	0,80	1,12	0,24	0,19	940,33	1145,22	1,22

La norma india [21] a diferencia del Eurocódigo [20] no modifica la presión de velocidad del viento sino que ofrece un valor de IF (nomenclatura que emplean para el Factor de Vecindad) independiente, es decir, es un coeficiente que afecta a la fuerza del viento final. Este valor de IF (nomenclatura que emplean para el Factor de Vecindad) va a depender de la distancia X y del ancho en planta en dirección al viento (b). La tabla 4 proporciona el Factor de Vecindad que brinda la norma india [21], afectando a la carga estática obtenida por el Eurocódigo [20] para 0 grados.

Tabla 4: Determinación de w_e para 0°

0°	X(m)	B(m)	L(m)	IF	w_e (kN)	IF * w_e (kN)
	Distancia al Edificio Objetivo	Distancia en planta en dirección al viento	Distancia en planta perpendicular al viento	Factor de Vecindad	Fuerza estática	Fuerza estática con el factor de vecindad
E.1	12.00	24,24	13.00	1.00	284,20	284,20
E.2	78.00	5,73	18,24	1,06	351,26	372,33
E.3	40.00	20,31	22,3	1,24	787,66	976,69
E.4	38.00	16,5	20,6	1,25	940,33	1175,41

2.2. Análisis de las cargas estáticas equivalentes longitudinales del viento en el edificio de estudio (efecto dinámico)

La fuerza estática equivalente en sentido longitudinal, que simula la respuesta dinámica del viento, se determinó mediante la metodología del Eurocódigo [20], pues bajo los criterios de esta norma estuvo planteado el ensayo en el túnel. El Eurocódigo [20] plantea que la fuerza longitudinal estática equivalente se calcula mediante la ecuación 7. El factor estructural (coeficiente dinámico) $c_s c_d$ tiene en cuenta el efecto sobre las acciones del viento de la ocurrencia no simultánea de picos de presión del viento en la superficie junto con el efecto de las vibraciones de la estructura debido a turbulencia y se determina mediante la ecuación 8.

$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z_e) * A_{ref} \quad (7)$$

$$c_s c_d = \frac{1 + 2 * k_p * I_v(z_e) * \sqrt{B^2 + R^2}}{1 + 7 * I_v(z_e)} \quad (8)$$

Donde $I_v(z_e)$ es la intensidad de turbulencia calculada a la altura z_e , z_e es la altura de referencia estructural (60% de la altura total), k_p es el factor pico, definido por la relación entre el valor máximo de la parte fluctuante de la respuesta y su desviación estándar, B^2 es el factor de fondo (que tiene en cuenta la falta de correlación total de la presión sobre la superficie de la estructura) y R^2 es el factor de respuesta debido a la resonancia (tiene en cuenta la resonancia de la turbulencia con el modo de vibración).

3. RESULTADOS

Los resultados se muestran primero para la comparación entre las fuerzas estáticas analíticas y las del túnel y posteriormente para las fuerzas dinámicas. En el caso de las fuerzas estáticas se muestran únicamente las reacciones en la base mientras que para las fuerzas dinámicas se analiza el comportamiento de las cargas por niveles en altura de la edificación.

3.1. Comparaciones de las fuerzas estáticas

A partir del análisis de las metodologías analizadas se calcularon las fuerzas estáticas longitudinales para la dirección de 90 grados y se compararon con los resultados del túnel según se muestran en la figura 3.

En los resultados del túnel, al ser el viento fluctuante y dados los fenómenos locales sobre las fachadas asociados a la interacción con el edificio alto existente con el nuevo a construir, se tienen registros negativos y positivos de las presiones que repercuten en las reacciones en la base, no siendo así con los cálculos analíticos. De la figura 3 es notable resaltar que existe una desproporción elevada entre los valores analíticos y el resultado positivo (debido a presiones sobre la fachada) obtenido en el ensayo. El valor más desfavorable (negativo) para la dirección de 90 grados es producto de las presiones negativas sobre la fachada (succión), debido al efecto de blindaje provocado por la edificación alta existente en esa dirección sobre el edificio alto de estudio. Ninguna normativa refleja que para esa dirección la fachada del edificio objetivo presente presiones negativas (succión), aunque el valor modular obtenido del ensayo en el túnel de viento de succión es muy parecido a la carga determinada por la norma australiana [23], donde el multiplicador de blindaje afecta la velocidad.

Los resultados positivos (presión) del túnel son inferiores más de 20 veces a los que se obtienen mediante la vía analítica; a diferencia de lo que se recoge en las metodologías aproximadas de normas: brasileña (FV=1) [22], india (FV=1,6) [21] y australiana (Ms=0,73) [23], la construcción alta existente en la dirección de 90 grados actúa como pantalla protectora captando las cargas de viento en lugar de generar incrementos sobre las fuerzas. Este comportamiento ratifica que es muy difícil tener en cuenta los cambios que genera en el flujo de viento el efecto de las edificaciones de forma analítica y pone en evidencia la necesidad de contar con estudios en túnel de viento o mediante técnicas de CFD en casos de obras de importancia en terrenos urbanos.

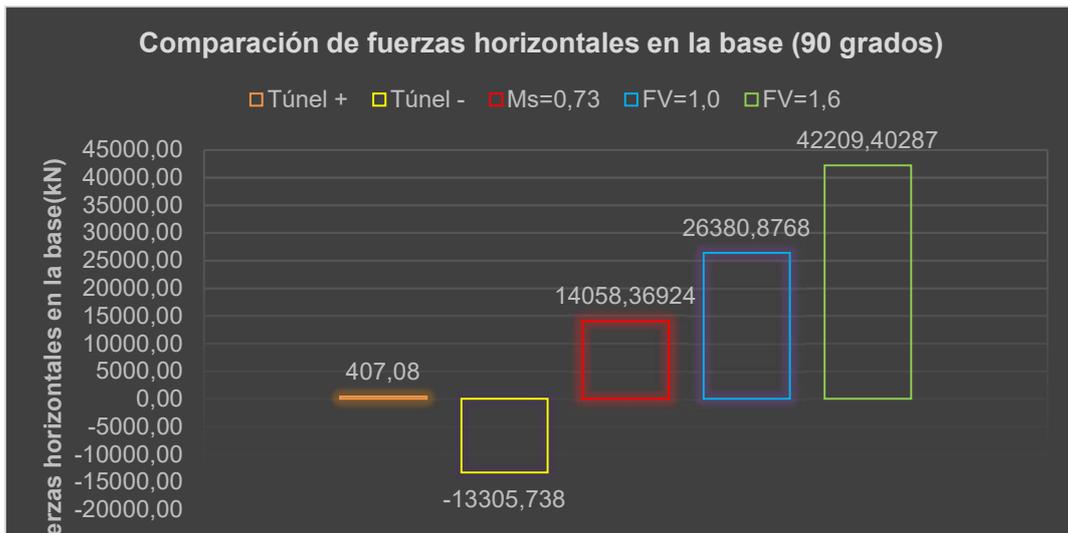


Figura 3: Comparación de las fuerzas horizontales en la base para los factores de vecindad obtenidos en las normativas en la dirección de 90°

Algunos estudios realizados en túneles de viento han demostrado que, para la dirección longitudinal del viento, con relación a la cara analizada, el efecto de blindaje es dominante y puede llegar a generar fuerzas negativas [1, 10, 14], justamente lo que ocurre con el edificio objetivo. Este fenómeno no puede ser analizado con las normativas analíticas.

3.2. Comparaciones de las fuerzas dinámicas

En la figura 4 se compararon, para la dirección de 90 grados, las fuerzas horizontales en cada piso según los datos obtenidos en el túnel de viento y la metodología analítica del Eurocódigo. Para esta dirección es necesario destacar los cambios que ocurren a lo largo de toda la fachada del edificio objetivo, donde se experimentan variaciones de presiones de positivas a negativas y viceversa entre los niveles de altura, predominando las presiones negativas (succión), como pudo apreciarse del análisis estático con las fuerzas horizontales en la base.

Se puede apreciar que las fuerzas derivadas del túnel resultaron 2,5 veces inferiores a las obtenidas por el Eurocódigo [20].

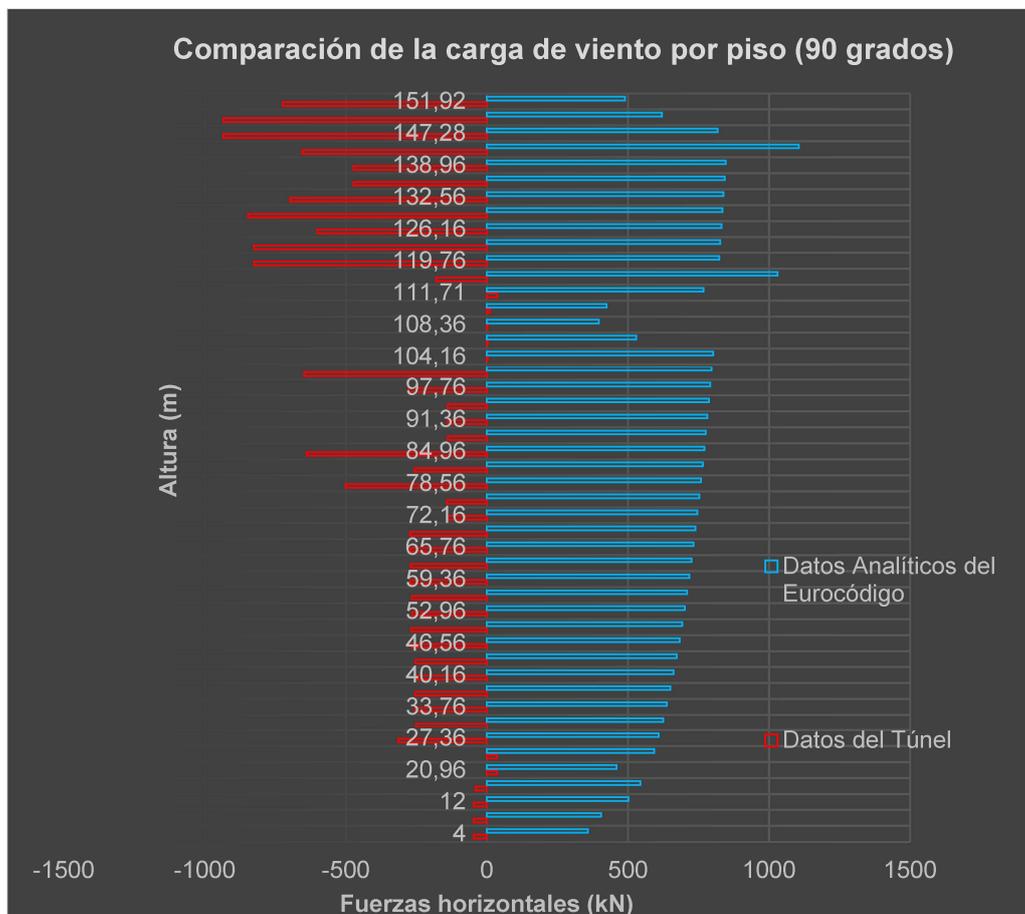


Figura 4: Comparación de las cargas dinámicas en cada piso para la dirección de 90°

3.3. Influencia de la construcción del edificio objetivo sobre los edificios vecinos existentes

La figura 5 muestra las diferencias existentes entre las tres fuerzas longitudinales (fuerza estática sin influencia del factor de vecindad (patrón), fuerza estática con la modificación del Eurocódigo [20] y fuerza estática con la modificación de la norma india (IWC) [21]) para la dirección de 0 grados. En el edificio uno la carga aumenta en un 49% respecto a la carga inicial que el edificio presentaba según el Eurocódigo [20], mientras que la carga obtenida por la norma india [21] se mantiene sin modificaciones con relación a la carga patrón. Para el edificio dos la carga aumenta un 31% respecto a la carga inicial que el edificio presentaba y en un 6% respecto a la carga inicial que el edificio tenía según la norma india [21]. En la edificación tres la carga aumenta un 28% y 24% respecto a la carga inicial por el Eurocódigo [20] y la india [21] respectivamente. En la edificación cuatro la carga aumenta un 22% y 25% respecto a la carga inicial por el Eurocódigo [20] y la india [21] respectivamente. De acuerdo con estos resultados, se puede decir que en los edificios más alejados y altos se observaron menos discrepancias entre las normativas analizadas. En todos los casos la

carga aumenta de forma notable y esto pudiera afectar las condiciones de estas edificaciones, por lo cual se hace necesario no solo tener en cuenta la carga sobre el edificio construido sino ampliar el estudio hacia las edificaciones vecinas bajas ya que pueden verse afectadas. En todos los casos examinados los valores dan mayores si se emplea la normativa del Eurocódigo [20], excepto para el edificio cuatro donde la norma india [21] proporcionó un valor superior.

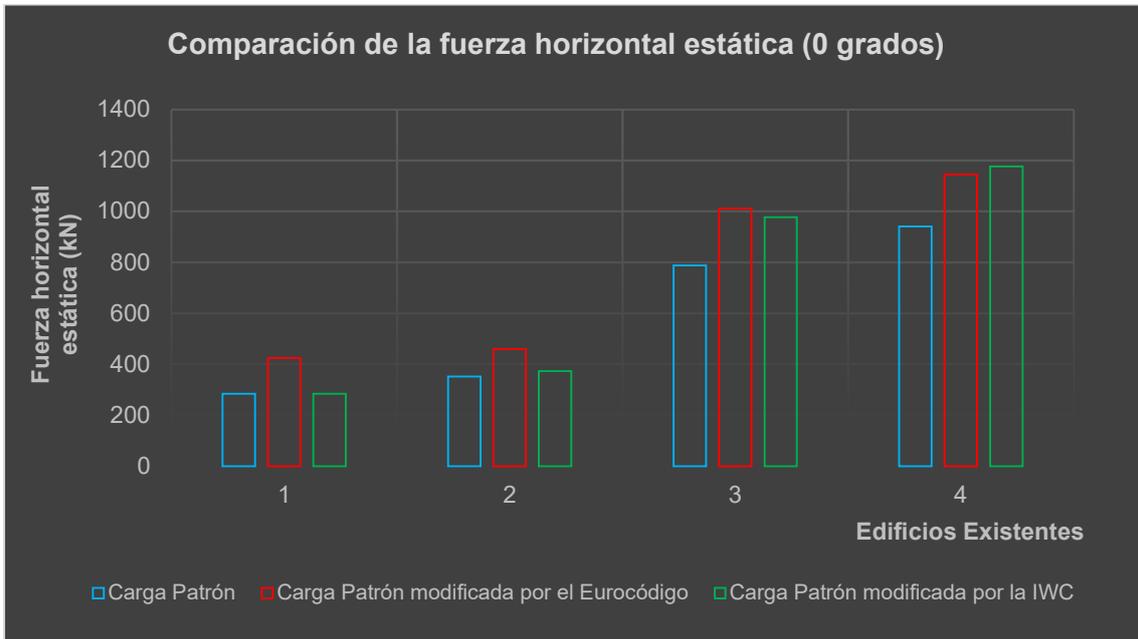


Figura 5: Comparación de la fuerza estática equivalente para 0° de los edificios existentes analizados

La figura 6 muestra la fuerza estática longitudinal inicial de los edificios, la fuerza estática modificada según el Eurocódigo [20] y la fuerza estática según la norma india (IWC) [21] para la dirección de 90 grados. Las cargas de los cuatro edificios respecto a la carga inicial con la modificación del Eurocódigo [20] se mantienen igual que para 0 grados, mientras que para la norma india [21] aumentan para el edificio uno, dos y tres en un 17%, 19% y 24% respectivamente y para el edificio cuatro solo aumenta un 4%.

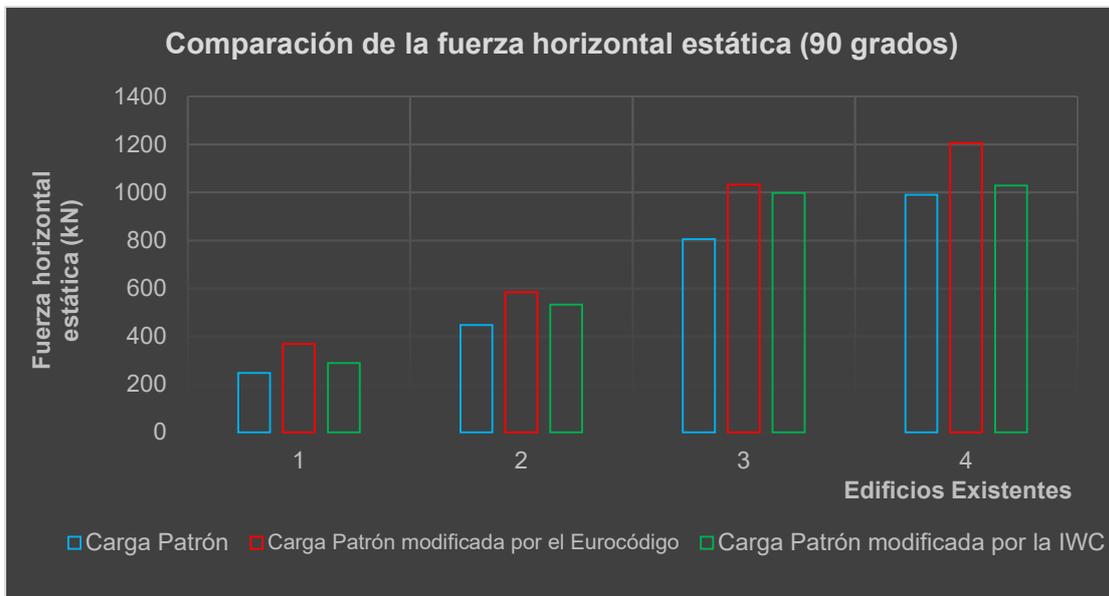


Figura 6: Comparación de la fuerza estática equivalente para 90° de los edificios existentes analizados

Algunos estudios [7, 16, 18, 19] han demostrado que las respuestas de los edificios bajos cambian cuando se inserta en una zona urbana un edificio súper alto respecto a los edificios existentes. La presencia de un edificio alto provoca cambios en el campo de flujo alrededor del edificio vecino bajo [16, 24] tal y como se muestra en las figuras 5 y 6, donde independientemente de la normativa empleada las fuerzas del viento de los edificios aumentaron con la presencia del edificio objetivo. Los valores que se obtuvieron en los estudios [7, 16, 18,

19], el Factor de Vecindad varía entre 0,4-1,7 en dependencia de la altura, de la sección transversal y de la posición de los edificios vecinos bajos respecto al edificio objetivo. Los Factores de Vecindad obtenidos por el Eurocódigo [20] y la IWC [21] varían entre 1,0-1,5 en dependencia de la altura, sección transversal y la posición de estos edificios bajos existentes respecto al edificio objetivo lo cual se encuentra en bastante relación con los estudios experimentales.

4. CONCLUSIONES

A partir de los resultados se demostró que las fuerzas dinámicas longitudinales obtenidas por el túnel viento son inferiores, mayoritariamente, a las calculadas de forma analítica, teniendo en cuenta el Factor de Vecindad (FV), por varias normativas internacionales en el edificio objetivo; a pesar de que se tomaron los mismos parámetros de simulación del viento que fueron utilizados para el ensayo en el túnel. Para la dirección de 90 grados ninguna normativa fue capaz de reflejar en el Factor de Vecindad el fenómeno de apantallamiento entre el edificio alto existente y el edificio objetivo. La normativa que más divergencia tuvo respecto al ensayo en el túnel fue la norma de la IWC [21] siendo 3,5 veces superiores a las reacciones obtenidas por el ensayo en el túnel. Para la dirección de 90 grados las presiones que se obtuvieron en túnel de viento fueron de succión, mientras que en las normativas estudiadas fueron de presión.

Las fuerzas longitudinales dinámicas obtenidas por el ensayo en el túnel de viento se compararon con las calculadas de forma analítica. Las cargas estáticas equivalentes que se obtuvieron fueron superiores a las del ensayo en el túnel de viento. La presencia cercana de la edificación alta existente, la altura y la sección transversal similar que presenta respecto al edificio de estudio son los causantes de que existan estas divergencias con relación al ensayo en túnel de viento. En el ensayo en el túnel se recrea de mejor forma el ambiente alrededor del edificio objetivo, lo cual no pueden hacerlo de forma eficiente, para la dirección de viento donde ocurre el apantallamiento, las metodologías empleadas en las normativas.

Las edificaciones bajas existentes que rodean al edificio objetivo analíticamente fueron afectadas por la inserción de este edificio súper alto en la zona urbana. Para el análisis de estos edificios se empleó la metodología del Eurocódigo [20] y la IWC [21] para incorporar el Factor de Vecindad, modificando sus presiones de viento: la carga aumentó para ambas direcciones (0 y 90 grados) entre un 20%-50% para todos los casos analizados.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es producto del esfuerzo, apoyo y dedicación de mi tutora la Dra. C. Ing. Ingrid Fernández Lorenzo, que ha sido siempre muy atenta.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. H. a. K. S. H. K. Cho, "Effects of neighboring building on wind loads," *Proceedings of Tall Buildings in Historical Cities-Culture & Technology for Sustainable Cities, CTBUH Seoul, Korea*, p. 9, 2004. CTBUH 2004 Seoul Conference
- [2] K. Y. C. a. Y. A. L. Yuan-Lung, "Effects of aerodynamic modification mechanisms on interference from neighboring buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 168, pp. 271-287, 2017/09/01/ 2017.
- [3] H. Y. a. H. K. L. Doan Sy, "Interference effects of wind-over-top flow on high-rise buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 187, pp. 85-96, 2019/04/01/ 2019.
- [4] H. Y. a. H. K. L. Doan Sy, "Interference effects of two high-rise buildings on wind-overtop flow in tandem arrangement: wind tunnel and CFD analysis," presented at the The 15th International Conference on Wind Engineering Beijing, China, 2019.
- [5] T. G. M. a. N. Isyumov, "Influence of aerodynamic interference in design," presented at the 14th International Conference on Wind Engineering, Brazil, 2015.
- [6] T. Yoshihito, "Turbulence effect on mutual interference of tall buildings," *Journal of Engineering Mechanics ASCE*, vol. 117, no. 3, pp. 443-456, 3/1/1991 1991.
- [7] Y. Q. a. M. G. J. Chen, "Interference effects of a proposed larger super high-rise building on wind-induced responses of an existing building," *The 15th International Conference on Wind Engineering*, p. 10, 2019.
- [8] T. G. M. a. B. K. Terry, "Impact of intermediate buildings on interference effects for tall buildings," in *Structures Congress*, 2014, pp. 1955-1966.
- [9] B. K. T. T. G. Mara, T. C. E. Ho and N. Isyumov, "Aerodynamic and peak response interference factors for an upstream square building of identical height," *Journal of Wind Engineering and Industrial*

- Aerodynamics*, vol. 133, pp. 200-210, 10/1/2014 2014.
- [10] Y. T. a. A. Y. Y. Hui, "Mutual interference effects between two high-rise building models with different shapes on local peak pressure coefficients," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 104-106, pp. 98-108, 2012/05/01/ 2012.
- [11] L. Z. D. Huang, Q. Ding, X. Zhu and W. Chen, "Aeroelastic and aerodynamic interference effects on a high-rise building," *Journal of Fluids and Structures*, vol. 69, pp. 355-381, 2017/02/01/ 2017.
- [12] T. C. E. H. a. N. I. T. G. Mara, "Interference and influence of nearby buildings: a discussion of the design approach," in *Structures Congress*, 2012, pp. 798-808.
- [13] X. Z. a. G. M. Y. Xianfeng, "Interference effects between two tall buildings with different section sizes on wind-induced acceleration," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 182, pp. 16-26, 2018/11/01/ 2018.
- [14] Y. T. a. A. Y. W. Kim, "Interference effects on aerodynamic wind forces between two buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 147, pp. 186-201, 2015/12/01/ 2015.
- [15] Z. N. X. X. F. Yu, J. B. Zhu and M. Gu, "Interference effects on wind pressure distribution between two high-rise buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 142, pp. 188-197, 2015/07/01/ 2015.
- [16] A. K. A. Flaga, R. Kłaput and G. Bosak, "The environmental effects of aerodynamic interference between two closely positioned irregular high buildings," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 180, pp. 276-287, 2018/09/01/ 2018.
- [17] Y. T. W. Kim, A. Yoshida and J.H. Yi, "Interference effects of an adjacent tall building with various sizes on local wind forces acting on a tall building," *Advances in Structural Engineering*, pp. 1-13, 2017.
- [18] A. P. A. Flaga, R. Kłaput and Ł. Flaga, "Aerodynamic interference between high-rise buildings in dense development," presented at the The 15th International Conference on Wind Engineering, Beijing, China, 2019.
- [19] H. M. B. Chen, W. Cheng and Q. Yang, "Effects of building arrangement on wind interferences of highrise building on low-rise building," presented at the The 15th International Conference on Wind Engineering, Beijing, 2019.
- [20] *Eurocode 1: actions on structures-general actions-part 1-4: wind actions*, 2005.
- [21] *IS: 875(Part 3). Wind Loads on buildings and structures-proposed draft & commentary. Document No: IITK GSDMA-Wind 02-V 50.*
- [22] *Associação brasileira de normas técnicas:forças devidas ao vento em edificações*, 1988.
- [23] *Australian new zeland standart: structural design actions-part 2: wind actions*, 2011.
- [24] H. H. a. R. H. A. S. Glumac, "Wind energy potential above a high-rise building influenced by neighboring buildings: An experimental investigation," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 175, pp. 32-42, 2018.