

Análisis dinámico de edificios altos frente a cargas de viento variando la relación de amortiguamiento

Dynamic analysis of tall buildings against wind loads by varying the damping ratio

Leticia Bergolla Peña^{1,*}

¹ Universidad Tecnológica de La Habana “José Antonio Echeverría”, Calle 114 No 11901 entre 119 y 127, Marianao, La Habana, Cuba.

*Correspondencia: letybgp@gmail.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Resumen

Los edificios altos son vulnerables a la acción de los vientos extremos debido a su comportamiento dinámico, por esta razón es de singular importancia la determinación de las fuerzas de viento y el análisis de las aceleraciones inducidas. El amortiguamiento estructural es uno de los parámetros que más incertidumbre genera para la determinación de las fuerzas de viento en edificios altos. En este trabajo se realiza un estudio de las consideraciones para determinar la razón de amortiguamiento en edificios según las normas ISO 4345-2009, el Eurocódigo en 1991-1-4 y la italiana CNR-DT207. Se seleccionan los valores de 1% y 1,5% de razón de amortiguamiento para determinar las fuerzas de viento y las aceleraciones máximas en tres edificaciones altas de hormigón armado. Los valores obtenidos muestran que las fuerzas del viento son mayores cuando son determinadas con una razón de amortiguamiento igual a 1% y los mayores valores de las aceleraciones se encuentran en la componente transversal en todas las edificaciones.

Palabras clave: edificios altos, carga de viento, razón de amortiguamiento, aceleraciones

Abstract

Tall buildings are vulnerable to the action of extreme winds due to their dynamic behavior, for this reason the determination of wind forces and the analysis of induced accelerations is of particular importance. Structural damping is one of the parameters that generate the most uncertainty for the determination of wind forces in tall buildings. In this work, a study of the considerations to determine the damping ratio in buildings according to the ISO 4345-2009 standards, the Eurocode EN 1991-1-4 and Italian Code CNR-DT207 is carried out. Values of 1% and 1.5% damping ratio are selected to determine the maximum wind forces and accelerations in three tall reinforced concrete buildings. The values obtained show that the wind forces are greater when they are determined with a damping ratio equal to 1% and the highest values of the accelerations are found in the transverse component in all the buildings.

Keywords: tall building, wind loads, damping ratio, accelerations

1. Introducción

El análisis del comportamiento de las estructuras frente a las cargas de viento es de gran importancia a nivel internacional y nacional ya que son numerosos los colapsos o fallos parciales ante el paso de fuertes vientos. En el caso particular de Cuba los vientos que se registran en temporada ciclónica pueden ocasionar daños considerables si no se realiza un adecuado diseño.

La optimización de los métodos de cálculo, junto al avance de la tecnología en la construcción de estructuras civiles, permiten actualmente diseñar y construir estructuras cada vez más livianas, de baja rigidez y amortiguamiento [1]. Este tipo de edificaciones por su tipología son más vulnerables a los vientos extremos y a sus efectos dinámicos, por lo que deben analizarse tanto por los criterios de estados límites últimos, donde se debe garantizar la resistencia de los elementos estructurales y que la estructura no falle frente a las cargas de diseño máximas, como por los criterios de estados límites de servicio, donde deben ser chequeados los desplazamientos y las aceleraciones inducidas por el viento de forma que se asegure principalmente el confort de los ocupantes [2].

La acción del viento sobre edificaciones genera tres componentes de la respuesta de la estructura: longitudinal, transversal y torsional [3]. La respuesta longitudinal proviene de las fluctuaciones de la presión de viento y se considera directamente relacionada con la turbulencia atmosférica y la energía de las ráfagas del viento. La respuesta transversal es producto del movimiento perpendicular de la estructura, que es inducida por las fluctuaciones de presión en una de las caras de la estructura junto al desprendimiento de vórtices. La respuesta torsional es producto del desbalance en la distribución de presiones instantáneas sobre las superficies de la estructura [4, 5].

En las normas canadiense NBCC-2010 [6], australiana AS/NZS 1170.2-2011 [7], ISO 4353:2009 [8] y Eurocódigo EN 1991:2004 [9] el método estático equivalente utilizado para el cálculo de las fuerzas dinámicas de viento es el Factor de Efecto Ráfaga que tiene en cuenta las tres componentes de la respuesta.

El cálculo de las aceleraciones actuantes sobre las edificaciones también tiene en cuenta el aporte de cada una de estas componentes. El máximo desplazamiento usualmente se produce en la dirección paralela al viento (longitudinal), sin embargo la aceleración máxima puede darse en el sentido perpendicular al viento (transversal) y las torsionales podrían superarlas en dependencia de las características de la edificación como pueden ser la sección transversal y esbeltez [10]. La norma actual de viento NC 285:2003 [11] no presenta un procedimiento para determinar las aceleraciones inducidas por el viento en edificios altos.

El periodo natural y la relación de amortiguamiento son características propias de la estructura muy importantes para estimar la carga de viento de diseño y la respuesta inducida por el viento [12]. Las respuestas de aceleración están relacionadas dinámicamente con la rigidez, la masa y la relación de amortiguamiento de los edificios [13]. El amortiguamiento es importante en el diseño de las edificaciones porque este indica la capacidad de la estructura para resistir el movimiento.

El amortiguamiento puede descomponerse en contribuciones diferentes: el amortiguamiento intrínseco o estructural, el suplementario o adicional y el aerodinámico. El amortiguamiento total se define entonces sumando las diferentes matrices de amortiguamiento. El amortiguamiento estructural suele estimarse a partir de fórmulas empíricas basadas en bases de datos de mediciones a escala real. El amortiguamiento suplementario proviene de dispositivos específicos añadidos al sistema del edificio. El amortiguamiento aerodinámico está relacionado con la viscosidad del aire y la velocidad del objeto respecto al flujo de aire. Este tipo de amortiguamiento no suele tenerse en cuenta en los edificios pues su contribución es bastante pequeña en comparación con el amortiguamiento estructural, pero podría ser relevante e incluso negativo para el diseño de edificios de gran altura muy esbeltos y flexibles [12]. La relación de amortiguamiento aerodinámico no se puede tener en cuenta para las oscilaciones transversales causadas por el desprendimiento de vórtices resonantes. En los casos en que se requiera evaluar el amortiguamiento aerodinámico para vibraciones laterales y torsionales se necesita evaluación experimental.

En el Eurocódigo [9], la norma italiana de viento [14], la norma ISO [8] y los estudios actualizados para la nueva propuesta de norma cubana se especifican fórmulas empíricas para estimar los parámetros del amortiguamiento. En general, los métodos de estimación disponibles solo consideran el amortiguamiento del modo fundamental. Sin embargo, los modos superiores son especialmente importantes para los edificios altos, y el amortiguamiento debido a estos modos superiores puede afectar a la capacidad de servicio del edificio [15]. Los trabajos de T. Mimura (2017) [16] y Shea Laventure (2020) [17] también estiman valores de amortiguamiento mediante otras técnicas más sofisticadas como la estimación automática para extraer frecuencias modales fundamentales y relaciones de amortiguamiento bajo el supuesto de que tener información sobre distribución de masa y formas modales sin requerir del conocimiento de un experto para seleccionar los parámetros modales adecuados.

Las normas proponen valores de razones de amortiguamiento diferentes, por tanto, resulta interesante evaluar las diferencias en las fuerzas de viento cuando son considerados diferentes valores de amortiguamiento para edificaciones de hormigón armado.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar las diferencias en las fuerzas de viento y aceleraciones en tres edificios altos de hormigón armado cuando se modifica la razón de amortiguamiento. En este trabajo las fuerzas provocadas por el viento y las aceleraciones se calculan por los estudios actualizados para la nueva propuesta de norma de viento cubana basada en el método Factor Efecto Ráfaga.

2. Materiales y Métodos

Consideraciones para el cálculo de la razón de amortiguamiento

El valor total de la razón de amortiguamiento es la suma del amortiguamiento estructural, el amortiguamiento aerodinámico y el amortiguamiento auxiliar -si existen dispositivos de amortiguamiento auxiliares o materiales de amortiguamiento-. A continuación se resumen las consideraciones del cálculo de la razón de amortiguamiento para edificios mediante la norma ISO 4345-2009 [8] y la nueva propuesta de norma de viento cubana basada en las formulaciones propuestas por la

norma italiana de viento [14], y el decremento logarítmico en el Eurocódigo EN 1991-1-4. La ISO 4345-2009 establece la Ecuación No. 1 para determinar la relación de amortiguamiento.

$$\xi = \xi_{str} + \xi_{aer} + \xi_{aux} \quad (1)$$

Donde:

ξ_{str} : es la razón de amortiguamiento estructural.

ξ_{aer} : es la razón de amortiguamiento aerodinámico.

ξ_{aux} : es la razón de amortiguamiento auxiliar.

La Tabla 1 proporciona valores aproximados de amortiguamiento estructural, generalmente conservadores, para el primer modo en edificios de hormigón armado.

Tabla 1. Valores aproximados del amortiguamiento estructural en la ISO 4345-2009

Tipo estructural		Material
		Hormigón
Edificios	h = 40 m	0,020
	h = 50 m	0,020
	h = 60 m	0,015
	h = 70 m	0,015
	h > 80 m	0,012

La razón de amortiguamiento aerodinámico está dada por la Ecuación No. 2:

$$\xi_{aer} = \left(\frac{\rho_{air} \cdot d^2}{m_1} \right) \left(\frac{V_{site.m}}{f_0 d} \right) C_{aer} \quad (2)$$

Donde:

ρ_{air} : es la densidad del aire. (kg/m³)

d : es la dimensión perpendicular a la dirección del viento. (m)

m_1 : es la masa por unidad de longitud. (kg/m)

$V_{site.m}$: es la velocidad del viento. (m/s)

f_0 : es la frecuencia natural. (Hz)

C_{aer} : es el coeficiente de amortiguamiento aerodinámico.

En el Eurocódigo se presenta la formulación para obtener el decremento logarítmico del amortiguamiento -según la Ecuación No. 3-. La relación de amortiguamiento equivalente se puede obtener dividiendo el decremento logarítmico del amortiguamiento por 2π .

$$\delta = \delta_s + \delta_a + \delta_d \quad (3)$$

Donde:

δ_s : es el amortiguamiento estructural expresado mediante el decremento logarítmico.

δ_a : es el decremento logarítmico del amortiguamiento aerodinámico para el modo fundamental.

δ_d : es el decremento logarítmico del amortiguamiento debido a dispositivos especiales.

En la Tabla 2 aparecen valores aproximados del decremento logarítmico empleado para hallar el amortiguamiento estructural.

Tabla 2. Valores aproximados del amortiguamiento estructural en el Eurocódigo EN 1991-1-4

Tipo estructural	δ_s
Edificios de hormigón armado	0,100
Edificios de acero	0,050
Estructura mixta hormigón + acero	0,080

La expresión dada en la Ecuación No. 4 determina el decremento logarítmico del amortiguamiento aerodinámico.

$$\delta_a = \frac{C_f \cdot \rho \cdot V_{m(ze)}}{2 \cdot n_1 \cdot \mu_e} \quad (4)$$

Donde:

C_f : es el coeficiente de fuerza por la acción del viento.

ρ : es la densidad del aire (su valor recomendado es 1.25 kg/m³).

$V_{m(ze)}$: es la velocidad media calculada a la altura de referencia. (m/s)

n_1 : es la frecuencia de oscilación /Hz) (1/T, siendo T el período).

μ_e : es la masa por unidad de longitud. (kg/m)

En la nueva propuesta de norma de viento cubana igualmente se plantea la Ecuación No. 5 para la razón de amortiguamiento del modo fundamental.

$$\xi = \xi_s + \xi_a + \xi_d \quad (5)$$

Donde:

ξ_s : es la razón de amortiguamiento estructural.

ξ_a : es la razón de amortiguamiento aerodinámico.

ξ_d : es la razón de amortiguamiento asociada a la presencia de dispositivos de amortiguamiento auxiliar.

Para estructuras ligeras (donde la longitud es mucho mayor que las dimensiones de la sección transversal), la razón de amortiguamiento aerodinámica para el primer modo de vibración en la dirección longitudinal del viento está dada por la Ecuación No. 6. Esta expresión no puede generalizarse

en ningún caso para las vibraciones laterales o torsionales, se necesitaría recurrir a fuentes especializadas o datos experimentales.

$$\xi_a = \frac{C_f \cdot \rho \cdot b \cdot U_{m(z_D)}}{4\pi \cdot n_1 \cdot m_{e,1}} \quad (6)$$

Donde:

C_f : es el coeficiente de fuerza.

ρ : es la densidad del aire asumida como 1,184 kg/m³ para 25°C de temperatura.

b : es el ancho de la estructura (dimensión perpendicular a la dirección del viento).

$U_{m(z_D)}$: es la velocidad media calculada a la altura de referencia. (m/s)

n_1 : es la frecuencia de oscilación (Hz) (1/T, siendo T el período).

$m_{e,1}$: es la masa equivalente por unidad de longitud. (kg/m)

La nueva propuesta establece formas aproximadas de calcular el amortiguamiento estructural para los primeros modos o el modo fundamental, basadas en la norma italiana [14]. Para pequeñas oscilaciones, la razón de amortiguamiento estructural para el primer modo flector del edificio puede ser tomada, de forma aproximada, como una función lineal creciente dependiente de la frecuencia fundamental. Sin embargo, varios resultados experimentales muestran que la razón de amortiguamiento tiende a incrementarse con la amplitud de las oscilaciones. Con el objetivo de considerar valores del lado de la seguridad se recomienda emplear la Ecuación No. 7 para el modo fundamental.

$$\xi_{s,1} = \frac{1}{100} \frac{68}{h} \geq 0.01 \text{ para edificios de hormigón armado con } h \geq 30m \quad (7)$$

El amortiguamiento auxiliar debe ser calculado, en caso necesario, teniendo métodos teóricos, numéricos o experimentales precisos.

Descripción de las edificaciones objetos de estudio y cálculo de las razones de amortiguamiento

Las edificaciones de hormigón armado presentan alturas de 66 m, 99 m y 152 m. En las Figuras 1-3 se observan modelos en 3D, el sistema de ejes de referencia, las direcciones del viento y dimensiones en planta de cada una.

La primera edificación de estudio tiene 66 m de altura con dimensiones en planta de 58x40 m aproximadamente. El espesor de la losa es 0,15 m; los tímpanos tienen un ancho de 0,30 m; las vigas son de 0,30x0,70 m y las columnas de 0,85x0,50 m. El sistema estructural del edificio para resistir las cargas laterales está caracterizado por la presencia de tímpanos. Las condiciones de apoyo de las columnas y tímpanos son empotradas en la base. Las uniones viga-columna con tímpanos son articuladas.

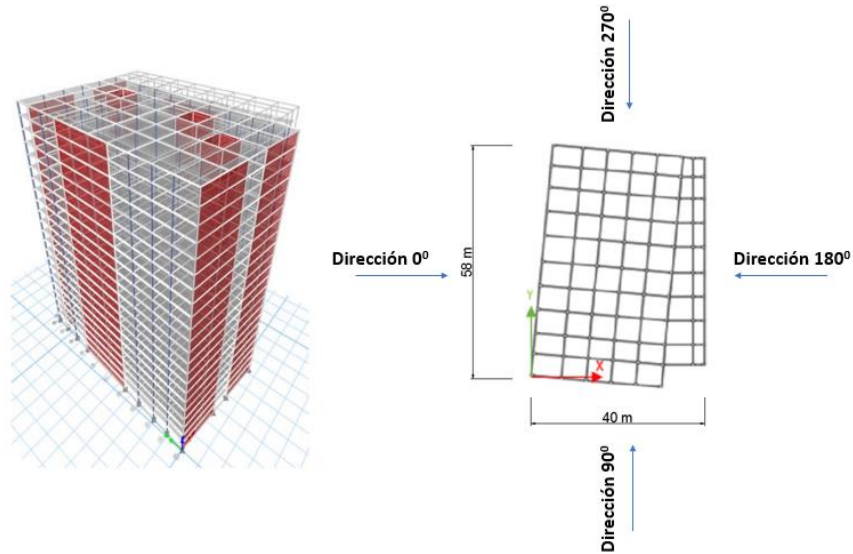


Fig.1 Vista 3D modelada en ETABS del edificio de 66 m, dimensiones, sistema de referencia y direcciones del viento analizadas

El edificio con altura total de 99 m es de hormigón armado y postesado en general. Está formado por columnas perimetrales y vigas de hormigón armado. Las dimensiones propuestas para las columnas son 0,60x0,70 m; 0,60x0,80 m y 0,60x0,90 m. El peralte de las vigas varía entre 300, 350 y 400 mm. Las losas de entrepiso en la torre son de hormigón postesado, sin vigas, con espesores entre 0,26 y 0,30 m. El núcleo central es de tímpanos continuos armados in situ para resistir las cargas laterales. Presenta muros divisorios de bloque y sus uniones entre elementos son continuas. Las columnas fueron modeladas con uniones empotradas.



Fig.2 Vista frontal del edificio de 99 m; dimensiones, sistema de referencia y direcciones del viento analizadas

La estructura de 152 m está compuesta de forjados de losa de hormigón armado in situ, sin vigas, apoyados sobre columnas, también fundidas en obra. Los espesores de losa varían en un rango de 0,18 a 0,32m. La estabilidad horizontal está asegurada por dos núcleos compuestos por huecos de ascensores y escaleras mecánicas ubicados en los extremos laterales de cada piso, la transmisión de cargas verticales está asegurada por columnas de hormigón armado que descienden hasta los cimientos. El ancho de los tímpanos varía entre 0,20 y 0,80m. Algunas de las dimensiones de las columnas son: 0,35x0,35 m; 0,40x1,00 m; 0,50x1,60 m; 0,80x2,00 m; 2,40x2,40 m. Algunas de las dimensiones de las vigas son: 0,30x0,50 m; 0,35x0,75 m; 0,40x1,00 m 0,55x0,80 m; 0,60x1,70 m.

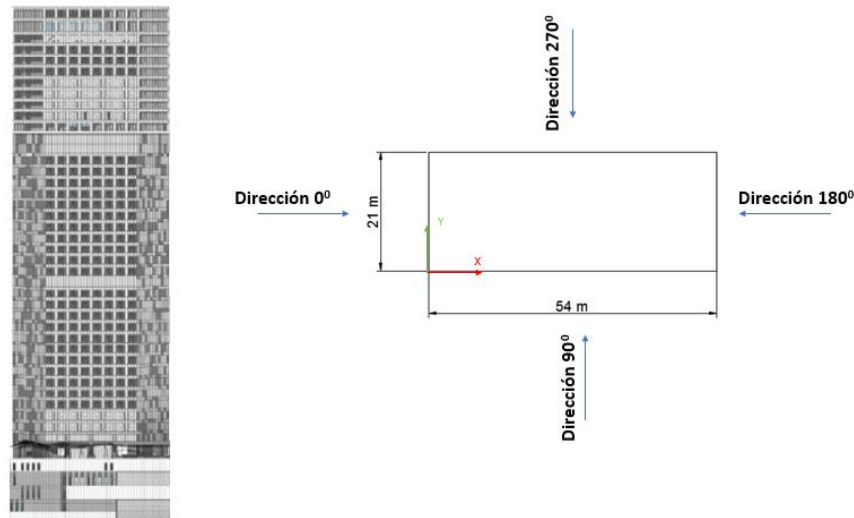


Fig.3 Vista frontal del edificio de 152; dimensiones, sistema de referencia y direcciones del viento analizadas

Los valores de frecuencias naturales de traslación para el primer modo de oscilación en cada uno de los ejes y las frecuencias torsionales para las edificaciones se muestran en la Tabla 3 al igual que los períodos de oscilación, estos valores fueron extraídos de los modelos respectivos en ETABS luego de realizado el análisis modal a través del método de valores y vectores propios.

Tabla 3. Períodos y frecuencias naturales de traslación y torsionales para el primer modo de oscilación en cada uno de los ejes

Edificios	Tipo de modo y dirección	Período (s)	Frecuencia (Hz)
66m	1er Flector (x)	2,249	0,445
	1er Flector (y)	1,992	0,502
	Torsor	1,427	0,701
99,08 m	1er Flector (x)	2,850	0,351
	1er Flector (y)	2,710	0,369
	Torsor	1,870	0,535
151,92 m	1er Flector (x)	3,910	0,256
	1er Flector (y)	2,680	0,373
	Torsor	1,420	0,704

En la Tabla 4 se muestran los coeficientes necesarios para obtener la razón de amortiguamiento mediante la nueva propuesta de norma cubana de viento, así como los resultados en los diferentes edificios de estudio para el posterior análisis de las fuerzas de viento y aceleraciones inducidas.

Como se plantea en el epígrafe anterior, el cálculo de la razón de amortiguamiento en esta norma se realiza por la Ecuación No. 5. Se determina primeramente el amortiguamiento estructural por la Ecuación No. 7 ya que los tres edificios analizados son de hormigón armado y superan los 30 m de altura. La razón de amortiguamiento aerodinámico se determina mediante la Ecuación No. 6. No existe dispositivo de amortiguamiento auxiliar por tanto ese valor se anula.

Tabla 4. Cálculo de los valores de razón de amortiguamiento mediante la norma italiana.

Edificio de 66 m	Edificio de 99 m	Edificio de 152 m
$\xi_s = \frac{1}{100} \cdot \frac{68}{66} = 0,010$	$\xi_s = \frac{1}{100} \cdot \frac{68}{99} = 0,007$	$\xi_s = \frac{1}{100} \cdot \frac{68}{152} = 0,004$
Dirección 0° y 180°	Dirección 0° y 180°	Dirección 0° y 180°
$\frac{d}{b} = \frac{58}{40} = 1,450 \rightarrow C_f = 1,90$	$\frac{d}{b} = \frac{41,4}{39,2} = 1,056 \rightarrow C_f = 2,09$	$\frac{d}{b} = \frac{21}{54} = 0,39 \rightarrow C_f = 2,20$
$n = 0,445 \text{ Hz}$ $m_{e,i} = 2242092,03$ $U_{m(ZD)} = 34,65 \text{ m/s}$	$n = 0,369 \text{ Hz}$ $m_{e,i} = 1414308,21$ $U_{m(ZD)} = 50,82 \text{ m/s}$	$n = 0,256 \text{ Hz}$ $m_{e,i} = 1900979,83$ $U_{m(ZD)} = 40,92 \text{ m/s}$
$\xi_a = \frac{1,90 \cdot 1,184 \cdot 40 \cdot 34,65}{4\pi \cdot 0,445 \cdot 2242092,03} = 0,0002$	$\xi_a = \frac{2,09 \cdot 1,184 \cdot 39,2 \cdot 50,82}{4\pi \cdot 0,369 \cdot 1414308,21} = 0,0008$	$\xi_a = \frac{2,20 \cdot 1,184 \cdot 54 \cdot 40,92}{4\pi \cdot 0,256 \cdot 1900979,83} = 0,0009$
$\xi = 0,01 + 0,0002 = 0,010$	$\xi = 0,007 + 0,0008 = 0,008$	$\xi = 0,004 + 0,0009 = 0,005$
Dirección 90° y 270°	Dirección 90° y 270°	Dirección 90° y 270°
$\frac{d}{b} = \frac{40}{58} = 0,690 \rightarrow C_f = 2,38$ $n = 0,502 \text{ Hz}$	$\frac{d}{b} = \frac{39,2}{41,4} = 0,947 \rightarrow C_f = 2,15$ $n = 0,351 \text{ Hz}$	$\frac{d}{b} = \frac{54}{21} = 2,57 \rightarrow C_f = 1,52$ $n = 0,373 \text{ Hz}$
$\xi_a = \frac{2,38 \cdot 1,184 \cdot 58 \cdot 34,65}{4\pi \cdot 0,502 \cdot 2242092,03} = 0,0004$	$\xi_a = \frac{2,15 \cdot 1,184 \cdot 41,4 \cdot 50,82}{4\pi \cdot 0,351 \cdot 1414308,21} = 0,0009$	$\xi_a = \frac{1,52 \cdot 1,184 \cdot 21 \cdot 40,92}{4\pi \cdot 0,373 \cdot 1900979,83} = 0,0002$
$\xi = 0,01 + 0,0004 = 0,010$	$\xi = 0,007 + 0,0009 = 0,008$ $\approx 0,010$	$\xi = 0,004 + 0,0002 = 0,004$ $\approx 0,010$

La norma ISO propone los valores de la Tabla 1 para determinar el amortiguamiento estructural en función de la altura y material de la edificación, para el edificio de 66m es 0,015 y para los de 99 m y 152 m es 0,012. En la Tabla 5 aparecen los resultados de la razón de amortiguamiento aplicando las Ecuaciones 1 y 2. El coeficiente aerodinámico necesario para el cálculo del amortiguamiento aerodinámico está en función de la geometría y la velocidad reducida del viento $V_{site, m}/(f_0 \cdot d)$; si esta relación es mayor que 10 entonces toma valores en un rango aproximado de $\pm 0,5$. Como en los casos analizados la relación es menor que 10 se calcula como $C_D/4\pi$, siendo C_D el coeficiente de forma. El amortiguamiento auxiliar se considera igual a cero por la ausencia de dispositivos auxiliares.

Tabla 5. Cálculo de los valores de razón de amortiguamiento mediante la norma ISO

Edificio de 66 m	Edificio de 99 m	Edificio de 152 m
Dirección 0° y 180°	Dirección 0° y 180°	Dirección 0° y 180°
$d = 58 \text{ m}$	$d = 41,4 \text{ m}$	$d = 21 \text{ m}$
$f_0 = 0,445 \text{ Hz}$	$f_0 = 0,369 \text{ Hz}$	$f_0 = 0,256 \text{ Hz}$
$m_1 = 2242092,03$	$m_1 = 1414308,21$	$m_1 = 1900979,83$
$V_{site.m} = 34,65 \text{ m/s}$	$V_{site.m} = 50,82 \text{ m/s}$	$V_{site.m} = 40,92 \text{ m/s}$
$C_{aer} = \frac{1,33}{4\pi} = 0,11$	$C_{aer} = \frac{1,37}{4\pi} = 0,11$	$C_{aer} = \frac{1,37}{4\pi} = 0,11$
$\xi_{aer} = \left(\frac{1,184 \cdot 58^2}{2242092,03} \right) \left(\frac{34,65}{0,445 \cdot 58} \right) 0,11 = 0,0003$	$\xi_{aer} = \left(\frac{1,184 \cdot 41,4^2}{1414308,21} \right) \left(\frac{50,82}{0,369 \cdot 41,4} \right) 0,11 = 0,0005$	$\xi_{aer} = \left(\frac{1,184 \cdot 21^2}{1900979,83} \right) \left(\frac{40,92}{0,256 \cdot 21} \right) 0,11 = 0,0002$
$\xi = 0,015 + 0,0003 = 0,015$	$\xi = 0,012 + 0,0004 = 0,013$	$\xi = 0,012 + 0,0002 = 0,012$
Dirección 90° y 270°	Dirección 90° y 270°	Dirección 90° y 270°
$d = 40 \text{ m}$	$d = 39,2 \text{ m}$	$d = 54 \text{ m}$
$f_0 = 0,502 \text{ Hz}$	$f_0 = 0,351 \text{ Hz}$	$f_0 = 0,373 \text{ Hz}$
$C_{aer} = \frac{1,31}{4\pi} = 0,10$	$C_{aer} = \frac{1,38}{4\pi} = 0,11$	$C_{aer} = \frac{1,42}{4\pi} = 0,11$
$\xi_{aer} = \left(\frac{1,184 \cdot 40^2}{2242092,03} \right) \left(\frac{34,65}{0,502 \cdot 40} \right) 0,10 = 0,0001$	$\xi_{aer} = \left(\frac{1,184 \cdot 39,2^2}{1414308,21} \right) \left(\frac{50,82}{0,351 \cdot 39,2} \right) 0,11 = 0,0005$	$\xi_{aer} = \left(\frac{1,184 \cdot 54^2}{1900979,83} \right) \left(\frac{40,92}{0,373 \cdot 54} \right) 0,11 = 0,0004$
$\xi = 0,015 + 0,0001 = 0,015$	$\xi = 0,012 + 0,0004 = 0,013$	$\xi = 0,012 + 0,0004 = 0,012$

En la Tabla 6 se plantean los coeficientes necesarios para la obtención del decremento logarítmico en el Eurocódigo y posteriormente se determina la razón de amortiguamiento equivalente. El valor mínimo de amortiguamiento es 0,01. El decremento estructural según la Tabla 2 es 0,10 para todos los edificios de estudio por ser de hormigón armado. El decremento del amortiguamiento auxiliar tiene valor cero porque al igual que en los casos anteriores no existen dispositivos auxiliares.

Los valores obtenidos para la razón de amortiguamiento mediante la norma italiana, la ISO y el Eurocódigo se encuentran en un rango entre 0,010 y 0,015 por tanto el cálculo de las fuerzas del viento y aceleraciones inducidas se realiza con valores de razón igual a 1% y 1,5% en los diferentes edificios de estudio para comparar y observar la influencia de esta variación en los resultados.

Cálculo de las fuerzas de viento

Las tres edificaciones se encuentran ubicadas en La Habana por tanto la velocidad básica es de 33 m/s en un intervalo de promediación de 10 minutos. Para un período de retorno de 50 años el coeficiente de recurrencia es 1. Son categoría IV por encontrarse en terreno urbano, por lo que la longitud de rugosidad es 0,3m. El factor pico de la velocidad del viento es $g=3,5$. La densidad del aire es asumida, para 25°C de temperatura, como 1,184 kg/m³. La velocidad media para la determinación de las aceleraciones fue considerada igual a 11m/s medida a 10 m de altura, sobre un terreno llano y abierto para un período de

retorno de 1 año indistintamente de la región donde se encuentre la estructura. Las direcciones de viento analizadas para cada edificación de muestran en las Figuras 1-3.

Tabla 6. Cálculo de los valores de razón de amortiguamiento mediante el Eurocódigo

Edificio de 66 m	Edificio de 99 m	Edificio de 152 m
Dirección 0° y 180°	Dirección 0° y 180°	Dirección 0° y 180°
$C_f = 2,38$ $n_1 = 0,445 \text{ Hz}$ $\mu_e = 2242092,03$ $V_{m(ze)} = 34,65 \text{ m/s}$	$C_f = 2,15$ $n_1 = 0,369 \text{ Hz}$ $\mu_e = 1414308,21$ $V_{m(ze)} = 50,82 \text{ m/s}$	$C_f = 1,52$ $n_1 = 0,256 \text{ Hz}$ $\mu_e = 1900979,83$ $V_{m(ze)} = 40,92 \text{ m/s}$
$\delta_a = \frac{2,38 \cdot 1,25 \cdot 34,65}{2 \cdot 0,445 \cdot 2242092,03}$ $= 0,00005$ $\delta = 0,1 + 0,00005 = 0,10$	$\delta_a = \frac{2,15 \cdot 1,25 \cdot 50,82}{2 \cdot 0,369 \cdot 1414308,21}$ $= 0,00005$ $\delta = 0,1 + 0,00005 = 0,10$	$\delta_a = \frac{1,52 \cdot 1,25 \cdot 40,92}{2 \cdot 0,256 \cdot 1900979,83}$ $= 0,00008$ $\delta = 0,1 + 0,00008 = 0,10$
$\xi = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0,1}{2\pi} = 0,01$	$\xi = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0,1}{2\pi} = 0,01$	$\xi = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0,1}{2\pi} = 0,01$
Dirección 90° y 270°	Dirección 90° y 270°	Dirección 90° y 270°
$C_f = 1,90$ $n_1 = 0,502 \text{ Hz}$	$C_f = 2,09$ $n_1 = 0,351 \text{ Hz}$	$C_f = 2,20$ $n_1 = 0,373 \text{ Hz}$
$\delta_a = \frac{1,90 \cdot 1,25 \cdot 34,65}{2 \cdot 0,502 \cdot 2242092,03}$ $= 0,00004$ $\delta = 0,1 + 0,00004 = 0,10$	$\delta_a = \frac{2,09 \cdot 1,25 \cdot 50,82}{2 \cdot 0,351 \cdot 1414308,21}$ $= 0,0001$ $\delta = 0,1 + 0,0001 = 0,10$	$\delta_a = \frac{2,20 \cdot 1,25 \cdot 40,92}{2 \cdot 0,373 \cdot 1900979,83}$ $= 0,00008$ $\delta = 0,1 + 0,00008 = 0,10$
$\xi = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0,1}{2\pi} = 0,01$	$\xi = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0,1}{2\pi} = 0,01$	$\xi = \frac{\delta}{2\pi} = \frac{0,1}{2\pi} = 0,01$

La Ecuación No. 8 se utiliza en la nueva propuesta para determinar las fuerzas de viento longitudinales, la Ecuación No. 9 y Ecuación No. 10 para las fuerzas transversales y torsionales respectivamente.

$$F_{V(ze)} = q_{p(ze)} \cdot C_f \cdot C_{DL} \cdot A = q_{10} \cdot C_t \cdot C_h \cdot C_r \cdot C_f \cdot C_{DL} \cdot A \quad (8)$$

Donde:

$F_{V(ze)}$: es la fuerza de viento longitudinal. (kN)

$q_{p(ze)}$: es la presión pico. (N/m²)

q_{10} : es la presión básica del viento (N/m²)

C_t : es el coeficiente de recurrencia.

C_h : es el coeficiente de altura.

C_r : es el coeficiente de ráfaga.

C_f : es el coeficiente de forma.

C_{DL} : es el coeficiente dinámico.

A : es el área tributaria. (m²)

$$F_{T(z)} = 3q_{p(h)} C_T A \left(\frac{z}{h}\right)^k C_{DT} \quad (9)$$

Donde:

$F_{T(z)}$: es la fuerza de viento transversal. (kN)

$q_{p(h)}$: es la presión pico de viento calculada a la altura máxima. (N/m²)

C_T : es el coeficiente de fuerza aerodinámica.

C_{DT} : es el coeficiente dinámico transversal.

$$F_{M(z)} = 1,8q_{p(h)} C_M A b \left(\frac{z}{h}\right)^k C_{DM} \quad (10)$$

Donde:

$F_{M(z)}$: es la fuerza de viento torsional. (kN/m)

$q_{p(h)}$: es la presión pico de viento calculada a la altura máxima. (N/m²)

C_M : es el coeficiente de fuerza aerodinámica.

C_{DM} : es el coeficiente dinámico torsional.

En cuanto a las acciones estáticas equivalentes transversales y torsionales del viento en la estructura es necesario precisar que las componentes transversal y torsional se tienen en cuenta si: $\frac{h}{\sqrt{bd}} \geq 3$, donde b es el ancho de la edificación (perpendicular a la dirección de viento), d es la profundidad de la edificación (paralela a la dirección del viento) y h es la altura de la edificación. En las edificaciones analizadas, esta relación solo se cumple para el edificio de 152 m; se calculan las fuerzas transversales y torsionales en todos los casos como ejemplo demostrativo. Existen otros requerimientos en cuanto a las dimensiones de las edificaciones que deben cumplirse para aplicar el procedimiento de carga estática equivalente transversal y torsional; estos se presentan en las ecuaciones 11-13.

$$\frac{h}{\sqrt{bd}} \leq 6 \quad (11)$$

$$0,2 \leq \frac{d}{b} \leq 5 \quad (12)$$

$$\frac{U_{m(h)}}{n_{TM} \sqrt{bd}} \leq 10 \quad (13)$$

La Tabla 7 muestran a modo de ejemplo los valores de los coeficientes y parámetros para determinar las fuerzas de viento en la altura tope de la edificación para cada una de las componentes de la respuesta.

Tabla 7. Coeficientes para determinar fuerzas de viento en los edificios de estudio a la altura máxima

Coeficientes	Edificio de 66 m				Edificio de 99 m				Edificio de 152 m			
	1%		1,5%		1%		1,5%		1%		1,5%	
	0	90	180	270	0	90	180	270	0	90	180	270
Fuerza Longitudinal												
q_{10}	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660	0,660
C_t	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
C_h	1,340	1,340	1,340	1,340	1,580	1,580	1,580	1,580	1,840	1,840	1,840	1,840
C_r	2,131	2,131	2,131	2,131	2,020	2,020	2,020	2,020	1,920	1,920	1,920	1,920
C_f	1,330	1,310	1,330	1,310	1,330	1,310	1,330	1,310	1,330	1,310	1,330	1,310
C_{DL}	1,005	1,019	0,954	0,992	1,071	1,096	1,009	1,029	1,210	0,983	1,122	0,947
Fuerza transversal												
$q_{p(h)}$	1,890	1,890	1,890	1,890	2,110	2,110	2,110	2,110	2,370	2,370	2,370	2,370
C_T	1,121	0,195	1,121	0,195	0,152	0,163	0,152	0,163	0,236	0,075	0,236	0,075
C_{DT}	2,160	2,412	2,008	2,188	3,026	2,965	2,660	2,615	4,591	5,386	3,891	4,512
Fuerza torsional												
C_M	0,035	0,078	0,035	0,078	0,047	0,053	0,047	0,053	0,173	0,025	0,173	0,025
C_{DM}	2,036	1,913	1,933	1,848	2,694	2,699	2,424	2,428	2,510	2,510	2,324	2,393

3. Resultados y Discusión

Fuerzas de viento

Lo valores de cortante basal, es decir, la fuerza resultante en la base producto de la suma de todas las fuerzas horizontales de viento en las cuatro direcciones de viento, y el momento mediante la suma de todos los momentos torsores en cada nivel se muestran en la Tabla 8 para una razón de amortiguamiento de 1% y en la Tabla 9 para una razón de 1,5%.

Tabla 8. Fuerzas de viento en las edificaciones para una razón de 1%

Edificios	C. longitudinal				C. transversal				C. torsional			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
66 m	8901,79	5127,48	8488,70	5524,98	2387,02	2968,11	2387,02	2968,11	22899,79	22701,64	22899,79	22701,64
99 m	12386,36	12093,20	11564,47	12093,20	5943,32	5919,99	5943,32	5919,99	41068,70	41528,74	41068,70	41528,74
152 m	8490,96	38860,32	8490,96	38908,03	9820,81	9465,46	9820,81	9465,46	49351,27	19049,88	49351,27	19049,88

Tabla 9. Fuerzas de viento en las edificaciones para una razón de 1,5%

Edificios	C. longitudinal				C. transversal				C. torsional			
	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°	0°	90°	180°	270°
66 m	8445,42	4862,41	8049,87	5244,22	2219,99	2691,88	2219,99	2691,88	21743,25	21923,74	21743,25	21923,74
99 m	11678,04	11350,03	10903,16	11350,03	5223,67	5221,23	5223,67	5221,23	36954,33	37354,67	36954,33	37354,67
152 m	7874,80	37436,25	7874,80	37488,13	8323,15	7929,62	8323,15	7929,62	45700,09	17499,31	45700,09	17499,31

Los resultados muestran que al modificar la razón de amortiguamiento son mayores las fuerzas resultantes calculadas con el menor valor de amortiguamiento (0,010), estos resultados son lógicos ya que los menores valores de amortiguamiento implican mayor flexibilidad en la estructura y por tanto es

más sensible a las acciones dinámicas de la carga de viento. Los diferentes valores propuestos de amortiguamiento representan variaciones en las fuerzas resultantes en la base de las edificaciones, en futuros estudios se debe investigar si estas diferencias implican modificaciones en los diseños estructurales de los elementos.

En los edificios analizados el incremento porcentual entre las fuerzas de viento fue similar. El análisis fue realizado para los valores máximos de fuerzas de viento entre todas las direcciones analizadas. En la componente longitudinal es de 5,40 % para el caso del edificio de 66 m; para el de 99 m un 6,07 % y para el de 152 m un 3,79 %. En la componente transversal para el edificio de 66 m es de 10,26 %; para el de 99m es 13,78 % y para el de 152 m es 17,99 %. En la torsional es 5,32 %; 11,17 % y 7,99 % respectivamente. Este análisis se puede consultar gráficamente en las Figuras 4-6 en las tres componentes.

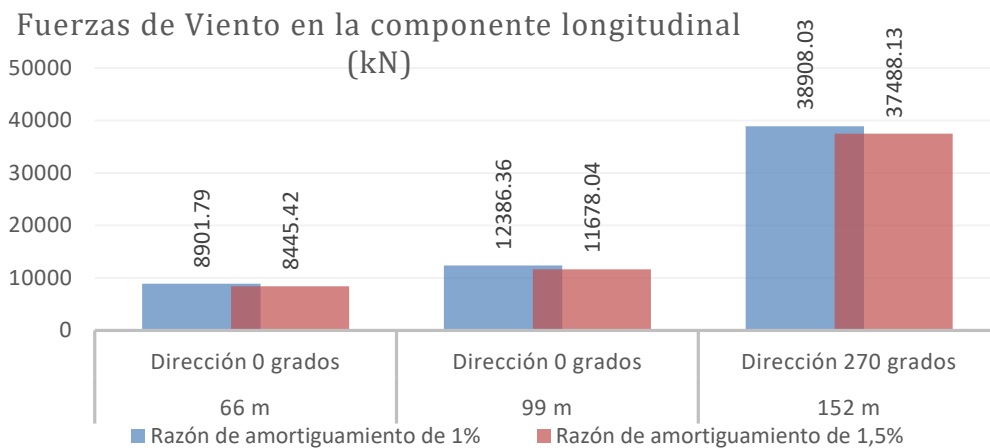


Fig.4 Valores de las fuerzas de viento máximas en kN de las tres edificaciones analizadas en la componente longitudinal

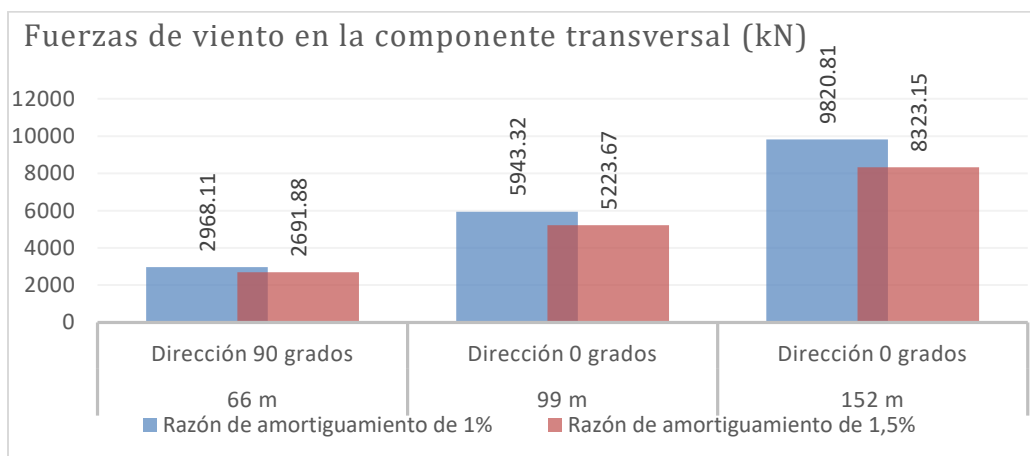


Fig.5 Valores de las fuerzas de viento máximas en kN de las tres edificaciones analizadas en la componente transversal

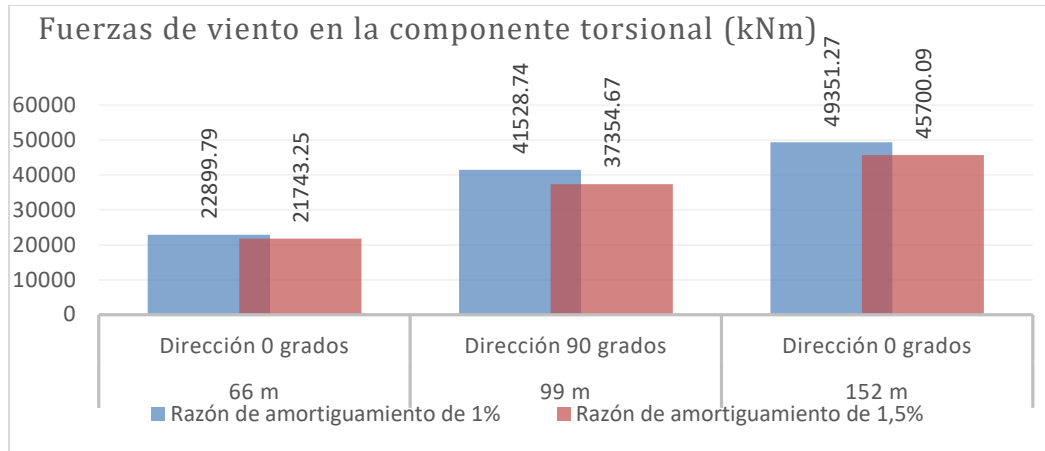


Fig.6 Valores de las fuerzas de viento máximas en kN·m de las tres edificaciones analizadas en la componente torsional.

Aceleraciones

En la Tabla 10 se muestran los valores de aceleraciones permisibles brindados en la nueva propuesta de norma. Todos los valores calculados de aceleraciones cumplen con las permisibles. En las Figuras 8-10 se observan las aceleraciones máximas determinadas en las tres componentes para los valores de razón de amortiguamiento utilizados en las diferentes direcciones de viento analizadas.

Las aceleraciones se verifican teniendo en cuenta los límites permisibles que se muestran a continuación.

Para garantizar los criterios de servicio de las edificaciones, cada valor de aceleración pico en el sentido longitudinal y transversal en el centro de giro, a_{pL} y a_{pT} , no deben exceder los valores límites dados por la Ecuación No. 14.

$$a_{lim} = \begin{cases} \frac{a_0}{(n_0)^{0.56}} & \text{para } n_0 < 1Hz \\ a_0 & \text{para } 1Hz \leq n_0 \leq 2Hz \\ 0,5a_0n_0 & \text{para } n_0 \geq 2Hz \end{cases} \quad (14)$$

$a_0 = 6 \text{ cm/s}^2$ para edificios de oficina

$a_0 = 4 \text{ cm/s}^2$ para edificios de apartamentos

n_0 : frecuencia dominante en Hz (en dependencia del sentido que se esté evaluando será igual a la frecuencia fundamental longitudinal f_L o transversal f_T).

Tabla 10. Valores de las aceleraciones permisibles para los edificios de análisis

Componentes	Longitudinal			Transversal			Torsional		
Edificios	66m	99m	152m	66m	99m	152m	66m	99m	152m
Aceleraciones permisibles	6,30 cm/s ²	7,19 cm/s ²	8,58 cm/s ²	5,88 cm/s ²	6,99 cm/s ²	6,94 cm/s ²	4,88 rad/s ²	5,68 rad/s ²	4,87 rad/s ²

Los mayores valores de aceleraciones en las tres edificaciones se obtienen cuando se calculan en la componente transversal para una razón de amortiguamiento de 1%. Analizando estos datos, de forma similar a las fuerzas resultantes de viento, no existe una variación importante del incremento porcentual de las aceleraciones entre las diferentes edificaciones. Cuando la razón de amortiguamiento aumenta, los valores de aceleración disminuyen. En el edificio de 66 m el incremento es de 22,15 %, en el de 99 m es 28,32 %; y en el de 152 m de 22,45 % en el sentido longitudinal. En la componente transversal para el primer edificio es 22,70 %; para el segundo es 22,59% y para el tercero es 22,40 %. En la torsional es 20 %; 25 % y 20 % respectivamente. Este análisis se puede consultar gráficamente en las Figuras 7-9.

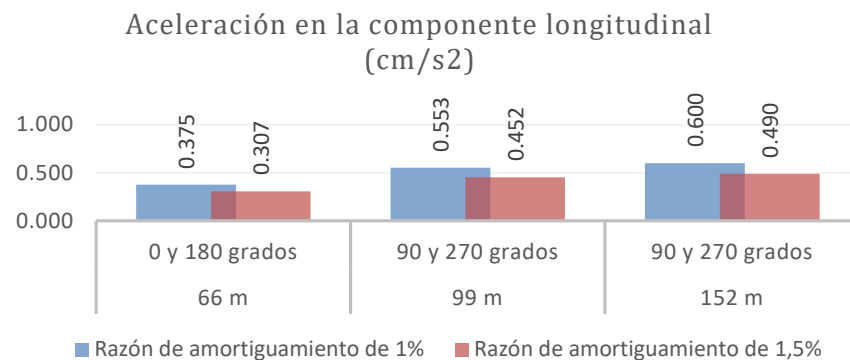


Fig.7 Valores de las aceleraciones máximas en cm/s² de las tres edificaciones analizadas en la componente longitudinal

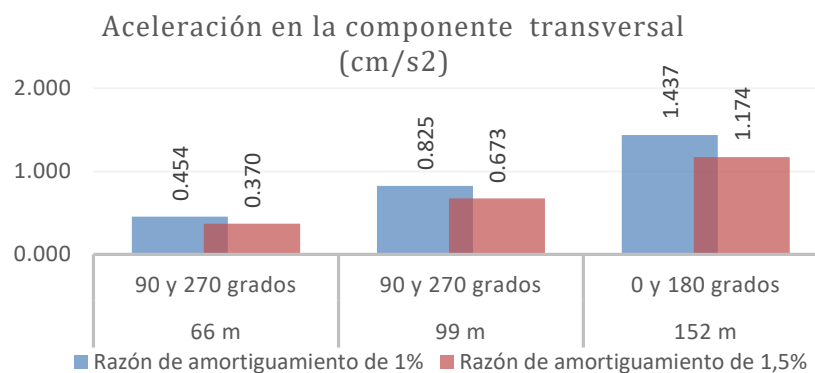


Fig.8 Valores de las aceleraciones máximas en cm/s^2 de las tres edificaciones analizadas en la componente transversales

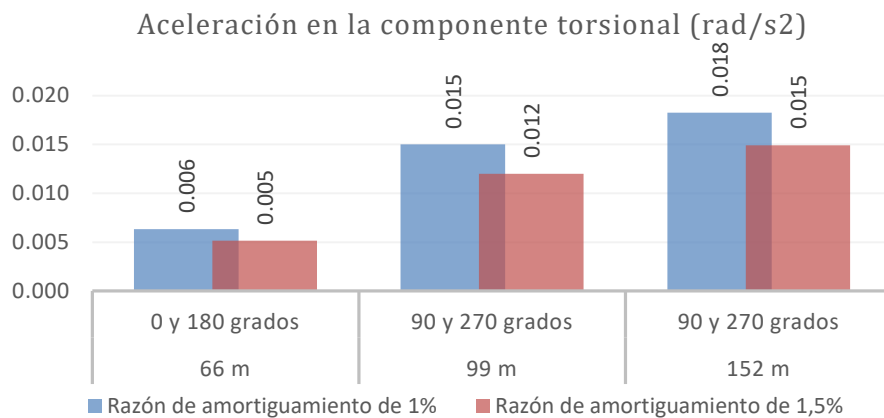


Fig.9 Valores de las aceleraciones máximas en rad/s^2 de las tres edificaciones analizadas en la componente transversales

4. Conclusiones

En este trabajo se determinaron las fuerzas de viento resultantes en la base y las aceleraciones máximas inducidas por el viento en las cuatro direcciones para las componentes longitudinal, transversal y torsional de tres edificaciones de diferentes alturas y dimensiones en planta para dos valores de amortiguamiento estructural. Los resultados arrojaron que, al modificar la razón de amortiguamiento, son mayores los valores de reacciones en la base debido a las fuerzas de viento y las aceleraciones calculadas con el menor valor de amortiguamiento (1%). En la comparación modificando la relación de amortiguamiento, las diferencias entre las fuerzas de viento fueron aproximadamente 9%. De igual forma en la comparación de las aceleraciones máximas la diferencia es 22%. En la determinación de las fuerzas de viento en futuros trabajos debe ser chequeado si estas diferencias implican modificaciones en los diseños estructurales de los elementos del edificio, en el caso de las aceleraciones las diferencias no fueron significativas y todos los valores obtenidos son menores que las aceleraciones permisibles.

Referencias

1. Castro, H.G., et al., *Una metodología de cálculo para la determinación de la respuesta dinámica longitudinal de estructuras altas bajo la acción del viento*. Revista internacional de Métodos Numéricos para cálculo y diseño en Ingeniería, 2015. **31**(4): p. 235-245.
2. Longarini, N., et al., *Structural improvements for tall buildings under wind loads: comparative study*. Shock and Vibration, 2017. **2017**.
3. Ballate Delgado, A., I. Fernández Lorenzo, and P. Martín Rodríguez, *Análisis dinámico de edificios altos bajo carga de viento*. Simposio Internacional de Construcciones Universidad Central "Martha Abreu" de Las Villas., 2021.
4. Ballate Delgado, A., P. Martín Rodríguez, and I. Fernández Lorenzo, *Influencia de la geometría de edificaciones en la determinación de aceleraciones inducidas por el viento*. Revista de Arquitectura e

- Ingeniería, 2020. **14**(3).
5. Kijewski, T., F. Hann, and A. Kareem, *WIND-INDUCED VIBRATIONS*, in *Encyclopedia of Vibration*, S. Braun, Editor. 2001, Elsevier: Oxford. p. 1578-1587.
 6. NBCC, *National Research Council of Canada, National Building Code of Canada, Volume 2*. 2010.
 7. NZS1170.5, *Structural design actions. Part 5: earthquake actions-New Zealand. Standards New Zealand*. 2004.
 8. ISO-4354, *Wind action on structures. International Organization for Standardization*,. 2009: Switzerland.
 9. EN1991-1-4, *Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions*. 2004.
 10. Ballate Delgado, A., I. Fernández Lorenzo, and P. Martín Rodríguez, *Cálculo de las aceleraciones inducidas por el viento en edificios altos en Cuba*. Revista Ciencia y Construcción, 2021. **2**(2): p. 23-32.
 11. NC-285, *Carga de viento. Método de cálculo*. 2003 Oficina Nacional de Normalización: La Habana, Cuba.
 12. Ha, T., S.-H. Shin, and H. Kim, *Damping and Natural Period Evaluation of Tall RC Buildings Using Full-Scale Data in Korea*. Applied Science, 2020. **10**(5): p. 1568.
 13. Al-Balhawi, A. and B. ZHANG. *Acceleration responses for tall reinforced concrete office buildings under wind loading*. in *6th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 6)*. 2018.
 14. CNR-DT207, *Guide for the assessment of wind actions and effects on structures. National Research Council of Italy, Roma* 2008.
 15. Lago, A., D. Trabucco, and A. Wood, *Chapter 3 - Damping considerations in tall buildings*, in *Damping Technologies for Tall Buildings*. Butterworth-Heinemann, 2019: p. 39-106.
 16. Mimura, T. and A. Mita, *Automatic Estimation of Natural Frequencies and Damping Ratios of Building Structures*. Procedia Engineering, 2017: p. 163-169
 17. Laventure, S., *Identification of Aerodynamic Damping for Flexible Structures using Wind-induced Response*, Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master of Engineering Science degree in Civil and Environmental Engineering, The University of Western Ontario. 2020.