**SIMPOSIO INTERNACIONAL DE CONSTRUCCIONES**

**Análisis dinámico de edificios altos bajo carga de viento.**

***Dynamic analysis of tall buildings under wind load.***

**Patricia Martín Rodríguez1, Amaya Ballate Delgado2, Ingrid Fernández Lorenzo3**

1- Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba. E-mail: patriciamr@civil.cujae.edu.cu

2- Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba. E-mail: amayaballated@civil.cujae.edu.cu

3- Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cuba. E-mail: ingridfl@civil.cujae.edu.cu

**Resumen:** Actualmente se diseñan edificios cada vez más altos, ligeros y esbeltos, características que los hacen muy susceptibles a las cargas de viento. Varias normativas internacionales contemplan como método de análisis de estructuras bajo cargas de viento el *Factor de efecto de ráfaga* (FER); este difiere del propuesto por la NC 285: 2003. Se propone sustituir el método de la NC 285 para el cálculo de la componente dinámica por el método FER para la consideración de las acciones dinámicas debido a la turbulencia atmosférica, así como la consideración de las componentes transversal y torsional y sus combinaciones. La norma vigente se compara con la propuesta de actualización según los parámetros del viento, el método estático equivalente utilizado, los valores de reacciones en la base y los desplazamientos máximos considerando como objeto de estudio un edificio alto de 100 m de altura. Además, se presenta un procedimiento de cálculo de las aceleraciones. Los criterios de aceleraciones límites indican a través de ecuaciones los valores límites que no deben ser excedidos. Los resultados muestran que la aceleración máxima transversal rige el estado de servicio para los estudios de confort del edificio analizado y los valores de desplazamientos máximos son mayores para la nueva propuesta de la norma.

***Abstract:*** Nowadays, buildings are increasingly designed to be taller, lighter and slender, characteristics that make them very susceptible to wind loads. Several international standards consider the Gust Effect Factor (GEF) as a method of analysis of structures under wind loads; this differs from that proposed by NC 285: 2003. It is proposed to replace the NC 285 method for the calculation of the dynamic component by the GEF method for the consideration of dynamic actions due to atmospheric turbulence, as well as the consideration of the across-wind and torsional components and their combinations. The current standard is compared with the proposed update according to the wind parameters, the equivalent static method used, the values of base reactions and maximum displacements considering a 100 m high building as the object of study. In addition, a procedure for calculating accelerations is presented. The limit acceleration criteria proposed in the new proposal uses equations to indicate the limit values that should not be exceeded. The results show that the maximum across-wind acceleration governs the serviceability state for the comfort studies of the analyzed building and the values of maximum displacements are higher for the new proposal of the standard.

**Palabras Clave:**  Norma cubana de viento; Edificaciones altas; Componente dinámica; Cargas de viento.

***Keywords:*** Cuban wind standard; Tall buildings; Dynamic component; Wind loadings.

**1. Introducción**

Los edificios altos son estructuras sensibles a la acción del viento. Los vientos de gran intensidad, como los que se registran en Cuba en las temporadas ciclónicas, generan acciones sobre las estructuras que pueden ocasionar daños considerables si no se realiza un adecuado diseño. El sector hotelero demanda de este tipo de edificaciones, especialmente, en sitios donde no hay disponibilidad de mucho terreno. Ejemplo clásico de esta situación lo constituye la inserción de nuevas obras en las cabeceras de provincias, donde La Habana es el destino turístico que tiene el mayor número de proyectos de edificios altos en ejecución y perspectiva en estos momentos. La acción dinámica de la carga de viento en los edificios altos es necesaria considerarla tanto para los criterios de estados límites últimos, donde se deben garantizar la resistencia de los elementos estructurales, como para los criterios de estados límites de servicio donde deben ser chequeados los desplazamientos y las aceleraciones inducidas por el viento.

En Cuba, el método de análisis para la consideración de la componente dinámica del viento en las estructuras se incorporó a las normas cubanas de viento a partir del año 1983, el método fue adoptado a partir de los estudios realizados en la antigua Unión Soviética, sin embargo, no se corresponde con los métodos propuestos en el resto de las normas [1-6] y estudios de investigaciones internacionales. El método propuesto en la NC-285:2003 presenta limitaciones ya que varios parámetros, como el factor de aceleración reducida, no quedan claramente definidos, además no se ha podido identificar los fundamentos teóricos del método con los principios y conceptos definidos en la Ingeniería de Viento.

A partir del estudio de las referencias internacionales y del estudio comparativo de las normas de acción del viento sobre las estructuras [7] se identificó el método Factor de Efecto de Ráfaga como el método más aplicado internacionalmente para el análisis de los edificios altos.

Para la determinación de las fuerzas interiores y desplazamientos en edificios altos debido a las acciones dinámicas de la turbulencia atmosférica del viento es necesario tener en cuenta las componentes de la respuesta que son divididas en respuesta longitudinal, respuesta transversal y respuesta torsional. La respuesta longitudinal proviene de las fluctuaciones de la presión en el flujo que se acerca a la estructura, está relacionada directamente con la turbulencia atmosférica y la energía de las ráfagas del viento. La respuesta transversal es producto del movimiento de la estructura perpendicular a la dirección actuante del viento, el cual es introducido por las fluctuaciones de presión en una de las caras de la estructura y el desprendimiento de vórtices. La respuesta torsional es producto del desbalance en la distribución de presiones instantáneas sobre las superficies de la estructura. La norma cubana NC-285:2003 presenta como limitación que solo considera la acción dinámica para la obtención de la componente longitudinal de la respuesta de la edificación; sin embargo, el método Factor de Efecto de Ráfaga incluye la consideración de las tres componentes. Fueron realizados varios estudios comparativos entre normas internacionales [7-9] que incluyen diferentes variantes del método *Factor de Efecto de Ráfaga* utilizando las características de las velocidades y de turbulencia de los vientos de Cuba. Los resultados de los estudios comparativos permitieron incluir en la nueva propuesta de norma de viento la metodología para la determinación de las fuerzas dinámicas en edificios altos.

Otro de los chequeos para tener en cuenta en el análisis de los edificios altos es el efecto de las oscilaciones y aceleraciones inducidas por el viento en los humanos. La norma cubana de viento vigente no contiene ningún procedimiento para la determinación de las aceleraciones inducidas por el viento ni los valores permitidos en edificaciones altas para chequear el estado límite de servicio. Además, el método propuesto en la NC-285:2003 para la consideración de los efectos dinámicos de la carga no es compatible con las formulaciones reconocidas internacionalmente para calcular las aceleraciones, las cuales están basadas en el método *Factor de Efecto de Ráfaga*. Se han realizado estudios [10-12] donde se determinaron las aceleraciones máximas longitudinales, transversales y torsionales mediante una metodología propuesta a partir de la revisión e interpretación de las normativas internacionales de acción del viento sobre las estructuras. Estos estudios reflejan la importancia de considerar las componentes transversal y torsional en el análisis de edificios altos bajo carga de viento. Los estudios realizados permitieron incluir una metodología para calcular las aceleraciones actuantes y permisibles en edificios altos en la nueva propuesta de norma cubana de viento. Dicha metodología se presenta en este trabajo al igual que el método estático equivalente a utilizar para determinar las cargas de viento.

El presente trabajo tiene como objetivo describir los fundamentos y las metodologías propuestas para la actualización de la norma cubana de viento NC-285:2003 en cuanto a determinación de las fuerzas de viento y aceleraciones inducidas en edificios altos. Los resultados comparativos entre la norma cubana vigente y las metodologías propuestas se aplican en un edificio alto de 100 m de altura de hormigón armado.

**2. Metodología**

**2.1 Determinación de las fuerzas de viento**

Para calcular las fuerzas de viento sobre un edificio alto es necesario considerar las tres componentes de la respuesta de la edificación bajo una misma dirección de viento: longitudinal, transversal y torsional.

La norma cubana NC285:2003 considera la determinación de las fuerzas de viento en sentido longitudinal de la carga a partir de considerar dos componentes: estática y dinámica, las que deben ser calculadas de forma independiente y luego se suman. Sin embargo, en la nueva propuesta se propone una sola ecuación para la determinación de las fuerzas del viento, ver ecuación No. 1, que incluye tanto los efectos estáticos como los dinámicos, estos últimos se consideran a partir de un coeficiente denominado coeficiente dinámico.

(1)

donde:

fuerza de viento : presión pico.

coeficiente de fuerza. coeficiente dinámico.

en dependencia del tipo de estructura es el área tributaria.

presión básica del viento.

coeficiente de altura coeficiente de recurrencia

coeficiente de ráfaga : altura de referencia.

La ecuación para el cálculo de las fuerzas según los estudios actualizados considera el enfoque de la norma ISO [3] y la norma japonesa [1]. Cuando se analizan los factores que se modifican en el cálculo de las fuerzas de viento entre ambas normativas (vigente y propuesta), la velocidad básica del viento es uno de los parámetros que presenta marcada diferencia (Ver ecuación No. 2). En Cuba se han realizado estudios recientes [13, 14] donde se recogen nuevas estimaciones de velocidades básicas del viento. Sus valores se determinaron mediante la aplicación del Método de Tormentas Independientes (MIS) y datos estadísticos obtenidos de estaciones meteorológicas de todo el país. La velocidad básica para La Habana, que pertenece a la región 2 en la nueva distribución, es de 33 m/s en un intervalo de promediación de 10 minutos.

(2)

donde:

densidad del aire asumida como 1,184 para 25°C de temperatura

es la velocidad básica de viento (depende de la ubicación geográfica del sitio de construcción)

El coeficiente de altura es otro parámetro modificado en la nueva propuesta que adoptó su formulación a partir del análisis de las normas de viento más importantes del mundo teniendo en cuenta el estudio realizado por Kwon and Kareem [15]. En cuanto a las categorías de terreno, los estudios actualizados proponen una mayor discretización de las rugosidades en comparación con la NC285:2003 y quedan detalladas cuatro categorías de terreno donde se puede tener en cuenta de forma directa la dirección de viento que proviene del mar. En el caso del coeficiente de ráfaga, no se establece una expresión para su cálculo en la NC 285: 2003 [16]; esta última propone valores tabulados en función de la altura total de la estructura y del tipo de terreno analizado. No se especifica, además, si los valores propuestos tienen en cuenta las características de la turbulencia en zonas de vientos ciclónicos. En los estudios actualizados, el coeficiente de ráfaga se obtiene a partir de una expresión que parte de estudios realizados desde la década del sesenta por Davenport [17] y proponen la formulación a partir de asumir una distribución normal de probabilidades de la turbulencia del viento. La expresión para calcular este coeficiente se muestra en la ecuación No. 3.

(3)

Donde:

factor pico de la velocidad del viento, toma valor de 3,5.

intensidad de turbulencia (ecuación No. 4).

(4)

es el coeficiente de topografía para intensidad de turbulencia.

intensidad de turbulencia a la altura Z en función de las categorías de terreno (ver ecuaciones No. 5 y 6).

para (5)

para (6)

La intensidad de turbulencia y por lo tanto el coeficiente de ráfaga se determinan para la altura total de la edificación.

En la nueva propuesta las acciones estáticas equivalentes longitudinales que simulan el efecto dinámico que induce el viento sobre la estructura se tienen en cuenta mediante la aplicación del coeficiente dinámico . En la tabla 1 se presentan las expresiones para el cálculo del coeficiente dinámico longitudinal de la carga de viento.

Tabla 1. Parámetros para determinar el coeficiente dinámico longitudinal.

|  |  |
| --- | --- |
| **Coeficiente dinámico longitudinal** | |
|  | coeficiente dinámico longitudinal.  factor de efecto de ráfaga longitudinal;  altura de referencia para el cálculo dinámico0,6 *h* para estructuras verticales;  intensidad de turbulencia calculada a la altura de referencia . |
| **Factor de efecto de ráfaga longitudinal** | |
|  | factor de pico para la componente de fondo, puede equipararse a = 3,5.  factor pico para la componente resonante.  factor de la respuesta de fondo, que toma en cuenta la correlación parcial de las presiones actuando sobre la estructura.  : factor de respuesta resonante longitudinal |
| **Factor pico para la componente resonante** | |
|  | intervalo de promediación de la velocidad media del viento, .  frecuencia esperada de la respuesta longitudinal. |
| **Frecuencia esperada** | |
|  | frecuencia fundamental en el sentido longitudinal (en Hz). |
| **Factor de la respuesta de fondo** | |
|  | exponente de la ley potencial de variación de la velocidad media del viento en función del terreno.  ancho de la estructura (perpendicular a la dirección de viento);  altura de la estructura;  constante que toma valores de 0,15 para y 0,07 para ;  escala longitudinal de la turbulencia, calculada a la altura de referencia . |
| **Escala longitudinal de la turbulencia** | |
|  | : longitud de rugosidad en metros, depende de las categorías de terreno y se determina a partir de una equivalencia con el factor |
| **Factor de respuesta resonante longitudinal** | |
|  | exponente de potencia de la forma del primer modo de la vibración expresado como , depende del tipo de estructura.  factor de corrección del modo,    razón de amortiguamiento en el primer modo longitudinal de vibración.  parámetro adimensional que toma en cuenta el contenido espectral de la turbulencia en el sentido longitudinal,  factor de reducción por dimensión,  factor que representa los efectos de correlación de las presiones a barlovento y las presiones a sotavento, |
| **Parámetro adimensional** | |
|  | velocidad media calculada a la altura de referencia para el análisis dinámico, |
| **Factor de reducción por dimensión** | |
|  |  |
| Factor | |

El valor total de la razón de amortiguamiento es la suma del amortiguamiento estructural y el amortiguamiento aerodinámico. Los valores propuestos por las normas [2, 3] para el tipo de edificaciones como las estudiadas oscilan entre 0.012 y 0.015.

La NC 285:2003 considera solo la componente longitudinal del viento en cada dirección sin tener en cuenta el efecto combinado de esta con las componentes transversal y torsional. Por tanto, se presenta el procedimiento de cálculo de las acciones estáticas equivalentes transversales y torsionales según los estudios actualizados para la nueva propuesta de NC 285.

Las componentes transversal y torsional se tienen en cuenta si se cumple la ecuación no. 7:

(7)

donde:

es el ancho de la edificación (perpendicular a la dirección de viento).

es la profundidad de la edificación (paralela a la dirección del viento).

altura de la edificación.

El procedimiento de la carga estática equivalente transversal y torsional que se presenta en la propuesta de actualización de la norma es aplicable si:

-Se cumple que la dirección del viento es ortogonal a una cara de la edificación.

-Se evidencia que el edificio tiene una distribución vertical de masa uniforme.

-Se cumplen los siguientes requerimientos que se muestran en las ecuaciones 8-10:

(8)

(9)

(10)

donde:

es la velocidad media calculada a la altura máxima de la edificación.

es la primera frecuencia transversal (T) o torsional (M) , dependiendo del análisis que se desarrolle.

Las fuerzas estáticas equivalentes en el sentido transversal se calculan a través de las expresiones de la tabla 2.

Tabla 2. Fuerzas estáticas equivalentes transversales. Coeficiente dinámico.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Fuerzas estáticas equivalentes en el sentido transversal** | | | | |
|  | | :presión pico de viento calculada a la altura máxima;  : coeficiente de fuerza aerodinámica (asociado al momento de vuelco fluctuante);  área proyectada a la altura z;  coeficiente dinámico transversal. | | |
| **Presión pico de viento** | | | | |
|  | | : coeficiente de altura calculado a la altura máxima, .  : coeficiente de recurrencia (igual a 1)  : coeficiente de ráfaga calculado a la altura h, | | |
| **Coeficiente de fuerza aerodinámica** | | | | |
|  | | ancho del edificio (m) perpendicular a la dirección de viento analizada.  : Profundidad de la edificación (dimensión paralela a la dirección actuante del viento analizada). | | |
| **Coeficiente dinámico transversal** | | | | |
|  | factor de efecto de ráfaga transversal;  intensidad de turbulencia calculada a la altura máxima de la edificación ; | | | |
| **Factor de efecto de ráfaga transversal** | | | | |
|  | | factor pico transversal;  : factor de respuesta resonante transversal. | | |
| **Factor pico transversal** | | | | |
|  | | intervalo de promediación de la velocidad media del viento, ;  frecuencia fundamental en el sentido transversal (en Hz). | | |
| **Factor de respuesta resonante transversal** | | | | |
|  | | factor de corrección del modo,  : es la razón de amortiguamiento en el primer modo transversal de vibración (se tomó el mismo valor que para la longitudinal);  coeficiente del espectro de fuerza transversal. | | |
| **Coeficiente del espectro de fuerza transversal** | | | | |
|  | | | |  |
| **Parámetros , y (Caso del edificio estudiado)** | | | | |
|  | | | | |
| **Parámetros , y** | | | | |
|  | | | velocidad media del viento calculada a la altura máxima de la edificación. | |

El momento estático equivalente en la estructura en sentido torsional siguiendo el procedimiento de los estudios actualizados para la nueva propuesta de la norma de viento se calcula mediante las expresiones de la tabla 3.

Tabla 3. Momento estático equivalente torsional. Coeficiente dinámico.

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Momento estático equivalente en sentido torsional** | | | | |
|  | | :presión pico de viento calculada a la altura máxima;  : coeficiente de fuerza aerodinámica (asociado al momento de vuelco fluctuante);  área proyectada a la altura z;  coeficiente dinámico torsional. | | |
| **Coeficiente de fuerza aerodinámica** | | | | |
|  | | ancho del edificio (m) perpendicular a la dirección de viento analizada.  : Profundidad de la edificación (dimensión paralela a la dirección actuante del viento analizada). | | |
| **Coeficiente dinámico torsional** | | | | |
|  | factor de efecto de ráfaga torsional;  intensidad de turbulencia calculada a la altura máxima de la edificación ; | | | |
| **Factor de efecto de ráfaga torsional** | | | | |
|  | | factor pico torsional;  : factor de respuesta resonante torsional. | | |
| **Factor pico torsional** | | | | |
|  | | intervalo de promediación de la velocidad media del viento, ;  frecuencia fundamental en el sentido torsional (en Hz). | | |
| **Factor de respuesta resonante torsional** | | | | |
|  | | factor de corrección del modo,  : es la razón de amortiguamiento en el primer modo torsional de vibración (se tomó el mismo valor que para la longitudinal);  factor de energía espectral del momento torsional y su ecuación depende del valor de la velocidad media reducida . | | |
| **Factor de energía espectral del momento torsional** | | | | |
| para 4,5 y 10:    para : | | | | es la mayor dimensión entre y ;  velocidad media reducida;  ,: coeficientes adimensionales |
| **Velocidad reducida** | | | | |
|  | | | velocidad media del viento calculada a la altura máxima de la edificación. | |
| **Parámetros ,** | | | | |
| para 4.5 | | | | |
| para | | | | |
| para 4.5 | | | | |
| para | | | | |

**2.1.1 Combinaciones de las componentes de la respuesta.**

Las tres acciones (longitudinal, transversal y torsional) deben ser combinadas para un análisis de las edificaciones frente al viento, así como los efectos asociados (desplazamientos, rotaciones, tensiones, aceleraciones, entre otros). Con este propósito se recomiendan las tres reglas de combinación que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Reglas de combinación para efectos y acciones.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Combinación | Efecto/Acción longitudinal | Efecto/Acción transversal | Efecto/Acción torsional |
| 1 |  |  |  |
| 2 |  |  |  |
| 3 |  |  |  |

Los símbolos de la tabla tienen los siguientes significados:

indican, dependiendo de las circunstancias, los efectos (desplazamientos, rotaciones, tensiones, aceleraciones) o acciones longitudinales, transversales o torsional respectivamente.

es el factor de efecto de ráfaga longitudinal

es un coeficiente adimensional para la combinación de los efectos o acciones transversales y torsionales que se encuentra tabulado en la nueva propuesta.

**2.2 Procedimiento de cálculo de las aceleraciones.**

El procedimiento para determinar las aceleraciones pico de la respuesta longitudinal, transversal y torsional está basado en los parámetros que define el método estático equivalente para obtener las fuerzas dinámicas debido a la acción del viento. Las ecuaciones 11-19 muestran las fórmulas para calcular las aceleraciones pico, así como los factores pico y desviaciones estándar de la aceleración para cada una de las componentes. Las tablas 5-7 muestran las formulaciones y el significado de los términos que no se vieron anteriormente para el cálculo de las aceleraciones pico en un punto z de la edificación de las componentes longitudinal, transversal y torsional respectivamente. En las tablas puede observarse la velocidad media que es calculada a la altura de referencia o a la altura máxima para un periodo de retorno de un año (m/s). Las normas internacionales y estudios más actuales recomiendan el uso de periodos de retorno de un año para el análisis de los estudios de servicio en la determinación de las aceleraciones. Por tanto, se refiere a la velocidad media a 10 m de altura, sobre un terreno llano y abierto para un periodo de retorno de 1 año. En la ecuación de la velocidad se puede observar el coeficiente de topografía que integra los parámetros del perfil potencial de variación de la velocidad media con la altura. La metodología que se propone está basada en la norma japonesa.

La aceleración pico longitudinal se calcula mediante la ecuación No. 11:

(11)

Donde es el factor pico en sentido longitudinal (ecuación No. 12) y (ecuación No. 13) es la desviación estándar de la aceleración en el sentido longitudinal a una altura (z).

(12)

es la frecuencia fundamental en el sentido longitudinal (en Hz) y es el intervalo de promediación de la velocidad media del viento, .

(13)

En esta última expresión, los parámetros de cálculo tienen los significados siguientes:

: densidad del aire asumida como 1,184.

: velocidad media calculada a la altura de referencia para un periodo de retorno de 1 año (m/s).

es el ancho de la edificación (perpendicular a la dirección de viento).

altura de la edificación (m).

: masa generalizada para el primer modo longitudinal.

coeficiente de forma.

: intensidad de turbulencia calculada a la altura de referencia de la edificación.

: factor de respuesta resonante en sentido longitudinal para un periodo de retorno de 1 año.

: coeficiente adimensional.

: forma del primer modo longitudinal.

Tabla 5. Parámetros para la determinación de la aceleración pico longitudinal.

|  |  |
| --- | --- |
| Velocidad media: | (indistintamente de la región)  coeficiente de topografía.  coeficiente de exposición a la altura de referencia. |
| Coeficiente adimensional :    Cuando () y | altura de referencia de la edificación. longitud de rugosidad.  : exponente de la forma del modo. |
| Masa generalizada en el sentido longitudinal: | masa estructural por unidad de longitud (kg/m).  : valor del desplazamiento modal en cada piso del primer modo de oscilación en la dirección longitudinal, normalizados con respecto a su valor máximo. |
| forma del primer modo longitudinal: |  |

La aceleración pico transversal se calcula mediante la ecuación 14:

(14)

Donde es el factor pico en sentido transversal (ecuación No. 15) y (ecuación No. 16) es la desviación estándar de la aceleración en el sentido transversal a una altura (z).

(15)

es la frecuencia natural de vibración del primer modo de oscilación en el sentido transversal.

(16)

En esta última expresión, los parámetros de cálculo tienen los significados siguientes:

es la velocidad media calculada a la altura máxima de la edificación para un periodo de retorno de 1 año (m/s).

: es el coeficiente de fuerza aerodinámica en el sentido transversal.

: factor de respuesta resonante para la componente transversal.

: masa generalizada de la edificación en el sentido transversal (kg).

: es la forma del primer modo transversal evaluada a la altura máxima de la edificación y a la altura (z) donde se requiera conocer la aceleración.

Tabla 6: Parámetros para la determinación de la aceleración pico transversal.

|  |  |
| --- | --- |
| Masa generalizada en sentido transversal: | masa estructural por unidad de longitud (kg/m).  valor del desplazamiento modal en cada piso del primer modo de oscilación en la dirección transversal, normalizados con respecto a su valor máximo. |

La aceleración pico torsional se calcula mediante la ecuación No. 17:

(17)

Donde es el factor pico en sentido transversal (ecuación No. 18) y (ecuación No. 19) es la desviación estándar de la aceleración en el sentido transversal a una altura (z).

(18)

es la frecuencia natural de vibración del primer modo de oscilación en el sentido torsional.

(19)

Los parámetros de cálculo de la expresión anterior tienen los significados siguientes:

: coeficiente de fuerza aerodinámica en el sentido torsional.

: factor de respuesta resonante torsional.

: momento polar de inercia (de masa) generalizado (kg·m2).

: es la forma del primer modo torsional evaluada a la altura máxima de la edificación y a la altura (z) donde se requiera conocer la aceleración.

Tabla 7. Parámetros para la determinación de la aceleración pico torsional.

|  |  |
| --- | --- |
| Momento polar de inercia: | : es el momento de inercia (de masa) (flector o polar) de la estructura por unidad de longitud.  es la altura de la estructura (o del elemento estructural) |

**2.2.1 Valores límites permisibles de las aceleraciones.**

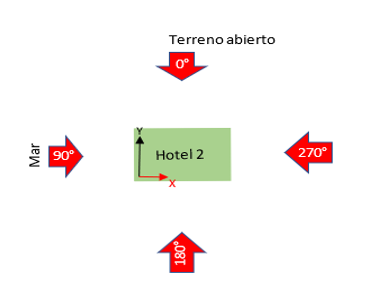
En la actualización de la norma vigente de viento también está previsto incluir criterios de aceptación de las aceleraciones a través de valores límites. Esto se realizará a través del procedimiento propuesto por la norma de viento italiana. Según esta norma, para garantizar los criterios de servicio de las edificaciones, cada valor de aceleración pico en el sentido longitudinal y transversal en el centro de giro, y , no deben exceder los valores límites dados por la ecuación No. 20.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | para | (20) |
| para |
| para |

Donde es el valor de referencia límite de la aceleración: para edificios de oficina, para edificios de apartamentos; es la frecuencia dominante en Hz, según para la aceleración en el sentido longitudinal , para la aceleración en el sentido transversal . y son las primeras frecuencias (fundamentales) en los sentidos longitudinal y transversal, respectivamente.

**2.3 Descripción de la edificación objeto de estudio.**

El edificio analizado es de hormigón armado y tiene una altura de 100 m. La estructura está formada por columnas perimetrales y vigas de hormigón armado, las losas de entrepiso son de hormigón postesado y el núcleo central es de tímpanos continuos armados in situ. La relación de amortiguamiento crítica utilizada fue de 0,01. El sistema de ejes de referencia y las dimensiones de la edificación se muestran en la figura (1) junto a las direcciones de viento analizadas y el tipo de terreno. Los valores de frecuencias naturales de traslación para el primer modo de oscilación en cada uno de los ejes y las frecuencias torsionales para la edificación se muestran en la tabla 8. Los valores de frecuencias fueron extraídos de un modelo en ETABS luego de realizado el análisis modal. En este modelo los entrepisos se consideraron rígidos y modelados a través de un diafragma.



41,37 m

39,17 m

edificio

Figura 1. Ejes de referencia, dimensiones y direcciones de viento analizadas del edificio.

Tabla 8. Valores de periodos y frecuencias de la edificación.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Tipo de Modo y dirección** | **Periodo (seg.)** | **Frecuencia (Hz.)** |
|
| 1er Flector (**y**) | 2,85 | 0,35 |
| 1er Flector (**x**) | 2,71 | 0,37 |
| Torsor | 1,87 | 0,53 |

Las cargas consideradas para el análisis del caso de estudio fueron: cargas permanentes, cargas de uso y las cargas de viento. En la tabla 9 se muestran las cargas de uso y permanentes utilizadas para la edificación destinada a fines hoteleros y en la tabla 10, los valores de los coeficientes estáticos y dinámicos considerados para el cálculo de las fuerzas de viento.

Tabla 9. Cargas permanentes y de uso de la edificación.

|  |  |
| --- | --- |
| Cargas permanentes (kN/m2) | Cargas de uso (kN/m2) |
| -En la cubierta: Impermeabilización más relleno para conformación de pendientes: 2,47.  -En pisos de habitaciones y áreas de servicio: 1,72 (Incluye mortero de colocación, terminación de piso, tabiquería ligera, falsos techos e instalaciones).  -En pisos técnicos, oficinas, almacenes, etc.: 1,75.  -Se incluyen pesos de equipos tecnológicos. | -Habitaciones y pasillos: 1,5  -Áreas de oficinas, balcones, cubierta: 2  -Áreas de restaurantes: 4  -Almacenes: 8  -Áreas de cocina y cafeterías: 3 |

Tabla 10. Resumen de parámetros para el cálculo de las fuerzas de viento.

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **Parámetros** | **Direcciones analizadas del edificio** | |  | **Direcciones analizadas del edificio** | |  | **Direcciones analizadas del edificio** | |
| **0 y 180˚** | **90˚** | **0 y 180˚** | **90˚** | **0 y 180˚** | **90˚** |
| (m) | 100 | | | | | | | |
| b (m) | 41,37 | 39,17 |  | 41,37 | 39,17 |  | 41,37 | 39,17 |
| d (m) | 39,17 | 41,37 |  | 39,17 | 41,37 |  | 39,17 | 41,37 |
| **estáticos** |  | | | | | | | |
| q10 | 0,66 | | | | | | | |
| Cr | 1,998 | 1,825 |  | 1,998 | 1,825 |  | 1,998 | 1,825 |
| Ct | 1 | | | | | | | |
| **dinámicos** | **Componente longitudinal** | |  | **Componente transversal** | |  | **Componente torsional** | |
| (m) | 60 | | (m/s) | 46,49 | 52,87 |  | 0,534 | |
| (m/s) | 43,06 | 50,75 |  | 1,98 | 2,57 |  | 2,163 | 2,163 |
|  | 0,142 | 0,118 |  | 0,128 | 0,11 |  | 0,156 | 0,134 |
|  | 160,37 | 189,96 |  | 1,90 | 1,77 |  | 1,168 | 1,237 |
| (Hz) | 0,351 | 0,369 | (kN/m2) | 2,49 | 3,0 |  | 0,0223 | 0,023 |
|  | 0,012 | | (Hz) | 0,369 | 0,351 |  | 1,208 | 1,22 |
|  | 0,76 | 0,77 |  | 0,012 | |  | 3,57 | |
|  | 0,095 | 0,092 |  | 1 | |  | 5,593 | 5,632 |
|  | 1 | 1 |  | 0,85 | |  | 2,94 | 3,2 |
|  | 1 | 1 |  | 0,28 | 0,29 |  |  |  |
|  | 0,20 | 0,24 |  | 0,104 | 0,118 |  |  |  |
|  | 0,057 | 0,067 |  | 0,032 | 0,05 |  |  |  |
|  | 0,923 | 0,98 |  | 1,44 | 1,81 |  |  |  |
| (Hz) | 0,271 | 0,29 |  | 3,46 | 3,45 |  |  |  |
|  | 3,5 | |  | 6,07 | 7,13 |  |  |  |
|  | 3,37 | 3,39 |  | 3,2 | 4,02 |  |  |  |
|  | 2,165 | 2,01 |  |  |  |  |  |  |
|  | 1,085 | 1,1 |  |  |  |  |  |  |

Las combinaciones generales para el análisis comparativo de las normas en la edificación objeto de estudio son las siguientes:

- 1.2 CP + 1.4 CV+0.5CU+0.5 CUC (para las fuerzas resultantes en la base del edificio)

- CP+CV+CU+CUc (para la obtención de los desplazamientos)

Donde:

- CP: Carga permanente. - CV: Carga de viento.

- CU: Carga de uso. - CUC: Carga de uso de cubierta.

**3. Resultados y discusión**

En esta sección se presenta la respuesta global de la estructura analizada en lo que se refiere a fuerzas resultantes en la base y desplazamientos mediante una comparación de resultados entre la norma de viento vigente y la propuesta de actualización. En la figura 2 se observa que para la combinación CP+CV+CU+CUc el desplazamiento máximo de la edificación se obtiene con la nueva propuesta de la norma. Este valor corresponde a la combinación 2 (tabla 4) de las componentes de la respuesta del viento para la dirección de viento de 90. En la tabla 11 se muestran los valores máximos de las fuerzas resultantes en la base para la combinación 1,2CP+1,4CV+0,5CU+0,5CUcub. En las diferencias de los resultados en la dirección x tiene gran influencia la consideración de los tipos de terreno dentro de los parámetros del viento. Mientras en la NC 285 considera terreno tipo A para edificaciones cercanas al mar, los estudios actualizados definen cuatro categorías de terreno, dentro de las que se encuentra la categoría I que tiene en cuenta de forma directa la dirección proveniente del mar, en este caso 90˚. En ambas direcciones los valores de reacciones en la base son mayores para la nueva propuesta de la norma de viento.

Figura 2. Desplazamientos máximos según las normas en el edificio analizado. (elaboración propia).

Tabla 11. Valores máximos de fuerzas resultantes en la base.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Normas** | **Fuerzas resultantes en la base para dos direcciones (kN)** | |
| **FX** | **FY** |
| NC-285:2003 | 13336,28 | 15007,46 |
| NC propuesta | 18859,95 | 16324,53 |

El cálculo de las aceleraciones pico para cada una de las componentes en la edificación fue realizado a partir de las formulaciones presentadas en la sección anterior y puede observarse en la tabla 12 para el edificio analizado.

Tabla 12. Valores de aceleraciones pico en las edificaciones estudiadas.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Componentes en la dirección **X** (90˚) | | | Componentes en la dirección **Y (**0˚y180˚) | | |
| Longitudinal | Transversal | Torsional | Longitudinal | Transversal | Torsional |
| = 100 m, h cálculo= 95 m | | | = 100 m, h cálculo= 95 m | | |
| =39,17 m | | | = 41,37 m | | |
| = 41,37 m | | | = 39,17 m | | |
| = 60 m | = 16,92m/s | | = 60 m | =14,35 m/s | |
| **=0,72** cm/s2 | **= 1,60 c**m/s2 | **= 0,03** rad/s2 | **=0,62**cm/s2 | **= 0,99** cm/s2 | **=0,02** rad/s2 |

En la tabla 13 se presenta un resumen con los valores de las aceleraciones máximas calculadas analizando todas las direcciones de viento y las permisibles para el edifício analizado en la que se evidencia que los valores calculados no superan los límites aceptados. Todas las frecuencias son menores que 1 Hz, por tanto, se comprueba que las aceleraciones no superen las permisibles con la primera formulación de la ecuación (20), donde se toma como .

Tabla 13. Valores de las aceleraciones calculadas y permisibles.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Aceleraciones máximas calculadas (cm/s2)** | | **aceleraciones permisibles (cm/s2)** |
| longitudinal | 0,72 | 6,99 |
| transversal | 1,60 | 7,19 |
| torsional | 0,03 | 5,68 |

**4. Conclusiones**

En este trabajo se presentaron las consideraciones para la determinación de las acciones dinámicas del viento en edificios altos, tanto en términos de fuerzas de viento como de aceleraciones, en los estudios actualizados para la nueva propuesta de norma cubana de viento NC-285. Se realizó especial énfasis en la determinación de las acciones dinámicas en edificios altos. En cuanto a las fuerzas resultantes en la base para el edificio analizado los resultados muestran que las mayores diferencias entre las normas (41,4 %) se encuentran en la dirección X que es donde los parámetros que determinan el perfil vertical de la velocidad del viento se desvían significativamente con respecto a los del terreno tipo A de la NC 285 al considerarse en los estudios propuestos una dirección de viento que proviene del mar directamente. Atendiendo a los valores de desplazamiento es mayor el valor para la nueva propuesta, donde se tiene en cuenta la combinación de los tres efectos sobre la edificación: longitudinal, transversal y torsional. La diferencia entre estos resultados es de un 8,5 % (1 cm). En la nueva propuesta las acciones estáticas equivalentes longitudinales que simulan el efecto dinámico que induce el viento sobre la estructura se tienen en cuenta mediante la aplicación del coeficiente dinámico . Este coeficiente es un parámetro adimensional que modifica las acciones aerodinámicas picos teniendo en cuenta la correlación parcial de la acción del viento y la amplificación de la carga resonante. A diferencia de la norma cubana vigente este coeficiente dinámico integra los factores resonante y no resonante que tienen en cuenta las características espectrales de la velocidad de viento. La carga dinámica de viento por la norma vigente es la sumatoria de las respuestas de los efectos estáticos y los dinámicos calculados sobre las estructuras. Las componentes transversales y torsionales que no se contemplan en la NC 285:2003 pueden ser considerables en el diseño por resistencia y confort de las estructuras. Teniendo en cuenta que el efecto dinámico ante cargas de viento es amplificado cuando las edificaciones comienzan a elevarse en altura y que en ciertos casos el efecto transversal y torsional prima en el diseño de las edificaciones, se hace necesario la inclusión de los aspectos mencionados en la norma de viento cubana. Los resultados muestran que los mayores valores de aceleraciones corresponden a la aceleración transversal y por tanto es la que rige el diseño de servicio para la edificación estudiada. Todas las aceleraciones pico calculadas resultaron menores que las máximas permisibles. Las futuras investigaciones en el tema de aceleraciones deben estar encaminadas a determinar qué nivel de movimiento es cómodo para los habitantes y para determinar cuál puede conducir a la degradación del desempeño de los ocupantes en los edificios más allá de indicar el nivel de movimiento que es perceptible.

**5. Referencias bibliográficas**

1. AIJ, *RLB Recommendations for loads on buildings. Structural Standards Committee. Architectural Institute of Japan*. 2004: Tokyo, Japan.

2. EN1991-1-4, *Eurocode 1: Actions on structures — General actions — Part 1-4: Wind actions*. 2004.

3. ISO-4354, *Wind action on structures. International Organization for Standardization,*. 2009: Switzerland.

4. NBCC, *National Research Council of Canada, National Building Code of Canada,Volume 2*. 2010.

5. AS/NZS1170.2, *Australian/New Zeland Standart: Structural Design actions, Part 2: Wind Actions*. 2011.

6. IS:875-(Part-3), *Wind Loads on Buildings and Structures - Proposed draft & Commentary. Document No: IITK GSDMA-Wind 02-V 50. IWC, Indian Wind Code*. 2012: India.

7. Silva Gonzalez, A.B., A. Ballate Delgado, and P. Martín Rodríguez, *Análisis de la respuesta estructural de una edificación de acero bajo carga de viento aplicando métodos estáticos equivalentes.* Revista de Arquitectura e Ingeniería, 2020. **14**(3).

8. López Litvinovich, A., P. Martín Rodríguez, and A.E. Castañeda Hevia, *Respuesta Torsional de edificaciones bajo cargas de viento.* Revista Arquitectura e Ingeniería, 2018. **12**(1): p. 1.

9. García Miranda, J.A., et al., *Análisis de nuevos proyectos de edificios altos bajo carga de viento en La Habana*. 2019: II Convención Científica Internacional “II CCI UCLV 2019”.

10. 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).

11. 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.

12. Ballate Delgado, A., I. Fernández Lorenzo, and P. Martín Rodríguez, *Aceleraciones inducidas por el viento en edificios altos*. 2021, VII Taller Internacional de Ingenierías: X Convención Científica Internacional de la Universidad de Matanzas, CIUM’2021.

13. Fernández Lorenzo, I., *Análisis dinámico de torres reticuladas de telecomunicaciones bajo carga de viento extremo.*, in *Departamento de Estructuras*. 2017, Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría (CUJAE): La Habana, Cuba.

14. García, K.L. and V.E. Parnás, *Análisis estadístico de velocidades de viento para el cálculo de estructuras.* 2017.

15. Kwon, D.K. and A. Kareem, *Comparative study of major international wind codes and standards for wind effects on tall buildings.* Engineering Structures, 2013. **51**(0): p. 23-35.

16. NC-285, *Carga de viento. Método de cálculo*. 2003 Oficina Nacional de Normalización: La Habana, Cuba.

17. Davenport, A.G. *Note on the distribution of the largest value of a random function with application to wind loading*. in *Proceedings Institution Civil Engineers*. 1964. London.