

## **Diseño Estructural Sostenible para Vientos Extremos.** *Sustainable Structural Design for Extreme Winds.*



**Autor: Lic en Física - Ing.Civil. Pedro A. Hernández Delgado.**

Director Técnico y Desarrollo  
Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería. EMPAI.  
Matanzas. Cuba.  
Profesor instructor de la Carrera e Ingeniería Civil de la  
UMCC. Telf: (45)291802, Ext.255.  
Email:pedro-hernandez@empai.co.cu

### RESUMEN

La caracterización del peligro es uno de los objetivos principales para la prevenir y mitigar los desastres. Cuba, por estar situada en la trayectoria habitual de los huracanes en el Caribe es afectada frecuentemente por estos fenómenos, originando importantes daños a la economía de país, pérdida de vidas y un impacto traumático en la sociedad. Por estas razones, la caracterización del peligro de los huracanes es fundamental para disminuir el riesgo de desastre, al permitir realizar diseños sostenibles que integren las variables meteorológicas con las estructurales, logrando construcciones más resistentes y, por lo tanto, menos vulnerables, disminuyendo el riesgo de catástrofe.

Se exponen criterios modernos de acuerdo a lo establecidos en la ISO 4354.2009: Wind actions on structures, para establecer los grados de confiabilidad estructural en base a la importancia de la construcción y en concordancia con la ISO 13822.2010 (E): Bases for design of structures. Assessment of existing structures. Se analiza las tendencias modernas de las principales normativas internacionales para la determinación de la carga de viento que actúa sobre las construcciones y se propone un modelo integral caracterizando el peligro provocado por los huracanes por un modelo probabilístico de ocurrencia de los vientos extremos por ellos provocados y la determinación de las cargas mediante un modelo de confiabilidad estructural también probabilístico.

Se propone como pueden aplicarse estos métodos en Cuba en base a los mapas existentes de velocidades del viento regionales y como pueden aplicarse localmente basados en base de registro de datos de las trayectorias y las variables del viento de los huracanes que han azotado a la región, proporcionando una importante para la realización de estudios de riesgos.

PALABRAS CLAVE: Vientos, normas, edificaciones, información, huracanes.

### ABSTRACT:

The characterization of the danger is one of the main objectives for the prevention and mitigation of disasters. Cuba, because it is located in the usual trajectory of hurricanes in the Caribbean, is frequently affected by these phenomena, causing significant damage to the country's economy, loss of life and a traumatic impact on society. For these reasons, the characterization of the hurricane hazard is essential to reduce the risk of disaster, by allowing sustainable designs that integrate the meteorological variables with the structural ones, achieving more resistant constructions and, therefore, less vulnerable, decreasing the risk of catastrophe.

Modern criteria are laid out according to ISO 4354.2009: Wind actions on structures, to establish the degrees of structural reliability based on the importance of construction and in accordance with ISO 13822.2010 (E): Bases for design of structures . Assessment of existing structures. The modern tendencies of the main international norms for the determination of the wind load that acts on the constructions are analyzed and an integral model is proposed characterizing the danger caused by the hurricanes by a probabilistic model of occurrence of the extreme winds caused by them and the determination of the loads by means of a model of structural reliability also probabilistic. It is proposed how these methods can be applied in Cuba based on the existing maps of regional wind speeds and how they can be applied locally based on the data base of the trajectories and the wind variables of the hurricanes that have hit the region. providing an important for conducting risk studies.

KEYWORDS: Winds, standards, buildings, information, hurricanes.

## **1. Introducción.**

Es muy importante en Cuba estar siempre conscientes del hecho de que nuestro país se encuentra dentro de la trayectoria habitual de los huracanes en el Caribe.

La norma cubana que regula el cálculo de las acciones de viento es la NC 285.2003: Carga de viento. Método de cálculo. En este estudio se han tomado como base la Norma ISO 4354.09: Wind Actions on Structures y la ASCE 07-10 Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures.

Las regulaciones para la construcción de edificaciones resistentes a huracán deben considerar los siguientes aspectos:

- Sitio de la edificación (selección).
- Sistema Principal Resistente a Fuerza de Viento. (SPRFV) • Sistema de Componentes y Revestimientos. (SCR)
- Interacción con otras estructuras vecinas.

Los elementos de las edificaciones más vulnerables a las fuerzas del huracán son los techos, ventanas y muros. El objetivo de la construcción resistente a huracán es proveer una edificación que no colapse durante un huracán. La edificación debe quedar en pie y sus ocupantes no sufrir daños.

## **2. Caracterización del viento.**

La variable física que mide la intensidad del viento es su velocidad y es la que diariamente utilizan los meteorólogos en sus informaciones del estado del tiempo. Los ingenieros, que calculan estructuras, trabajan con fuerzas, por lo que se hace necesario transformar la velocidad del viento en presiones que originen las fuerzas con las que el viento actúa sobre las estructuras. La velocidad del viento no es constante ni uniforme, sino que fluctúa aun en periodos cortos de tiempo, por lo que dependiendo de la manera y del periodo de tiempo en el cual se realice para su medición dependerá el valor obtenido, disminuyendo en la medida que aumenta dicho tiempo.

La velocidad del viento determinada en 1 minuto, es decir viento sostenido, es la que utilizan los meteorólogos cubanos en sus informaciones y es en la que inicialmente se utilizó en la definición de la escala Saffir – Simpson para la clasificación de los huracanes. También es la que se emplea en la NC 285 2003. Más recientemente esta escala se ha ampliado para incluir la velocidad pico de 3 segundos empleada actualmente por los meteorólogos de los Estados Unidos y en las últimas versiones de ASCE 7, desde 1995 y de la ISO 4354:2009

La expresión que correlaciona la velocidad del viento en m/s con la presión por él originada según la NC 285 y que coincide con las normativas internacionales, es la siguiente:

$$q_{10} = \frac{V_{10}^2}{1,6 \times 10^3} \quad [\text{kN/m}^2]$$

- $q_{10}$ : presión básica característica del viento correspondiente a velocidades del aire en terrenos llanos y abiertos a una altura de 10 m sobre el terreno, ( $\text{kN} / \text{m}^2$ ).
- $V_{10}$ : velocidad característica del viento para un período básico de recurrencia y a una altura de 10 m sobre el terreno, (m/s).
- 1600: factor empírico. (En realidad este factor es la densidad del aire, pues esta fórmula se obtiene de la fórmula clásica de Bernoulli para fluidos.)

Desde el punto de vista normativo existen dos tendencias:

- Normar la presión ( $q$ )
- Normar la velocidad ( $v$ )

La norma cubana NC 287:2003 establece una presión básica normativa ( $q_{10m}$ ) de acuerdo a una zonificación del país, como mostramos a continuación:



Figura 1: Regionalización según las presiones básicas del viento

### 3. El Peligro de los Huracanes.

Un huracán es un sistema meteorológico tropical que ha alcanzado vientos de más 118 km/h. Los vientos huracanados giran en espiral alrededor de un centro relativamente calmado, conocido como el “ojo” o vórtice. Los daños que provocan estos fenómenos de la naturaleza son producidos por los intensos vientos que los conforman, las intensas lluvias que provocan inundaciones y las olas que se originan en el mar dañando las zonas costeras.

Los huracanes se clasifican por la intensidad máxima alcanzada por los vientos, según la escala Saffir – Simpson, utilizada en nuestro país por el Instituto de Meteorología en los partes periódicos que sobre estos fenómenos emiten y que tan atentamente sigue toda la población cubana cuando amenazan y cruzan sobre nuestro archipiélago.

Existen fórmulas y gráficas que permiten relacionar las velocidades sostenidas y las picos. Es importante comprender la diferencia entre estas velocidades para no confundir mapas, tablas, gráficos y software realizados para una determinado tipo de velocidad. Al analizar la tabla anterior es importante resaltar que las fórmulas de cálculo de presión basadas con la velocidad sostenida contienen el factor de ráfaga razón por la cual los resultados obtenidos son similares.

#### 4. El periodo de retorno.

El periodo de retorno o de recurrencia (T) está estrechamente relacionado con el riesgo de que un determinado pueda producirse. Un periodo de recurrencia de 20 años significa que en 100 años se alcanzara o sobrepasara como promedio cinco veces el valor de la presión calculada q, o lo que es lo mismo, la probabilidad de alcanzar o sobrepasar en un año este valor de q es  $5/100 = 0,05$ . De esta forma podemos relacionar periodo de recurrencia y probabilidad para un año por la expresión:

$$\text{Periodo de retorno} = \frac{1}{\text{Probabilidad de falla anual}}$$

La NC 285.2003 plantea “La velocidad básica del viento se tomará con un período básico de recurrencia de 50 años para todas las estructuras permanentes y que además presenten características normales de sensibilidad al viento, importancia económica y duración. Para estructuras de menor importancia económica, de menor afectación a la vida y a la propiedad en caso de fallo, o de menor duración probable de la vida útil o funcional, ejemplo edificaciones de carácter provisional, puede tomarse un período de recurrencia menor de 50 años”. Incluye una tabla con diferentes valores de este coeficiente sin precisar su empleo.

| Tiempo de recurrencia<br>Años | Coficiente de recurrencia<br>C <sub>r</sub> |
|-------------------------------|---|
| 100                           | 1.15  |
| 50                            | 1.00  |
| 25                            | 0.90  |
| 10                            | 0.75  |
| 5                             | 0.70  |

NOTA: Para valores intermedios, el coeficiente de recurrencia se puede interpolar.

Esta norma no establece una relación entre el periodo de retorno del evento extremo y la probabilidad de falla para un intervalo de tiempo relacionado generalmente con la vida útil de la estructura. La ISO 4354 considera 4 niveles de importancia para los edificios y las estructuras los cuales coinciden con la ASCE 07:

Table J.1 — Importance levels of buildings and structures

| Importance level | Building or structure type  |
|------------------|---|
| 1                | Buildings or structures presenting a low degree of hazard to life and other property in the case of failure.  |
| 2                | Buildings or structures not included in importance levels 1, 3 and 4.   |
| 3                | Buildings or structures that are designed to contain a large number of people.                                |
| 4                | Buildings or structures that are essential to post-disaster recovery or associated with hazardous facilities. |

Esta norma ejemplifica mediante una tabla de relación entre el índice de confiabilidad ( $\beta$ ) y los especificados en la NC 285 la probabilidad de fallas para cada nivel de importancia.

**Table J.2 — Examples of relationship between classification system, design value for wind action and degree of reliability of structure**

| Importance level | Required degree of reliability for design under wind in terms of life-time target reliability indices (probability of failure) | Values of design wind action in terms of annual probability of exceedance |
|------------------|--|---|
| 1                | 2,3 ( $10^{-2}$ )  | 1:200   |
| 2                | 3,1 ( $10^{-3}$ )  | 1:500   |
| 3                | 3,7 ( $10^{-4}$ )  | 1:1 000   |
| 4                | 4,2 ( $10^{-5}$ )  | 1:2 000   |

Al comparar la tabla anterior observamos que los periodos de recurrencia son superiores a

La ISO 4354 plantea además que la evaluación de la confiabilidad debe ser ejecutada de acuerdo con la ISO 2394. Se proponen dos variantes para calcular la velocidad de diseño: una (el método europeo) determinando un valor característico para la velocidad del viento y un factor de mayoración, y la otra (método norteamericano) seleccionando la probabilidad del evento determinando la velocidad de diseño. Esta norma recomienda valores de diseño para un índice de confiabilidad  $\beta = 3.1, 3.8$  y  $4.3$  correspondiente a probabilidades de excedencia anual, es decir, probabilidades de falla del orden de  $10^{-3}, 10^{-4}$  y  $10^{-5}$  que se corresponden con periodo de retorno de 1/500, 1/1000 y 1/2000.

La norma cubana plantea: “La velocidad básica del viento se tomará con un período básico de recurrencia de 50 años para todas las estructuras permanentes y que además presenten características normales de sensibilidad al viento, importancia económica y duración”. Este periodo de recurrencia es inferior al mínimo recomendado en la tabla J.2 de la ISO 4354 e inferior al índice de confiabilidad  $\beta$  recomendado por la ISO 2394.

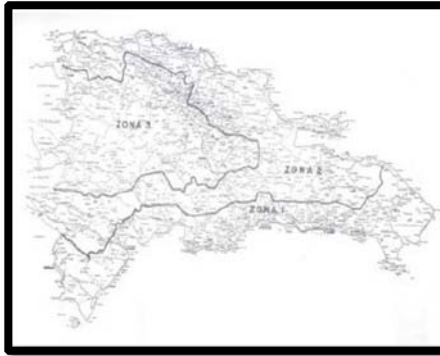
## 5. Análisis de otras normas internacionales.

- 5.1. **Norma norteamericana.** La ASCE 07 2010: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures, ha adoptado desde hace años la velocidad pico de 3-s como velocidad de cálculo y ha determinado períodos de recurrencia de 1700, 700 y 300 años en dependencia de la importancia de la estructura. Esta norma aclara el concepto de probabilidad de excedencia para el periodo de vida útil de la estructura, por ejemplo para 50 años su valor es del 7% con periodo de retorno de 700 años.
- 5.2. **Norma mexicana.** Está contenida en el Tomo III: Diseño por viento del volumen 4: seguridad estructural de las Normas y Especificaciones para Estudios, Proyectos, Construcción e Instalaciones del 2011. En esta norma se adopta la velocidad pico como velocidad de cálculo y se establecen clases de estructuras según su importancia. Además establece mapas y tablas para el país y para las principales ciudades.

**TABLA 6.3 Continuación**

| CIUDADES                | PERIODOS DE RETORNO |     |      |          |       |
|-------------------------|---------------------|-----|------|----------|-------|
|                         | V10                 | V50 | V100 | V200 (*) | V2000 |
| Nvas. Casas Gdes, Chih. | 117                 | 134 | 141  | 148      | 169   |
| Oaxaca, Oax.            | 104                 | 114 | 120  | 122      | 140   |
| Orizaba, Ver.           | 126                 | 153 | 163  | 172      | 198   |
| Pachuca, Hgo.           | 117                 | 128 | 133  | 137      | 148   |
| Parral de Hgo. Hgo.     | 121                 | 141 | 149  | 157      | 181   |
| Piedras Negras Coah.    | 137                 | 155 | 161  | 168      | 188   |
| Progreso, Yuc.          | 103                 | 163 | 181  | 198      | 240   |
| Puebla, Pue.            | 93                  | 106 | 112  | 117      | 132   |

- 5.3. **Norma Dominicana.** Esta norma divide al país en tres zonas y normaliza la presión en cada una de ellas. Esta regionalización esta en dependencia del mapa de velocidades establecidas para este país.

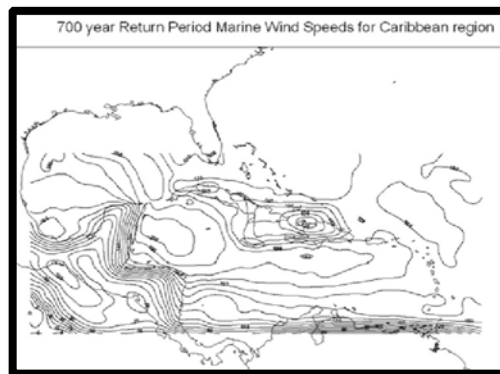


## 6. Mapas de viento.

La confección de un mapa de viento producido por huracanes depende de los factores siguientes:

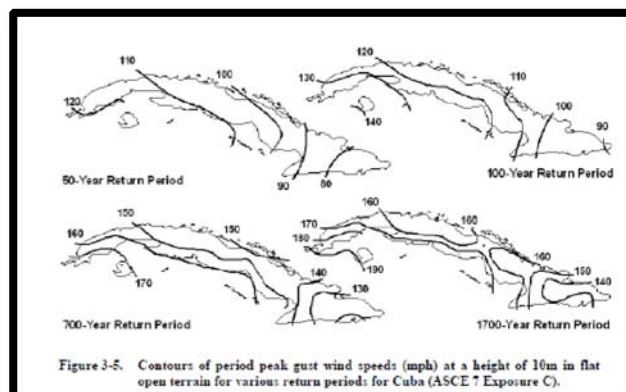
1. La base de datos de los huracanes.
2. El modelo de pronósticos.
3. Periodo de retorno considerado o la probabilidad de excedencia anual.

Estos mapas de viento no pueden ser locales producto de que el fenómeno climatológico está definido regionalmente y en ocasiones globalmente. En la confección de los mapas de viento del caribe se tomó como base de datos los elaborado por P. J. Vickery and D. Wadhera (2008) y por Gibb (2009), para velocidades picos de 3-s y periodos de retorno coincidente con la ASCE 07.



Mapa de velocidades y presión de viento para el Caribe.

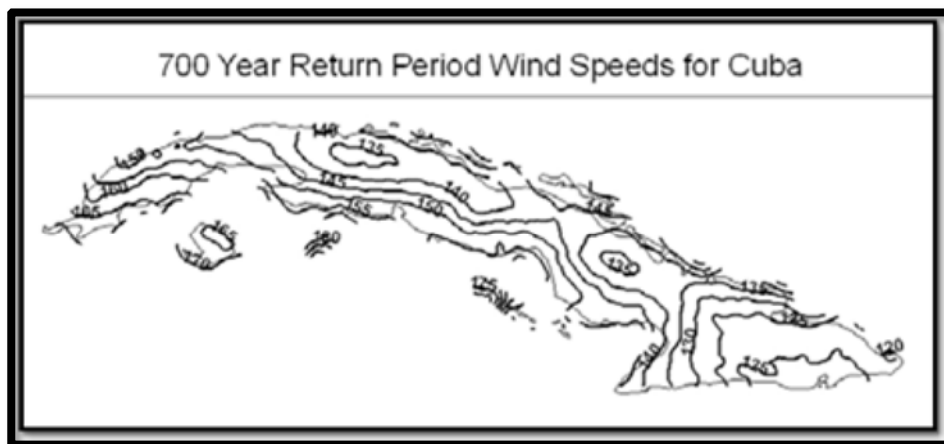
Para Cuba se han elaborado los siguientes mapas:



En base a estos mapas de velocidad en millas/h, para velocidades pico de 3-s y diferentes periodos de retorno (T) el autor lo redibujó en un plano de AutoCAD transformándolo en mapas de velocidades en Km/h y presiones de KN/m<sup>2</sup>, y con velocidades pico de 3-s y con viento sostenido, como se muestra a continuación:



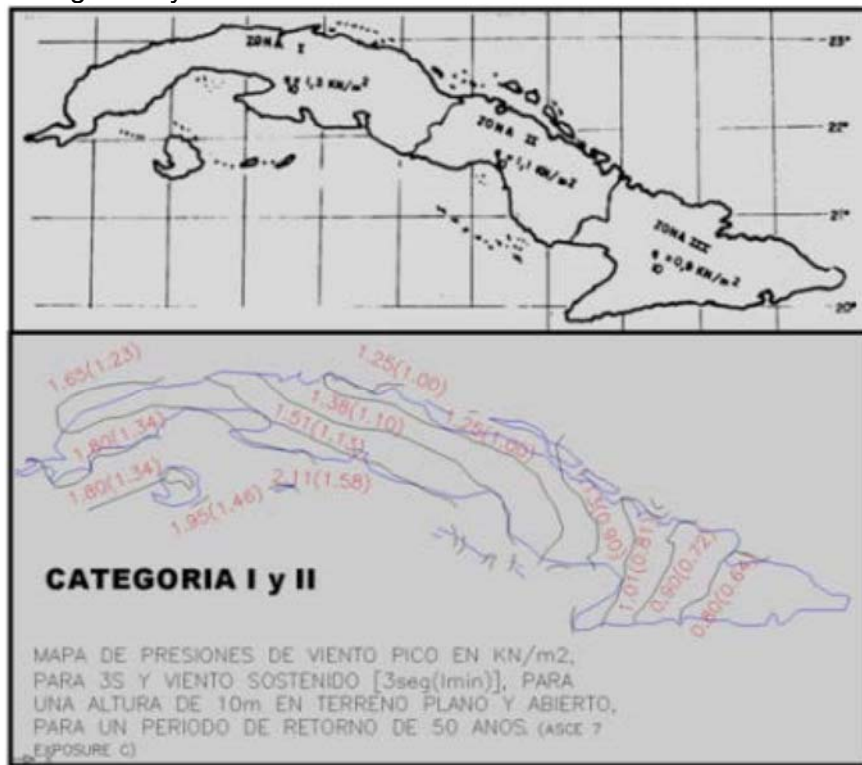
Para la confección de este mapa se partió de los mapas de velocidades para los periodos de retorno considerados y que se muestra como ejemplo el correspondiente a 700 años



Mapa de las velocidades del caribe para un período de retorno de 700 años

De este mapa se amplió la parte correspondiente a Cuba. Este mapa se encuentra en millas/h y se transformó a un mapa en km/h y de presiones. A continuación se presenta un mapa que

muestra la comparación con la NC 285-2003 en cuanto a las velocidades y las presiones para huracanes de categoría 1 y 2.



Mapa comparativo con la NC 285-2003 en cuanto a presión y velocidad del viento para huracanes de categoría 1 y 2.

Como se observa existe una correspondencia entre estos mapas mostrado en cuanto a los valores de velocidad mostrado para un periodo de 50 años. Dada la similitud de los valores mostrados en el mapa anterior podemos decir que la NC 285-2003 garantiza un nivel de confiabilidad bastante aceptable para huracanes de categoría 1 para un periodo de retorno de 50 años, excepto para las provincias de occidentales y la Isla de la Juventud.



**Comparación entre el mapa de presiones de la norma cubana y el mapa de presiones en base al mapa de velocidades del Caribe para un periodo de retorno de 50 años.**

**1.3 KN/m<sup>2</sup> → 164 km/h**

**1.1KN/m<sup>2</sup> → 151km/h**

**0.9 KN/m<sup>2</sup> → 144 km/h**



Para periodo de retornos mayores, se observan importantes diferencias como, puede observarse para valores de 100 años del periodo de retorno.



## 7. Análisis estadístico por vientos extremos.

Para este estudio se empleó el programa “STORM EYE” el cual grafica los huracanes de acuerdo con la base de datos HURDAT con registros desde 1851, se seleccionaron 217 eventos que han afectados a Cuba. De ellos se seleccionaron 174 que tenían determinadas sus velocidades y trayectorias con los cuales se confeccionó una base de datos en EXCEL denominada BDC-Cuba.

En los estudios bibliográficos realizados se concluyó que los análisis estadísticos realizados para Cuba en general están agrupados por provincias y que no tenían en cuenta la influencia de un evento de otra provincia sobre la de estudio. Por esta razón se decidió determinar círculos de influencia para cada zona a partir de la fórmula de Holland (1980 y 2008), la cual estima la velocidad del viento a partir de una distancia  $r$  del centro del huracán.

$$v_r = v_m \left[ \left( \frac{r}{r_m} \right)^e \right]^{1 - \left( \frac{r}{r_m} \right)^b} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_m} \right)^b \right]^{0.5}$$

$v_r$ : Velocidad del viento a la distancia  $r$ . Distancia al centro del huracán.

$v_m$ : Velocidad máxima del viento.  $r_m$ : Radio de viento máximos.  
 $b$ : parámetro de Holland, varía entre 0.5 y 2.5

Se determinó que hasta 250 km del eje se produce una influencia notable de un huracán de categoría 5 (250 km/h). Con este criterio se confeccionó la base de datos para provincia de matanzas BDC-Mtz, tomando como base la región centro-norte de la Provincia.

Para el estudio de vientos extremos se seleccionaron los 22 eventos que han afectado la provincia con vientos de categoría de huracán se empleó este criterio porque es el recomendado por la ACSE-07, la cual prohíbe los análisis a partir de velocidades medias anuales para zonas sometidas a vientos huracanados. Para el análisis estadístico se empleó el programa LABFIT el cual determinó como la distribución de mejor de ajuste la Gumbel. Con este resultado se elaboró una hoja de cálculo a partir de la BDC-Mtz que permite calcular la probabilidad de falla para un periodo de retorno determinado.

## 8. Comparación entre los métodos de cálculo analizados.

Para la realización de la comparación entre los tres métodos analizados: NC 285-2003, mapa de velocidades y análisis estadístico para vientos extremos, se confeccionó la siguiente tabla:

| Tabla comparativa de métodos probabilísticos con la Norma cubana NC 285.2003 |                    |                                  |                |                |                           |                |                      |                |
|--|--------------------|----------------------------------|----------------|----------------|---------------------------|----------------|----------------------|----------------|
| Descriptores de la falla   |                    |                                  | Según Gumbel   |                | Según mapa de velocidades |                | Según NC 285.2003    |                |
| Probabilidad de falla anual  | Periodo de retorno | Probabilidad de falla en 50 años | Veloc. en km/h | Presión en kPa | Veloc. en km/h            | Presión en kPa | Coef. de recurrencia | Presión en kPa |
| 5.00E-04   | 2000               | 2%                               | 327.0          | 4.30           |                           |                |                      |                |
| 5.88E-04   | 1700               | 3%                               | 323.6          | 4.21           | 202                       | 4.41           |                      |                |
| 1.00E-03   | 1000               | 5%                               | 311.2          | 3.89           |                           |                |                      |                |
| 1.43E-03   | 700                | 7%                               | 303.1          | 3.69           | 182                       | 3.58           |                      |                |
| 2.00E-03   | 500                | 10%                              | 295.5          | 3.51           |                           |                |                      |                |
| 5.00E-03   | 200                | 22%                              | 274.6          | 3.03           |                           |                |                      |                |
| 1.00E-02   | 100                | 39%                              | 258.8          | 2.69           | 160                       | 2.77           | 1.15                 | 2.81           |
| 1.33E-02   | 75                 | 49%                              | 252.3          | 2.56           |                           |                |                      |                |
| 2.00E-02   | 50                 | 64%                              | 242.9          | 2.37           | 151                       | 2.46           | 1                    | 2.44           |
| 4.00E-02   | 25                 | 87%                              | 226.9          | 2.07           |                           |                | 0.75                 | 1.83           |
| 1.00E-01   | 10                 | 99%                              | 205.4          | 1.70           |                           |                | 0.7                  | 1.71           |
| 2.00E-01   | 5                  | 100%                             | 188.3          | 1.43           |                           |                |                      |                |

De acuerdo con la NC 285 para 50 años la probabilidad de falla es del 64%, valor bastante inseguro de acuerdo con las normativas internacionales y la máxima para 100 años es del 39% para el periodo de recurrencia de 100 años acepta una probabilidad de falla para la vida útil de la construcción del 34%.

La ISO 4354 considera un periodo mínimo de retorno 200 años para un índice de confiabilidad de  $\beta=2.3$ , solamente aceptable para construcciones de muy baja importancia, criterio aceptado por la ACSE-07 para un periodo de retorno mínimo de 300 años.

La ASCE 2007 adopta un periodo de retorno de 700 años para la mayoría de las construcciones en los EEUU, valor que no difiere significamele de los 500 años considerados por la ISO 4354. Es importante destacar que en el 2010 la ASCE-07 sufre una transformación importante al eliminar el factor de mayoración para el cálculo de las acciones del viento considerándolo con un valor igual a uno (1) y lo sustituye por la presión calculada a partir de los mapas de vientos extremos, aunque permite el empleo de los mapas anteriores empleando un factor de transformación igual a la raíz cuadrada del FS anterior, es decir, raíz (1.6).

Al comparar los valores obtenidos de presión última de cálculo por vientos extremos para la ciudad de Matanzas, con los obtenidos mediante los mapas de velocidad se observa una buena correlación.

## **9. Conclusiones.**

1.-La NC 285 no ha evolucionado de acuerdo con los conceptos de confiabilidad estructural de las normativas internacionales a partir de las experiencias desarrolladas por las modernas teorías para los análisis de las acciones originadas por fenómenos extremos como son los terremotos y los huracanes.

2.-El empleo de los mapas de vientos para el Caribe son herramientas de gran importancia para determinar la intensidad de las acciones provocadas por vientos extremos en nuestro país.

### **Bibliografía:**

-Normateca. Centro de información de la construcción. Matanzas. Cuba.

-Manual de Ingeniería de Costa (MEC). (*Coastal Engineering Manual*). U.S. Army Corps of Engineers. 2002.

-Criterios de Confiabilidad Estructural para Estudios de Riesgos con Vientos Extremos. Hernández Delgado, Pedro A .1er Taller Nacional de Seguridad de las Estructuras. Holguín. 2015.

-Sitios consultados:

[www.met.inf.cu](http://www.met.inf.cu)

[www.tiempo.cuba.cu](http://www.tiempo.cuba.cu)

[www.radiorebelde.cu](http://www.radiorebelde.cu)

[www.ecured.cu](http://www.ecured.cu)

[www.cubasolar.cu](http://www.cubasolar.cu)