

Proyecto de Protección Costera para la Central Termoeléctrica Antonio Guiteras.

Coastal Protection Project for the Antonio Guiteras Thermoelectric Power Plant.



Lic. Ing. 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



Prof. MSc. Ing. Héctor Alfonso Pérez.

Ingeniero Principal
Empresa de Proyectos de Arquitectura e Ingeniería. EMPAI.
Matanzas. Cuba
Profesor Auxiliar de la Carrera de Ingeniería Civil de la UMCC.
Cuba
Telf: (45)291802, Ext.255. Email: hector-alfonso@empai.co.cu

Resumen:

Ante un sistema meteorológico, es impredecible la magnitud de las afectaciones, en el que nos ocupa la intensidad de los vientos fueron fuertes, originando olas de grandes alturas, lo que hizo que se dañaran importantes daños en objetos vitales al destruir la superestructura de la casa de bombas de circulación, el edificio de clarificación. Además se produjo la obstaculización de los conductos de alimentación de la piscina de tranquilización y de succión de las bombas. El canal de drenaje sufrió afectaciones por la cantidad de sedimentos y fragmentos de roca y concreto que lanzados por el oleaje, sufriendo daños en algunas zonas. El muro anti-ola fue destruido en partes importantes y en otras dañados significativamente que inhabilito la labor de protección, es por lo que el presente trabajo es un proyecto de una nueva obra de protección costera resistente al oleaje originado por huracanes de gran intensidad, teniendo en cuenta, además, la influencia del cambio climático durante la vida útil de la obra.

PALABRAS CLAVES: Huracán, afectaciones.

Abstract:

In front of a meteorological system, the magnitude of the affectations is unpredictable, in which the intensity of the winds was strong, originating waves of great heights, which caused that important damages in vital objects were damaged when destroying the superstructure of the house of circulation pumps, the clarification building. In addition, there was an obstacle to the supply ducts of the reassuring and suction pumps. The drainage channel was affected by the amount of sediment and fragments of rock and concrete thrown by the waves, suffering damage in some areas. The anti-wave wall was destroyed in important parts and in others damaged significantly that disabled the work of protection, which is why this work is a project of a new coastal protection work resistant to waves caused by hurricanes of great intensity, taking in addition, the influence of climate change during the useful life of the work.

Key Words: Hurricane, effects.

Introducción.

El huracán Irma al realizar su trayectoria por la costa norte y recurvar hacia el norte precisamente sobre la costa nororiental de la provincia de Matanzas, originó un intenso oleaje sobre su costa norte. La intensidad de sus vientos fue en su centro de 255 km/h originando olas del orden de los 6 m. Dada la ubicación de la CTE Guiteras en el borde este de su costa norte recibió el embate directo de este oleaje provocando importantes daños en objetos vitales al destruir la superestructura de la casa de bombas de circulación y del edificio de clarificación, dañando las bombas de circulación. Además se produjo la obstaculización de los conductos de alimentación de la piscina de tranquilización y de succión de las bombas. El canal de drenaje sufrió afectaciones por la cantidad de sedimentos y fragmentos de roca y concreto que lanzados por el oleaje, sufriendo daños en algunas zonas. El muro anti-ola fue destruido en partes importantes y en otras dañados significativamente que lo inhabilita para realizar una labor de protección.

Entre las tareas de recuperación de esta CTE se le solicitó a la EMPAI la realización del proyecto de una nueva obra de protección costera resistente al oleaje originado por huracanes de gran intensidad, teniendo en cuenta, además, la influencia del cambio climático durante la vida útil de la obra.

Caracterización del viento. El lugar donde se localiza la CTE Guiteras está sometido principalmente a la acción del oleaje originado por la velocidad de los vientos provocados por ciclones tropicales y frentes fríos o sistemas frontales, siendo los ciclones los de mayor incidencia en la intensidad del oleaje. Los ciclones se desarrollan durante la temporada comprendida entre el 1 de Junio y el 30 de Noviembre. Representan situaciones típicas de mal tiempo y definen la ocurrencia de uno de los fenómenos meteorológicos más peligrosos en Cuba.

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.

Escala Saffir Simpson en kmh		
Categoría Saffir Simpson	Viento sostenido 1-min	Rafaga 3-s
I	118 - 154	131 - 173
II	154 - 177	174 - 209
III	178 - 208	210 - 250
IV	209 - 250	251 - 306
V	> 250	> 306

Determinación de la intensidad de los vientos extremos. Para determinar la intensidad de los vientos extremos producidos por ciclones se empleo la base de datos HURDAT, confeccionada por la NOAA con registros desde 1851, con la información por coordenadas de toda su trayectoria con datos de velocidad pico del viento (v_{3s}) y presión barométrica. Para su estudio se confeccionó una tabla EXCEL calculando la velocidad de los vientos originada por el ciclón a una distancia r al punto de referencia a partir de la fórmula de Holland (1980 y 2008), previa conversión a vientos sostenidos (v_{1min}):

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

v_r : Velocidad del viento a la distancia r .
 r : Distancia al centro del huracán.
 v_m : Velocidad máxima del viento.
 r_{vm} : Radio de viento máximos.
 b : parámetro de Holland, varía entre 0.5 y 2.5

Se determinó un valor para $b=1.2$ mediante calibración con mediciones de la velocidad del viento reales obtenidas para ciclones que han afectado la ciudad de Matanzas.

Se obtuvo que 114 ciclones han influido sobre la ciudad de Matanzas, con los cuales se conformó la base de datos de huracanes para esta ciudad, la cual se procesó estadísticamente obteniéndose los parámetros para caracterizar la distribución estadística de Gumbel que es la de mejor ajuste para este tipo de evento climatológico.

Un aspecto fundamental en el análisis del viento es la clasificación del tipo de edificación, para lo cual se ha seleccionado la propuesta por la *ISO 4354-2009: Wind actions on structures*, que coincide con la norma americana *ASCE 7-10: Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, debido a que la actual norma de viento cubana vigente (NC 285.2003: Carga d Viento. Método de Cálculo) no considera este importante aspecto, el cual determina el nivel de riesgo en dependencia de la probabilidad de excedencia anual y de la vida útil de la instalación.

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.

De acuerdo con la tabla anterior la edificación que integra este proyecto pertenecen a la categoría 4 de la ISO 4354 y de la ASCE 7.

El periodo de retorno o de recurrencia (T) está estrechamente relacionado con el riesgo de que un determinado evento pueda producirse. Un periodo de recurrencia de 20 años significa que en 100 años se alcanzará o sobrepasará 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 como el inverso uno del otro. La siguiente tabla tomada de la ISO-4394 nos permite determinar el periodo de retorno de acuerdo con la categoría de la obra:

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 excedance
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

De la tabla anterior se concluye para nuestro caso una probabilidad de falla de 0.0005, que implica un periodo de retorno $T = 2000$.

La probabilidad de ocurrencia de un fenómeno ($P_{T,n}$) se relaciona con el periodo de retorno por la expresión:

$$P_{T,n} = 1 - (1 - p)^n = 1 - \left(1 - \frac{1}{T}\right)^n,$$

Donde: T = periodo de retorno y n = vida útil de la obra. En este caso se consideró un tiempo de vida útil de 50 años. A continuación se muestra una tabla en la que se relaciona el periodo de retorno con la velocidad de viento sostenido (v_{1min}):

Periodo de retorno	$T =$	2000	1700	1500	1000	750	500	200	100	50	25	10	5
Viento extremo	$v_{ext_3seg} =$	331	330	327	324	320	315	304	28	288	279	2.67	254
Viento sostenido	$v_{sost_1min} =$	278	277	275	272	269	265	257	250	242	234	224	213

De la tabla anterior se obtienen que para un periodo de retorno de 2000 años la velocidad de diseño para vientos sostenidos de 278 km/h y vientos picos de 3 segundos igual a 331 km/h.

Caracterización del viento generador de olas en el campo de vientos asociado al huracán. Teniendo en cuenta la categoría de obra y lo establecido por la ISO 4354 se ha adoptado como velocidad extrema de diseño (3s) del viento la correspondiente a un periodo de retorno de 2000 años: $U_{d3s} = 331$ km/h ($p_{f\text{ anual}} = 0.0005$). Para compararla con la escala Saffir – Simpson se ha transformado a vientos sostenido lo que equivale a $U_{dSost} = 278$ km/h, correspondiéndose a vientos de un huracán de categoría V. Para el cálculo de la altura máxima se consideró una velocidad del viento de tres horas, de acuerdo con el MEC y otras normativas similares, debido a que se considera este tiempo como el mínimo para desarrollar un campo de viento (*fetch*) suficiente para desarrollar la ola completamente, $U_{d3h} = 156.5$ km/h (43.5 m/s).

Periodo de retorno	$T =$	2000	Años	
Viento extremo	$u_{3s} (km/h) =$	331	km/h	Según Dist. Gumbel Vientos extremos
Viento sostenido	$u_{sost} (km/h) =$	278	km/h	Según MEC Figure II-2-1.
	$u_{sost\ m} =$	77.2	m/s	
Tiempo de cálculo (3 horas)	$t_{cálculo} (min) =$	180	min	
	$t_{cálculo} (seg) =$	10800	s	
Factor de corrección por tiempo	$U_{60}/U_{3600} =$	1.51	s/d	Según MEC Figure II-2-1.
	$U_{17}/U_{3600} =$	0.93	s/d	
	$K_t = U_{17}/U_{60} =$	0.61	s/d	
Velocidad de cálculo	$u_{3h} = K_t * U_{sost\ m} =$	47.48	m/s	
Vida útil de la obra	$n =$	50	Años	
Riesgo de ocurrencia	$R_{T,n} = 1 - (1 - 1/T)^n$	2%	%	

En la tabla anterior obtuvimos un valor del riesgo de ocurrencia del 2% para una probabilidad de excedencia del 0.5% considerando un periodo de vida útil de 50 años.

Caracterización del oleaje. Desde el punto de vista ingeniero el parámetro fundamental del oleaje es la altura máxima del nivel del agua sobre las estructuras naturales de la costa (N_{max}), esta última conformada por una terraza marina emergida que se extiende desde la costa hasta el borde del acantilado interior. La cota de esta terraza en la zona de interés próxima a la costa oscila entre 4.50m y 7.00 m. EL N_{max} depende de los siguientes factores:

1. Altura de la ola en aguas profundas (H_{∞}).
2. Altura de la ola en aguas someras (H_b).
3. Sobre elevación del nivel del mar (η_{total}) originada por la marea (η_m), la disminución de la presión atmosférica (η_{bar}) y por el efecto del viento al empujar la masa de agua sobre la costa (η_b).
4. Amortiguamiento de las olas por bermas naturales o artificiales.
5. Trepada o "runup" de la ola.

Altura de la ola en aguas someras (H_{∞}). Al aproximarse la ola a la costa ella interacciona con el fondo marino. En nuestro caso el perfil se caracteriza por una terraza marina sumergida corta, de unos 24 m de longitud perpendicular a la costa, con una profundidad entre 4 y 9 m para una pendiente de 11 grados, lo cual ilustramos a continuación:



En la próxima tabla se exponen los cálculos realizados para lo que se determinan además el periodo de la ola (T_p) y su longitud de onda (L_0) en aguas profundas.

2. Caracterización de la ola en aguas someras.			
	$\lambda_s =$	0.027 s/d	Según MEC Ec. II-2.2.b.1.a
Altura máxima de la ola en aguas profundas.	$H_{\infty} = \lambda_s * U^2 / g =$	6.22 m	Según Ec. MEC Ec. II-2-30
Prof. media 1ª terraza	$d_{11} =$	7.5 m	
Longitud de la primera terraza	$L_1 =$	18.3 m	
Periodo máximo de la ola en aguas someras	$T_p = 9.78(d_{11}/g)^{1/2} =$	8.6 s	Según MEC Ec. II-2-39
Long. ola aguas someras	$L_0 = g/2\pi T_p^2 =$	114.6 m	Según MEC Ec. II-1-15

El MEC en el §II-2-2-b-1a recomienda el empleo de la ecuación MEC II-2-30: $H_{\infty} = 0.027 U^2 / g$ para determinar el límite superior de la ola en crecimiento para cualquier velocidad (U) del viento. Obteniéndose para la velocidad $U_{03h} = 47.5$ m/s se obtiene una altura máxima de la ola en aguas profunda $H_{\infty} = 0.027(47.5/9.8) = 6.22$ m.

Al interactuar la ola con el fondo marino se produce su ruptura la cual depende del tipo de ola caracterizada por el parámetro de Iribarren o de Similaridad (ξ_0). En este caso el valor obtenido de $\xi_0 = 1.45$ implica su clasificación como ola colapsante que se caracteriza por el avance de su cresta la cual al chocar con la costa o con las estructuras de protección costeras liberan de forma explosiva el aire alcanzando gran altura el agua contenida por la ola. La ola al alcanzar una profundidad determinada, que depende de la pendiente del fondo, rompe y no crece más. La altura de la ola en rompiente se determinó según el criterio de Komar y Gaughan, modificando el valor de H_{∞} mediante el coeficiente de berma: $\Omega_b = 1$, confirmando el hecho de que la ola rompe de forma directa sobre el borde de la costa. Los cálculos realizados se muestran a continuación:

3. Caracterización de la ola en rompiente.			
Pendiente terraza sumergida	$\tan\beta = d_{11}/L_i =$	0.1973	s/d
Relación altura / Long. ola	$H_{\infty}/L_0 =$	0.0543	s/d
Parámetro de similitud	$\xi_0 =$	0.8465	s/d Según MEC Ec. II-4-1
Índice de profundidad de ruptura de la ola según Weggel	$a = 43.8(1 - e^{-19\tan\beta}) =$	42.77	s/d Según MEC Ec. II-4-6
	$b = 1.56/(1 + e^{-19.5\tan\beta}) =$	1.52	s/d Según MEC Ec. II-4-7
	$\gamma_b = b - a(H_{\infty}/gT^2) =$	1.15	s/d Según MEC Ec. II-4-5
Índice de altura de la ola en rompiente según criterio Komar y Gaughan	$\Omega_b = 0.56(H_0/L_0)^{-1/3} =$	1.00	s/d Según MEC Ec. II-4-8
Altura de la ola en ruptura	$H_b = H_{\infty} * \Omega_b =$	6.22	m Despejando MEC Ec. II-4-4
Prof. en ruptura de la ola	$d_b = H_b/\gamma_b =$	5.39	m Despejando MEC Ec. II-4-3

Cálculo de la sobreelevación del mar producido por el huracán. La sobreelevación del mar es adicional al efecto de las olas producidas por el viento. Se origina por los efectos de la marea, por la disminución de la presión atmosférica debido al huracán y el empuje del viento. Estos efectos se han considerados como simultáneos a los efectos de determinar la condición mas desfavorable. Estos cálculos se exponen a continuación:

4. Cálculo de la sobreelevación.			
Sobre elevación por marea	$\eta_m =$	0.46	m
Presión atmosférica en el ojo del huracán	$p_b = -0.286 * U_{SOST} + 1006.8 =$	927	mb
Variación de la presión atmosférica por el huracán	$-\Delta p =$	72.64	mb
	$-\Delta p =$	54.48	mmHg
Sobre elevación barométrica	$\eta_{bar} =$	0.74	m
Depresión por viento	$\eta_b = -(1/16) * \gamma_b^2 * d_b =$	-0.45	m Según MEC Ec. II-4-21
Sobre elevación por viento	$\eta_s = \eta_b + (1 + (1/8/3\gamma_b^2)) * h_b =$	1.63	m Según MEC Ec. II-4-24
Sobre elevación total	$\eta_{total} = \eta_m + \eta_{bar} + \eta_b =$	2.83	m

Cálculo de la altura de la cresta de ola al chocar con el borde de la costa y obras de protección. La altura de la cresta de la ola al chocar con el borde de la costa está dada por la suma de la sobre elevación del mar más la altura de la ola en rompiente obteniendo un valor de 9.23m como se expone en la siguiente tabla:

5. Cálculo del nivel de la cresta de la ola (η_{max}).			
Altura de la ola en ruptura	$H_b = H_{\infty} * \Omega_b =$	6.22	m Según tabla 3
Sobre elevación total	$\eta_{total} = \eta_m + \eta_{bar} + \eta_b =$	2.83	m Según tabla 4
Nivel de la cresta de la ola	$N_{cresta} = H_b + \eta_{total} =$	9.05	m

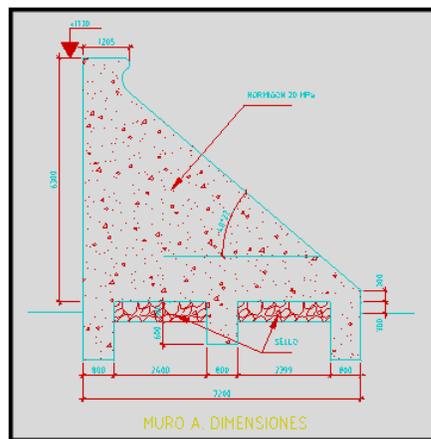
Descripción del muro antiola original y criterios para el diseño del nuevo muro. Originalmente el muro antiola se extiende paralela y próxima al borde de la costa. Para su descripción se puede dividir en dos secciones fundamentales, una al sur y otra al norte de la piscina de tranquilización. La sección sur protege prácticamente todas las instalaciones industriales de la planta, mientras que la sección norte protege el canal de desagüe. Esta sección estaba compuesta por un muro permeable compuestos por bloques de hormigón de dimensiones 2x4x7/6.5 con pesos de 67.2 y 52.8 t respectivamente. Estos bloques estaban agrupados en grupos de tres, alineados en dos filas de 4 m de ancho que se solapaban entre sí, para un espesor total de 8m. Estos bloques estaban colocados sobre un sello de hormigón de espesor variable, con espesores frontales de más de 1m en algunas partes. Estos bloques estaban colocados simplemente sobre este sello, sin anclaje alguno. La cota de coronación de este muro era aproximadamente 8.5m, por debajo de la altura de la cresta de la ola igual a 9.23m, es decir, para un 0.73m de rebase. Lo anterior significa que al ser el muro vertical el choque de la ola es muy fuerte y el volumen de agua de rebase es muy grande. Además, al quedar los bloques sumergidos dentro de la ola disminuye su peso y son arrastrados y volcados, a lo que se suma el proceso de erosión en la parte delantera y trasera del sello al no estar empotrado en la roca.

La sección norte, exceptuando la parte próxima a la piscina de tranquilización, con un muro similar a la sección sur, el resto, incluyendo el tramo situado más allá del aliviadero de descarga, está conformado por

un sello de hormigón de espesor variable sobre el cual se colocan cubos de hormigón macizos, bloques de 2x2x1m o similares, conformando un muro continuo de 4m de ancho y altura variable de 4 o 3,5 m de altura, con una cota de coronación también de aproximadamente 8.5m. Esta tipología del muro sufrió un rebase similar al de la sección sur, sin embargo resistió el embate de las olas y no sufrió daños considerables, observándose solo afectaciones por socavación que pueden ser reparadas. Al sobrepasar la cresta de la ola el tope del muro en 0.73m, se produce el rebase del muro por el oleaje con un caudal de agua que es función de la diferencia entre estos niveles. El caudal de rebase durante el huracán se ha calculado en el orden de los 96,265 m³/hora, volumen que provocó el colapso del funcionamiento del canal de desagüe.

Los diseños para la reconstrucción del sistema de protección costera de esta CTE han considerado las experiencias del huracán Irma y de otros fenómenos climatológicos que han afectado esta instalación. El proyecto original localizó el muro, en toda su extensión muy próxima al borde costero, responsabilizándolo con la resistencia de toda la fuerza del oleaje, sin prácticamente ninguna amortización natural. Otros aspectos considerados fueron que los bloques de hormigón no estaban anclados al terreno y además, no se ejecutaron dentellones frontales y traseros empotrados en la roca, para garantizar el anclaje horizontal y evitar la socavación por el oleaje. La altura del muro es factor decisivo en el comportamiento del muro frente al oleaje y determina el rebase de la ola, razón por la cual se realizó un estudio para determinar una altura óptimamente económica y segura. Al analizar la instalación se identificaron tres zonas con características diferentes desde el punto de vista de vulnerabilidad y de funcionalidad:

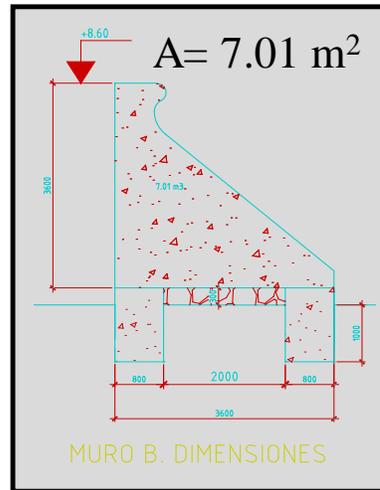
- **Zona A:** Es la parte sur del muro antiola situada desde la piscina de tranquilización hasta la calle central y comprende la casa de bombas el edificio principal y la zona de los transformadores. Es el corazón de la planta y la parte que necesita el máximo grado de protección. En esta zona se produjeron las principales afectaciones del huracán Irma. En esta zona se ha proyectado un muro denominado A, consistente en un muro de hormigón con un manto frontal de protección inclinado con una pendiente de 40°, una cota de coronación de 11.3 y una altura de 6.30m respecto al nivel +5.00m, con un ancho en la base de 7.20m. Este muro tiene dos dentellones empotrados de 0.9m de ancho y 1m de profundidad en la roca, en sus partes frontal y trasera que sirven además de anclaje a los respectivos refuerzos. Además, en su parte central tiene otro dentellón adicional de 0,6m de profundidad. Se determinó para todos los muros terminar con un deflector de oleaje en su tope con el objetivo de disminuir el rebase, como se ilustra a continuación:



El trazado de este muro se mantiene por razones tecnológicas aproximadamente en la posición del muro original hasta el extremo del canal de desagüe (Tramo A1), donde gira 45° hasta el borde del edificio principal, continuando paralelo al muro anterior (Tramo A2) hasta girar nuevamente para conectarse con el muro B.

- **Zona B:** Esta parte es continua a la zona A, diferenciándose de la anterior en que el muro puede retirarse unos 30m hacia detrás del muro original, aprovechando la terraza existente como una berma

que amortigua el efecto del oleaje lográndose un diseño no rebasable, con una cota de coronación de 10.50m y una altura de 4.5m respecto al nivel medio del nivel del mar.



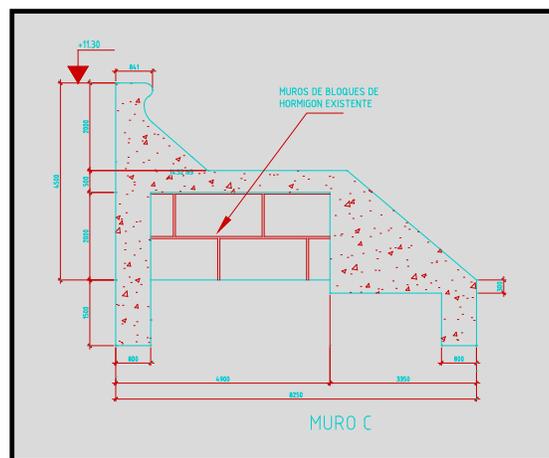
- **Zona C.** Esta parte ocupa el segmento norte del muro antiola, protegiendo el canal de salida del agua proveniente de los condensadores. Está constituido por diferentes tipo de bloques de hormigón conformando un muro continuo de 4m de ancho y una altura de 4 m con respecto a un sello de hormigón, con espesores entre 0.40 y 1.10 m, que se apoya directamente sobre la roca y sobre el cual se apoyan los bloque de hormigón sin anclaje, con una cota en su tope de +5.00 m, por lo cual la cota de la corona del muro es +9.00 m. este muro resistió el embate de las olas, aunque fue rebasado por el oleaje. En los videos filmados durante el evento ciclónico se observó el rebase casi permanente del sello, mientras que el rebase ocurría con menor frecuencia.



Se observó además socavación de la parte delantera y trasera del sello como se observa en las siguientes fotos:



La solución propuesta para esta sección del muro consiste en aprovechar el muro actual, previa reparación de las afectaciones de socavamiento, las cuales se repararan durante la ejecución de los dentellones de anclajes delanteros y traseros. Se construirá un escudo protector de con una pendiente de 40°, similar a la del muro A, hasta unirse a una losa de 0.50 m que se construirá sobre la superficie tope del muro actual, a manera de berma. Hacia el interior se conforma un muro que se corona a una cota similar a la del muro A, es decir +11.30 m, lo cual se ilustra a continuación:



Análisis del comportamiento hidráulico de cada muro. La acción de las estructuras costeras de protección provoca que la superficie del agua oscile sobre un rango vertical que es generalmente superior al de la altura de la ola incidente. El nivel extremo superior que alcanza la ola al desplazarse por las estructuras de protección se denomina trepada o “runup”. Si este nivel es superior al tope de la estructura de protección se produce el rebase del oleaje. Estos fenómenos dependen fundamentalmente de la geometría del perfil marino próximo a la costa, del perfil de la costa y de la geometría de la obra de protección. En este análisis se incluyó el efecto del cambio climático, en su variante más desfavorable, según el pronóstico del IPCC que para 100 años el cual estima un incremento del nivel medio del mar máximo de 0.98 m, considerándose la mitad 0.49, para el periodo de vida útil de 98 años. De acuerdo a lo anterior a continuación analizaremos cada una de las soluciones adoptadas para la protección costera de la CTE Guiteras.

Zona A. Tramo A1. Para éste análisis se determinó obtuvo un runup de 7.9m, como se ilustra a continuación:

7. Cálculo del runup.			
Pendiente del fondo	$\beta =$	0.20	s/d
Altura de la ola	$H_s =$	6.22	m
Relación H/L (MIC VI-5-2)	$s_{op} = H_s/L_{op} =$	0.054	s/d
Parámetro de semejanza de la ola en rompiente. (MIC VI-5-1)	$\zeta_{op} =$	0.85	s/d
	$\zeta_{eq} =$	0.85	s/d
Ecuación del runup (MIC VI-5-6)	$R_{u2\%}/H_s \gamma_b =$	1.50	s/d
Despejando runup (R_u)=	$R_{u2\%} = 1.5 \zeta_{op} \gamma_b =$	7.90	m

Los valores significativos de la sobreelevación y el runup se resumen en la siguiente tabla:

8. Resumen de sobreelevación y runup.			
Sobreelevación por marea	$\eta_m =$	0.46	
Sobreelevación barométrica	$\eta_{bar} =$	0.74	
Sobreelevación por viento	$\eta_s =$	1.63	
Sobreelevación total	$\eta_{total} = \eta_m + \eta_{bar} + \eta_b =$	2.83	
Sobreelevación runup (R_u)=	$R_{u2\%} =$	7.90	
	$R_{runup total} =$	$R_{total} = \eta_{total} + R_{u2\%} =$	10.73

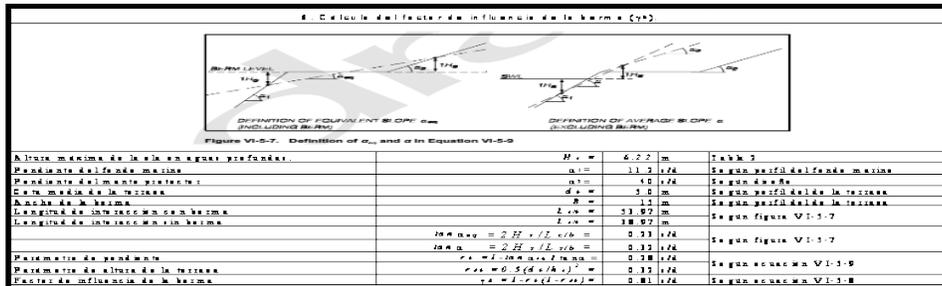
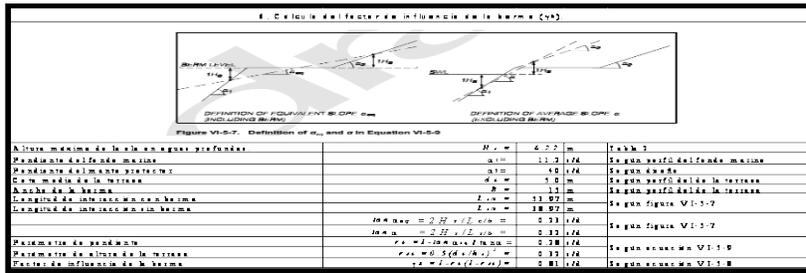
El R_{unup_total} es igual a 10.73 m, inferior a la cota de coronación del muro igual a 11.30 m, por lo que no se produce el rebase del muro. Además, se confeccionó la siguiente tabla con los niveles significativos del oleaje y el análisis del rebase para la situación y para el incremento de 0.49m debido al cambio climático:

9. Resumen de niveles de sobreelevación y runup.			
Cota por marea	$\eta_m =$	0.46	
Cota barométrica	$\eta_{bar} =$	1.20	
Cota por viento	$\eta_s =$	2.83	
Cota de la cresta de la ola	$N_{cresta} =$	9.05	
Cota oleaje actual (Runup actual) (R_u)=	$R_{u2\%} =$	10.73	
Cota tope del muro	$R_c =$	11.30	
Altura de rebase de la ola actualmente			-0.57
Sobreelevación por cambio climático	$\Delta_{climático} =$	0.49	
Cota oleaje dentro de 50 años ($R_{50 años}$) =			11.22
Altura de rebase de la ola 50 años			-0.08

Al analizar la tabla anterior se concluye que según el criterio de diseño por vientos extremo con velocidad sostenida igual a 278 km/h se obtiene una altura de la trepada de la ola de 10,73 m, inferior en 0.57m a la altura del muro, por lo cual no se produce rebase, Para dentro de 50 años se estima una altura de la trepada de la ola de 11.22 m, obteniéndose un rebase de 0.08m.

Teniendo en cuenta el perfil del fondo marino y de la costa frente al muro, desde el borde de la terraza marina sumergida hasta el pie del muro, y además la geometría del muro, se cálculo el caudal de rebase considerando el efecto de una corona deflectora curva, obteniéndose un valor de 0.002 m³/s (2 l/s) por metro de muro. En una hora se producirán 7.2 m³/s y en una longitud de 100m se obtienen 760 m³/h que deberán ser evacuado por el canal de salida y la piscina de tranquilización.

Zona A. Tramo A2. Este tramo es similar al anterior diferenciándose solamente en que se desplaza 15m hacia el interior desarrollándose una berma de 20 m frente al muro que contribuye a disipar la energía del oleaje y a reducir la altura de la trepada o runup.



7. Cálculo del runup.			
Pendiente del fondo		$\beta = 0.20$	s/d
Altura de la ola		$H_s = 6.22$	m
Relación H/L (MIC VI-5-2)		$s_{op} = H_s/L_{op} = 0.058$	s/d
Parámetro de semejanza de la ola en rompiente. (MIC VI-5-1)		$\zeta_{op} = 0.82$	s/d
		$\zeta_{eq} = 0.66$	s/d
Ecuación del runup (MIC VI-5-6)		$R_{u2\%}/H_s \gamma_b = 1.50$	s/d
Despejando runup (R_{u1})=		$R_{u2\%} = 1.5 \zeta_{op} \gamma_b = 6.19$	m

El runup disminuye de 7.90 m a 6.19 m para un 21% de reducción. La sobreelevación no sufre cambios por lo que su efecto y el runup se expone a continuación:

9. Resumen de niveles de sobreelevación y runup.			
Cota por marea		$\eta_m = 0.46$	
Cota barométrica		$\eta_{bar} = 1.20$	
Cota por viento		$\eta_s = 2.80$	
Cota de la cresta de la ola		$N_{cresta} = 8.95$	
Cota oleaje actual (Runup actual) (R_{u1})=		$R_{u2\%} = 8.99$	
Cota tope del muro		$R_c = 11.30$	
Altura de rebase de la ola actualmente			-2.31
Sobre elevación por cambio climático		$\Delta_{climático} = 0.49$	
Cota oleaje dentro de 50 años ($R_{50 años}$) =			9.48
Altura de rebase de la ola 50 años			-1.82

Al analizar las dos tablas anteriores se concluye que en la actualidad y dentro de 50 años no se produce rebase del muro por el oleaje para la velocidad de diseño de $v_{sost} = 278$ km/h.

Zona B.

Esta zona tiene una extensión de 175m, se ha diseñado con una geometría similar a la zona B, diferenciándose solamente en la altura del muro que en este caso es de 3.60 m respecto al nivel medio de referencia que es 6.00m, por lo que la altura de su corona es 10.50 m. La localización del muro en esta zona se ha desplazado 30m al interior del borde de la costa aprovechando el perfil del terreno natural como

berma con una cota promedio de 5.50 m. Con estas consideraciones la trepada o runup del oleaje se determinó por medio de la siguiente tabla obteniéndose un valor de 6.88 m:

6. Cálculo del factor de influencia de la berma (γ_b).			
Figure VI-5-7. Definition of α_{eq} and α in Equation VI-5-9			
Altura máxima de la ola en aguas profundas.	$H_s =$	6.22 m	Tabla 2
Pendiente del fondo marino	$\alpha_1 =$	11.2 s/d	Según perfil del fondo marino
Pendiente del manto protector	$\alpha_2 =$	40 s/d	Según diseño
Cota media de la terraza	$d_b =$	5.0 m	Según perfil del de la terraza
Ancho de la berma	$B =$	30 m	Según perfil del de la terraza
Longitud de interacción con berma	$L_{cb} =$	68.97 m	Según figura VI-5-7
Longitud de interacción sin berma	$L_{sb} =$	38.97 m	
	$\tan \alpha_{eq} = 2H_s / L_{cb}$	$= 0.18$ s/d	Según figura VI-5-7
	$\tan \alpha = 2H_s / L_{sb}$	$= 0.32$ s/d	
Parámetro de pendiente	$r_b = 1 - \tan \alpha_1 \tan \alpha$	$= 0.43$ s/d	Según ecuación VI-5-9
Parámetro de altura de la terraza	$r_{db} = 0.5(d_b / H_s)^2$	$= 0.32$ s/d	
Factor de influencia de la berma	$\gamma_b = 1 - r_b(1 - r_{db})$	$= 0.71$ s/d	Según ecuación VI-5-8

A continuación en la siguiente tabla se determina la altura total de la cresta de la ola sumando la altura del runup y la sobreelevación del mar obteniendo un valor de 5.38 m.

7. Cálculo del runup.			
Pendiente del fondo	$\beta =$	0.20	s/d
Altura de la ola	$H_s =$	6.22	m
Relación H/L (MIC VI-5-2)	$s_{op} = H_s / L_{op} =$	0.058	s/d
Parámetro de semejanza de la ola en rompiente. (MIC VI-5-1)	$\zeta_{op} =$	0.82	s/d
	$\zeta_{eq} =$	0.58	s/d
Ecuación del runup (MIC VI-5-6)	$R_{u2\%} / H_s \gamma_b =$	1.50	s/d
Despejando runup (R_u)=	$R_{u2\%} = 1.5 \zeta_{op} \gamma_b =$	5.38	m

9. Resumen de niveles de sobreelevación y runup.	
Cota por marea	$\eta_m = 0.46$
Cota barométrica	$\eta_{bar} = 1.20$
Cota por viento	$\eta_s = 2.80$
Cota de la cresta de la ola	$N_{cresta} = 8.95$
Cota oleaje actual (Runup actual) (R_u)=	$R_{u2\%} = 8.18$
Cota tope del muro	$R_c = 10.40$
Altura de rebase de la ola actualmente	-2.22
Sobreelevación por cambio climático	$\Delta_{climático} = 0.49$
Cota oleaje dentro de 50 años ($R_{50 años}$) =	8.67
Altura de rebase de la ola 50 años	-1.73

Al analizar la tabla anterior se verifica que para dentro de 50 años tampoco se produce el rebase.

Zona C.

El comportamiento hidráulico de este muro es similar al del muro A, despreciando la influencia de la berma intermedia sobre el muro actual, la cual origina un amortiguamiento adicional del oleaje.

Materiales a emplear. Para realizar el armado del hormigón se utilizará un refuerzo constituido por barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV), este tipo de refuerzo tiene una Resistencia a la Tracción de 800 MPa y un Módulo de Elasticidad de 50000 MPa. Se dispuso de una doble malla de diámetro 10mm @ 200mm separadas a 400mm entre ellas, mientras en la cresta, donde se incrementan las tensiones, se reforzó con barras de diámetro 16mm. Todo el sistema se anclo a la roca mediante unos dentellones a los cuales llegan las mallas de refuerzo para evitar el socavamiento y el arrastre. A resistencia del hormigón a emplear es de 250 kg/cm² y el cemento a emplear pp-250.

Conclusiones. El diseño realizado de los muros de protección costera de la CTE Antonio Guiteras basado en el análisis de los vientos extremos que pueden originar este oleaje, permite garantizar con seguridad la funcionalidad de esta planta en condiciones de oleaje extremo. Además, el material empleado como refuerzo garantiza la durabilidad del hormigón al no estar sometido a la acción corrosiva del acero.

Bibliografía:

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. Pedro A. Hernández Delgado. 1er Taller Nacional de Seguridad de las Estructuras. Holguín. 2015.